

基於最低費用之微灌灌水小區優化及影響因素分析

OPTIMIZATION AND INFLUENCE FACTOR ANALYSIS OF MICRO-IRRIGATION SUBUNIT BASED
ON MINIMUM COST MODEL

西北農林科技大學
水利與建築工程學院
博士班研究生

馬朋輝
Peng-Hui Ma

西北農林科技大學
水利與建築工程學院
博士班研究生

胡亞瑾
Ya-Jin Hu

西北農林科技大學
水利與建築工程學院
教授

劉韓生*
Han-Sheng Liu

貴州省水利水電勘測
設計研究院
工程師

劉應忠
Ying-Zhong Liu

摘要

微灌灌水小區由一條支管及其所帶毛管組成，是微灌系統的最基本設計單元，該部分規劃設計的合理性直接影響到微灌系統的工程投資及運行費用。本研究將灌水小區作為一個整體，不進行灌水小區允許壓力差的人為分配，也不進行各種地形坡度下灌水小區內壓力最大、最小值位置的討論，以單位面積年總費用最低為目標建立了不限定面積情況下毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區優化設計數學模型，採用罰函數法(Penalty function method)處理約束條件，應用遺傳算澇(Genetic algorithm)進行優化計算。本文分析了毛管管徑、支管管徑、灌水器流量及毛管方向地面坡度對毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區單位面積年總費用、供灌面積、支毛管長度及毛管雙向佈置灌水小區支管位置的影響，並在同等條件下對兩種佈置模式下灌水小區的優化結果進行了對比。結果表明，減小毛管管徑、支管管徑及灌水器流量有利於節省工程投資，增大毛管管徑及支管管徑、減小灌水器流量有利於增加灌水小區供灌面積；毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用較單向佈置降低了 0.58%~2.42%，供灌面積較單向佈置增大了 29.82%~165.14%，毛管雙向佈置灌水小區在單位面積年總費用及供灌面積兩方面均優於毛管單向佈置灌水小區。本研究提出的方法適用於各種坡度下規則佈置、不限定形狀及面積的微灌灌水小區的優化設計。

關鍵詞：微灌灌水小區、單位面積年費用、優化、遺傳算澇。

* 通訊作者，西北農林科技大學水利與建築工程學院，教授博士生導師
中國陝西楊凌示範區渭惠路 23 號，hanshengliuxn@163.com

OPTIMIZATION AND INFLUENCE FACTOR ANALYSIS OF MICRO-IRRIGATION SUBUNIT BASED ON MINIMUM COST MODEL

Peng-Hui Ma
Northwest A&F
University
College of Water
Resources and
Architectural
Engineering

Ya-Jin Hu
Northwest A&F
University
College of Water
Resources and
Architectural
Engineering

Han-Sheng Liu*
Northwest A&F
University
College of Water
Resources and
Architectural
Engineering

Ying-Zhong Liu
Guizhou Survey &
Design Research
Institute for Water
Resources and
Hydropower

ABSTRACT

The micro-irrigation subunit consists of a manifold and some laterals, which is the most basic design unit of the micro-irrigation system. The rationality of the planning and design of micro-irrigation subunit directly affects the project investment and operation cost of micro-irrigation system. In this study, the micro-irrigation subunit was addressed as a whole, avoiding the artificial distribution of allowable pressure differences, and there is no need to discuss the maximum and minimum pressure positions of the subunit under various topographic slopes. Taking the minimum annual total cost per unit area as the objective function, the mathematical models of optimization design for subunit with single laterals and subunit with paired laterals were established under the condition of unlimited area. Penalty function method was used to deal with the constraint conditions, and the genetic algorithm was used for optimization calculation. The effect of the lateral diameter, manifold diameter, emitter discharge and ground slope in lateral direction on the annual total costs per unit area, control area, lateral length, manifold length and manifold position of the subunit with paired laterals were analyzed, and the optimization results of the two types subunits were compared under the same conditions. The example results showed that reducing lateral diameter, manifold diameter and emitter discharge is conducive to save project investment, increasing lateral diameter, manifold diameter and reducing emitter discharge is conducive to enlarge micro-irrigation subunit control area. The annual total cost per unit area of irrigation subunit with paired laterals is 0.58% ~ 2.42% lower than irrigation subunit with single laterals, and the subunit control area is 29.82% ~ 165.14% higher than that with single laterals. The subunit with paired laterals is better than the subunit with single laterals in both project investment and control area. The method proposed in this study is applicable to the optimal design of micro-irrigation subunits with regular arrangement, unlimited shape and area under various ground slopes.

Keywords: Micro-irrigation subunit, Annual cost per unit area, Optimization, Genetic algorithm.

Ma, P.H., Hu, Y.J., Liu, H.S.*, & Liu, Y.Z. (2019). "Optimization and Influence Factor Analysis of Micro-irrigation Subunit Based on Minimum Cost Model." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 65(4), 40-52. [https://doi.org/10.29974/JTAE.201912_65\(4\).0004](https://doi.org/10.29974/JTAE.201912_65(4).0004)

一、緒論

灌水小區是微灌系統的最基本設計單元，一般情況下，一條支管及其所帶毛管(支管供灌的面積)稱為灌水小區。一個微灌系統，特別是大型微灌系統，往往由很多個進口壓力一樣的灌水小區所組成，該部分的規劃設計是否合理將直接影響到微灌系統的工程投資及運行費用。因此，對微灌灌水小區進行優化設計，在滿足系統灌水均勻度要求的條件下，尋求灌水小區的優化設計方案，具有十分重要的現實意義。

目前微灌灌水小區的優化設計大多通過灌水小區允許壓力差的分配來實現，微灌設計中普遍認為如果灌水小區的允許壓力差分配給支管比分配給毛管的比例少，灌水小區的設計比較經濟，但尚無通用的解析式可以表達各種地形條件下的分配比例問題。目前關於微灌灌水小區的研究主要集中在允許壓力差的分配比例^[6,11,23,24,26]、支、毛管的優化長度及管徑^[8,9,14,15,19,20]、毛管允許最大鋪設長度^[1,3,7,22]及雙向毛管最佳支管位置^[4,16,17,21,25]等問題上。前述研究大都是在灌水小區允許壓力差于支、毛管間分配的基礎上，將支、毛管作為獨立的單元進行優化，而灌水小區允許壓力差的確定本身就是一個尚待進一步研究的問題，允許壓力差在支、毛管間的分配不僅涉及到技術指標，同時還要受到經濟指標的制約，與灌水小區的佈置有關。因此，通過允許壓力差的分配將灌水小區人為的分成支管和毛管兩個獨立的單元進行設計很難達到最優狀態。一些學者^[5,10,12,27]研究了灌水小區支、毛管的同步優化問題，但實際將其分為支管優化及毛管優化兩個步驟，仍然需要確定灌水小區允許壓力差在支、毛管間的分配比例。

本文為避免灌水小區允許壓力差的人為分配，將灌水小區作為一個整體，以單位面積年費用最低為目標函數建立不限定面積情況下灌水小區優化設計數學模型，分析研究不同毛管管徑、支管管徑、灌水器流量及毛管方向地面坡度對灌水小區單位面積年總費用、供灌面積、支毛管長度及毛管雙向佈置灌水小區支管位置的影響，以期為微灌灌水小區優化設計提供依據。

二、微灌灌水小區優化數學模型的建立

微灌灌水小區由一條支管及若干條毛管連接而成，兩相鄰灌水器之間為一個毛管管段，兩相鄰毛管之間為一個支管管段，支、毛管管段的長度根據作物的種

植特徵確定。假定灌水小區內所有灌水器為等量流出且均為設計流量，灌水小區內所有毛管均選用同一規格管徑，支管不變徑。將支、毛管內順水流方向第 1 個出水口均標記為 1 號出水口，依此類推直至 M、N 號出水口。微灌灌水小區佈置形式如圖 1 所示。

由於本文是將灌水小區作為一個整體進行考慮，微灌系統灌水小區灌水器設計允許流量偏差率應滿足下式的要求^[28]：

$$[q_v] \leq 20\% \dots\dots\dots(1)$$

式中： $[q_v]$ 為灌水小區灌水器設計允許流量偏差率(%)。

灌水小區內灌水器流量偏差率應按下式計算：

$$q_v = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_d} \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

式中： q_v 為灌水器流量偏差率，%； q_{\max} 為灌水器最大流量，L/h； q_{\min} 為灌水器最小流量，L/h； q_d 為灌水器設計流量，L/h。

對機壓微灌灌水小區，灌水小區進口壓力水頭大，保證其正常運行所需的動力費用大，但灌水小區各管段所允許的水頭損失也大，因此支、毛管可以選用較小的管徑以節省投資；反之亦然。毛管的管徑可以根據作物、土壤性質、農業技術及管理等因素選定，因此微灌灌水小區優化的目的是在不限定灌水小區形狀及面積的情況下確定使灌水小區單位面積年費用最低的佈置形式(面積及支、毛管長度)、支管管徑及灌水小區進口壓力水頭，對毛管雙向佈置灌水小區還包括支管位置。支管位置定義為毛管雙向佈置灌水小區逆坡毛管長度與順坡、逆坡毛管長度之和的比值^[7]。

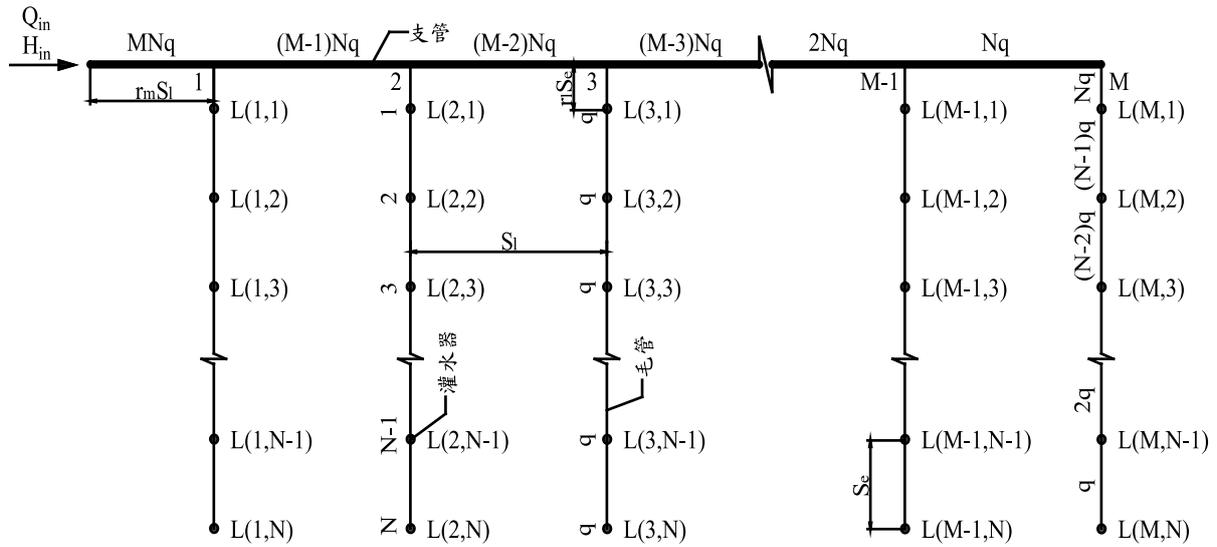
在灌水小區優化設計中應將小區內各灌水器的工作壓力水頭限定在滿足灌水均勻度要求所允許的壓力水頭範圍內，以保證灌水質量。灌水小區內的支、毛管均為多孔出流管，其沿程壓力變化主要受管道水頭損失及地面坡度的影響。多孔管某一孔口壓力水頭^[13]為

$$H_k = H_0 + \sum_{i=1}^k I_i L_i - \sum_{i=1}^k J_i L_i \quad (k = 1, 2, \dots, N) \dots\dots(3)$$

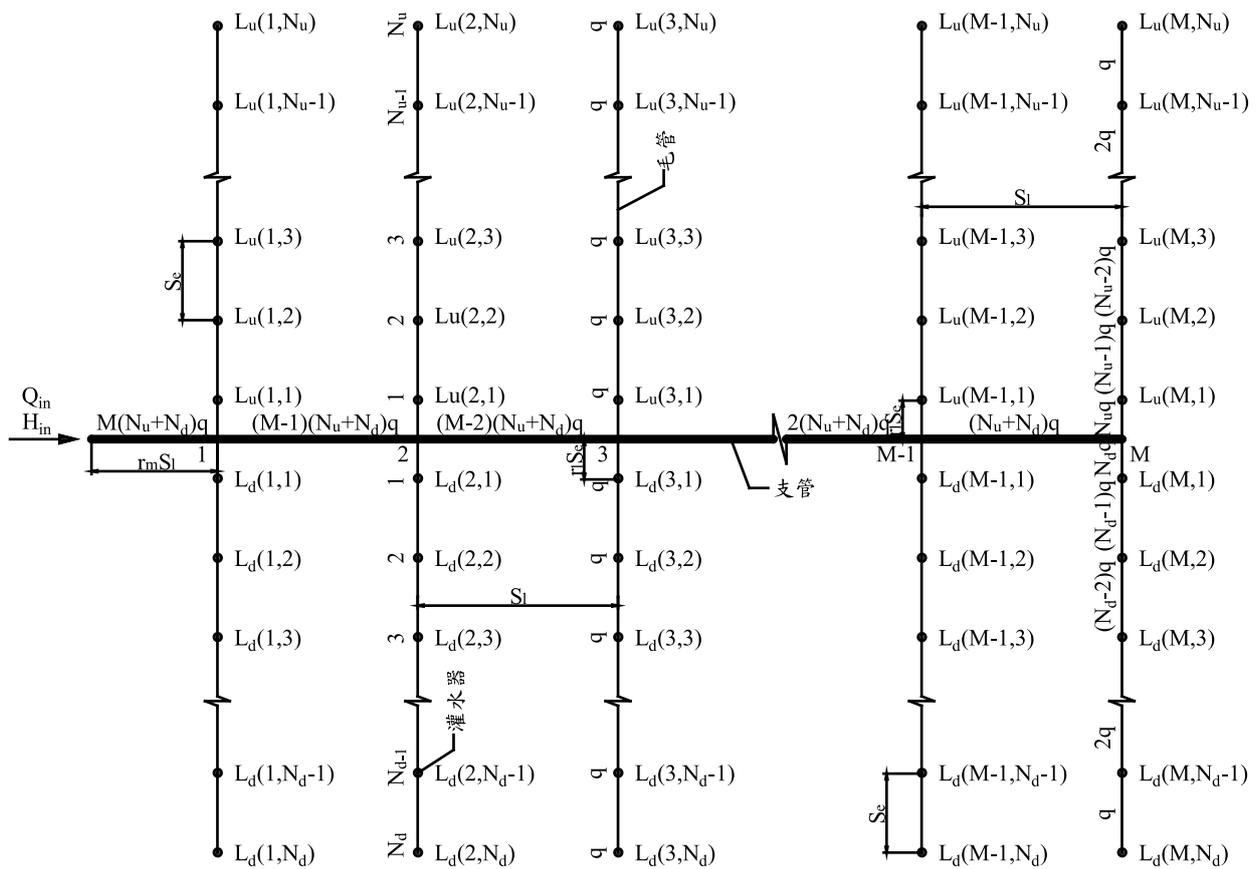
其中

$$J_i = \alpha f \frac{(N-i+1)^m q^m}{d_j^b} \dots\dots\dots(4)$$

式中： H_k 為第 k 個孔口的壓力水頭，m； H_0 為多孔管入口處壓力水頭，m； k 為孔口序號； N 為多孔管孔口數； I_i 為地面坡度； J_i 為水力坡度； L_i 為管段長度，m； α 為考慮局部水頭損失的加大係數； q 為灌水器流



(a) 毛管單向佈置灌水小區



(b) 毛管雙向佈置灌水小區

圖 1 典型微灌灌水小區管網示意圖

量， L/h ； d_j 為標準管直徑， mm ； f 為摩阻係數； m 為流量指數； b 為管徑指數。

局部水頭損失加大係數，一般取值為 $1.05 \sim 1.30$ ，茲取 1.05 。常見管材水頭損失計算係數見表 1。

本研究微灌系統採用灌水均勻係數進行灌水均勻度評價，灌水均勻係數表示同時工作的灌水器出水量均勻程度的係數，微灌灌水均勻係數不應低於 $0.8^{[29]}$ ，並應按下式計算：

表 1 各種管材的摩阻係數、流量指數和管徑指數

管材	摩阻係數	流量指數	管徑指數
硬塑料管	0.464	1.770	4.770
微灌用聚乙烯管 (D>8mm)	0.505	1.750	4.750
微灌用聚乙烯管 (D≤8mm, Re>2320)	0.595	1.690	4.690
微灌用聚乙烯管 (D≤8mm, Re≤2320)	1.750	1.000	4.000

$$C_u = 1 - \frac{\overline{\Delta q}}{q} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\overline{\Delta q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}| \dots\dots\dots (5.2)$$

式中： C_u 為灌水均勻係數； $\overline{\Delta q}$ 為灌水器的平均流量偏差，L/h； q_i 為各灌水器流量，L/h； \bar{q} 為灌水器平均流量值，L/h； n 為灌水小區內灌水器的數量。

2.1 毛管單向佈置灌水小區優化模型

毛管單向佈置灌水小區是指毛管沿垂直于支管的順坡方向佈置于支管一側，水流由支管進入毛管後向一個方向分流。以順坡方向毛管上灌水器的個數、支管上毛管的條數、支管管徑及灌水小區進口壓力水頭為決策變量，以單位面積灌水小區年總費用最低為目標函數建立不限定面積情況下毛管單向佈置灌水小區優化設計數學模型。

2.1.1 目標函數

以微灌灌水小區單位面積年總費用最低為目標，計算式為

$$\min F_1 = 10000 \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} + p \right] \frac{[(M-1+r_m)s_l C_m + (N-1+r_l)s_e C_l] + F_b}{(M-1+r_m)s_l \cdot (N-1+r_l)s_e} + C_w \dots\dots\dots (6)$$

其中

$$F_b = \frac{ETQ_m H_{in}}{367.2\eta} \dots\dots\dots (7.1)$$

$$T = \frac{R_n A}{3 \cdot 600 E_a Q_{in}} \dots\dots\dots (7.2)$$

式中： F_1 為毛管單向佈置灌水小區單位面積年總費用，元 $ha^{-1} a^{-1}$ ； r 為年利率，%； t 為折舊年限，a； p 為年平均維修費率，%； M 為支管上毛管的條數； N 為順坡方向毛管上灌水器的個數； r_m 為支管首端餘量比，支管入口至第一條毛管的距離與毛管間距之比； r_l 為毛管首端餘量比，毛管入口至第一個灌水器的距離與水器間距之比； s_l 為毛管間距，m； s_e 為水器間距，m； C_m 為選用的支管單價，元 m^{-1} ； C_l 為選用的毛管單價，元 m^{-1} ； F_b 為灌水小區水泵年動力費，元 a^{-1} ； E 為電價，元 $KW^{-1} h^{-1}$ ； T 為灌水小區年運行時數，h； Q_{in} 為灌水小區進口流量， $m^3 h^{-1}$ ； H_{in} 為灌水小區進口壓力水頭，m； η 為泵站效率； R_n 為淨灌溉定額， $m^3 ha^{-1} a^{-1}$ ； A 為灌溉面積，ha； E_a 為灌溉水利用係數，定義為灌到田間可被作物利用的水量與灌溉供水量之比； C_w 為單位面積年灌溉水水費^[2]，定義為將所需灌溉水從水源處輸送到灌水小區入口所需的費用，包括工程投資及運行費用。

2.1.2 約束條件

以一個灌水小區內所有水器的工作壓力水頭均在滿足灌水均勻度要求所允許的壓力水頭範圍內為約束條件，避免灌水小區允許壓力差的人為分配，也不進行各種地形坡度下灌水小區內壓力最大、最小值位置的討論，將灌水小區作為一個整體優化，有

$$H_{min} \leq H_k \leq H_{max} \dots\dots\dots (8)$$

其中

$$H_{max} = h_d + [\Delta h]/2 \dots\dots\dots (9.1)$$

$$H_{min} = h_d - [\Delta h]/2 \dots\dots\dots (9.2)$$

$$[\Delta h] = h_d h_v \dots\dots\dots (9.3)$$

$$h_v = \frac{q_v}{x} \left(1 + 0.15 \frac{1-x}{x} q_v \right) \dots\dots\dots (9.4)$$

式中： H_k 為灌水小區中第 k 個灌水器的壓力水頭，m； H_{min} 為滿足灌水均勻度要求的水器允許最小工作壓力水頭，m； H_{max} 為滿足灌水均勻度要求的水器允許最大工作壓力水頭，m； h_d 為水器設計工作水頭，m； $[\Delta h]$ 為水器允許水頭偏差，m； h_v 為水器水頭偏差率，%； q_v 為水器流量偏差率，%； x 為水器流態指數。

2.2 毛管雙向佈置灌水小區優化模型

毛管雙向佈置灌水小區是指毛管沿垂直于支管方

向的兩側(順坡方向及逆坡方向)鋪設,水流由支管進入毛管後向兩個相反的方向分流。以順坡方向毛管上灌水器的個數、逆坡方向毛管上灌水器的個數、支管上毛管的條數、支管管徑及灌水小區進口壓力水頭為決策變量,以單位面積灌水小區年總費用最低為目標函數建立不限定面積情況下毛管雙向佈置灌水小區優化設計數學模型。

2.2.1 目標函數

以微灌灌水小區單位面積年總費用最低為目標,計算式為

$$\min F_2 = 10000 \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} + p \right] \frac{[(M-1+r_m)s_l \cdot C_m + (N_u + N_d - 2 + 2r_l)s_e \cdot C_l] + F_b}{(M-1+r_m)s_l \cdot (N_u + N_d - 2 + 2r_l)s_e} \quad (10)$$

式中： F_2 為毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用,元 $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ； N_u 為逆坡方向毛管上灌水器的個數； N_d 為順坡方向毛管上灌水器的個數。

2.2.2 約束條件

毛管雙向佈置灌水小區優化設計數學模型的約束條件同毛管單向佈置灌水小區,這裡不再贅述。

三、基於混合編碼遺傳算灘的模型求解方法

遺傳算灘是一種類比自然界生物進化過程的全域優化算灘,它將計算機科學與進化論思想有機結合起來,借助于生物進化機制與遺傳學原理,根據優勝劣汰的原則,使所要解決的問題從初始解一步步地逼近最優解。作為一種全域優化搜索算灘,由於其具有思想簡單、易於實現、應用效果明顯等優點而被廣泛的應用於管網優化設計中。茲採用英國謝菲爾德大學開發的遺傳算灘 MATLAB 工具箱對灌水小區優化設計數學模型進行求解,遺傳算灘工具箱的使用具體可參考文獻 [18]。

3.1 編碼(Encoding)

毛管單向佈置灌水小區遺傳算灘的優化變量為 M 、 N 、 D_m 、 H_{in} ,毛管雙向佈置灌水小區遺傳算灘的優化變量為 M 、 N_u 、 N_d 、 D_m 、 H_{in} 。將支管管徑 D_m 與標準商用管徑的序號一一對應起來,成為一個有序的整數

數列,採用整數編碼方式;變量 M 、 N 、 N_u 、 N_d 為整數,亦採用整數編碼方式; H_{in} 為連續的實數變量,考慮計算方便及精度要求,採用 4 位小數的實數編碼方式。

因此,本文灌水小區優化設計數學模型遺傳算灘的優化變量採用整數及實數編碼的混合編碼方式。

3.2 適應度函數設計(Fitness function design)

將 M 、 N 、 D_m 、 H_{in} 作為毛管單向佈置灌水小區優化模型種群中的個體,將 M 、 N_u 、 N_d 、 D_m 、 H_{in} 作為毛管雙向佈置灌水小區優化模型種群中的個體,種群中的每一個個體都代表一種可能的解,灌水小區單位面積年總費用最低並滿足約束條件的解就是所求解的最優結果。由於遺傳算灘只能求解無約束優化問題,而前述灌水小區優化模型均為帶約束優化問題,需先對其進行無約束化處理,本文採用罰函數法實現上述轉化。對灌水小區構造的適應度函數為

$$F_{fit} = F + \lambda \sum_{i=1}^n \left| \min(0, H_k - H_{min}) \right| + \lambda \sum_{i=1}^n \left| \min(0, H_{max} - H_k) \right| \quad \dots\dots\dots(11)$$

其中 $\lambda=1/t_k$, $t_{k+1}=\zeta t_k$, $\zeta \in (0,1)$
式中： λ 為模擬退火懲罰因子(Simulated annealing penalty factor)； ζ 為溫度冷卻係數(Temperature cooling coefficient)； t_{k+1} 為第 $k+1$ 代退火溫度； t_k 為第 k 代退火溫度(Annealing temperature),當 $k=0$ 時稱為初溫。

3.3 遺傳操作(Genetic operation)

3.3.1 選擇(Selection)

遺傳算灘模仿生物遺傳和進化過程,根據個體的適應度值(Fitness Value),使用選擇算子來對群體中的個體進行優勝劣汰操作,確定如何從父代群體中按某種方法選取哪些個體遺傳到下一代。本文採用遺傳算灘工具箱中的 sus 函數實現選擇操作,具體為首先進行群體中個體適應度的評價,並以此為依據採取排序適應度分配的隨機遍歷抽樣方法從種群中選取一定比例的個體並作為父輩繁殖子代。

3.3.2 交叉(Cross)

交叉操作是在交叉概率控制下,把兩個父個體的部分結構加以替換重組而生成新個體的操作,其目的是為了能夠產生優良的下一代個體。本文採用遺傳算

澆工具箱中的 `xovsp` 函數實現交叉操作，具體為將種群中的奇數行與它的下一偶數行配對後進行單點交叉，若最後一行為奇數行則此行不參與交叉操作。

3.3.3 變異 (Mutation)

變異運算是以一較小概率改變個體編碼串中一些基因位上的基因值，形成一個新個體，改變遺傳算澆的局部搜索能力，維持群體的多樣性，防止出現早熟現象。本文對個體的整數編碼部分採用遺傳算澆工具箱中的 `mut` 函數實現變異操作，對個體的實數編碼部分採用遺傳算澆工具箱中的 `mutbga` 函數實現變異操作。具體為以一定概率選擇變異的基因位並在該位基因所允許的範圍內隨機變異。

四、算例與分析

4.1 算例

中國關中西部平原區種植夏玉米，灌水小區灌水器間距為 0.3m，毛管間距為 1.0m，支管及毛管首端餘量比均為 0.5，支管方向地面坡度為 1/100，毛管方向地面坡度取 0、1/500、1/200、1/100、1/50 五種情況，灌水器設計流量取 1.6 L h⁻¹ ($q=0.618h^{0.412}$)、1.8 L h⁻¹ ($q=0.612h^{0.468}$)、2.0 L h⁻¹ ($q=0.604h^{0.520}$)、2.2 L h⁻¹ ($q=0.592h^{0.570}$)、2.5 L h⁻¹ ($q=0.583h^{0.632}$) 五種情況，灌水器設計工作水頭均為 10m，毛管外徑取 12mm、16mm、18mm、20mm、25mm 五種情況，支管外徑取 40mm、50mm、63mm、75mm、90mm 五種情況，滿足灌水均勻度要求的灌水器允許最小工作壓力水頭為 8.0m，滿足灌水均勻度要求的灌水器允許最大工作壓力水頭為 12.0m，乾旱水文年充分灌溉年淨灌溉定額為 130m³ 畝⁻¹ a⁻¹，單位換算後為 1950m³ ha⁻¹ a⁻¹，灌溉水利用係數為 0.9，年利率為 7%，折舊年限為 8 a，年平均維修費

率為 3%，泵站效率為 0.65，電價為 0.6 元 KW⁻¹ h⁻¹，灌溉水水費為 0.75 元 m⁻³。灌水小區 PE 管材單價見表 2。採用上述資料分析不同毛管管徑、支管管徑、灌水器流量及毛管方向地面坡度對灌水小區單位面積年總費用、供灌面積、支毛管長度及毛管雙向佈置灌水小區支管位置的影響。

4.2 結果與分析

將上述有關資料代入灌水小區優化設計數學模型進行優化計算，遺傳算澆採用 MATLAB 遺傳算澆工具箱函數實現。基本遺傳參數設置如下：群體規模為 100，最大遺傳代數為 200，交叉概率為 0.9，變異概率為 0.1。罰函數法處理約束條件時模擬退火懲罰因子中初溫取為 0.00001，溫度冷卻係數取為 0.99。

參考文獻^[18]，單位面積年灌溉水水費中運行費約占 40%，將灌水小區單位面積年總費用劃分為單位面積年固定費用(單位面積年支毛管費用+單位面積年灌溉水水費×60%)及單位面積年運行管理費用(單位面積年動力費用+單位面積年維修費用+單位面積年灌溉水水費×40%)。為作圖方便，將灌水小區不同優化結果的名稱以表 3 中的符號表示。

4.2.1 毛管管徑對優化結果的影響

以灌水器設計流量 $q=2.0$ L h⁻¹，毛管方向地面坡度 $s_1=1/200$ 對不同毛管管徑下毛管單向佈置灌水小區、毛管雙向佈置灌水小區進行優化分析。

由圖 2(a)可以得出，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區單位面積年總費用、單位面積年固定費用及單位面積年運行管理費用均隨著毛管管徑的增大而增加；當毛管管徑由 12mm 增大到 25mm 時，兩種佈置模式下單位面積年總費用增加的百分比分別為 78.71% 和 81.50%，單位面積年固定費用增加的百分比分別為 94.68% 和 98.31%，單位面積年運行管理費用增加的百

表 2 灌水小區 PE 管材單價表

毛管			支管		
外徑/mm	內徑/mm	單價/元 m ⁻¹	外徑/mm	內徑/mm	單價/元 m ⁻¹
12	9.6	1.25	32	28.8	5.74
16	13.6	1.56	40	35.2	6.87
18	15.6	1.95	50	44.0	8.36
20	17.4	2.26	63	55.4	10.41
25	22.0	3.20	75	66.0	12.48
			90	79.4	18.82

表 3 灌水小區不同優化結果之符號表

符號	符號所代表的含義	符號	符號所代表的含義
$F_{s,total}$	毛管單向佈置灌水小區單位面積年總費用	A_p	毛管雙向佈置灌水小區供灌面積
$F_{p,total}$	毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用	$L_{s,manifold}$	毛管單向佈置灌水小區支管長度
$F_{s,investment}$	毛管單向佈置灌水小區單位面積年固定費用	$L_{p,manifold}$	毛管雙向佈置灌水小區支管長度
$F_{p,investment}$	毛管雙向佈置灌水小區單位面積年固定費用	$L_{s,d-lateral}$	毛管單向佈置灌水小區順坡毛管長度
$F_{s,operation}$	毛管單向佈置灌水小區單位面積年運行管理費	$L_{p,d-lateral}$	毛管雙向佈置灌水小區順坡毛管長度
$F_{p,operation}$	毛管雙向佈置灌水小區單位面積年運行管理費	$L_{p,u-lateral}$	毛管雙向佈置灌水小區逆坡毛管長度
A_s	毛管單向佈置灌水小區供灌面積	MP	毛管雙向佈置灌水小區支管位置

表 4 灌水小區灌水均勻係數之量化表

灌水小區類型	毛管管徑	灌水均勻係數	灌水器流量	灌水均勻係數	支管管徑	灌水均勻係數	毛管方向地面坡度	灌水均勻係數
毛管單向佈置灌水小區	12	0.9536	1.6	0.9705	40	0.9777	0	0.9667
	16	0.9674	1.8	0.9686	50	0.9701	1/500	0.9689
	18	0.9666	2.0	0.9666	63	0.9598	1/200	0.9666
	20	0.9757	2.2	0.9664	75	0.9527	1/100	0.9711
	25	0.9928	2.5	0.9767	90	0.9460	1/50	0.9743
毛管雙向佈置灌水小區	12	0.9605	1.6	0.9754	40	0.9858	0	0.9736
	16	0.9751	1.8	0.9726	50	0.9819	1/500	0.9758
	18	0.9738	2.0	0.9738	63	0.9736	1/200	0.9738
	20	0.9715	2.2	0.9738	75	0.9636	1/100	0.9730
	25	0.9865	2.5	0.9732	90	0.9560	1/50	0.9703

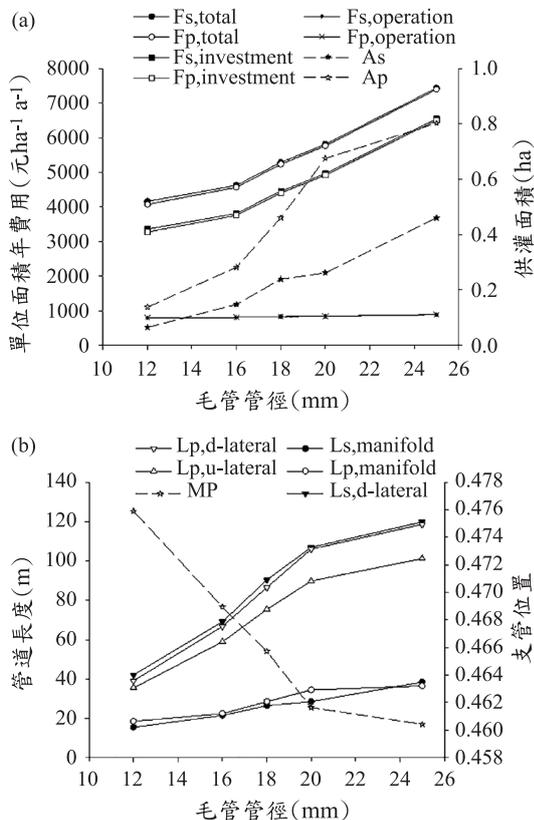


圖 2 毛管管徑對灌水小區優化結果的影響

分比分別為 11.38%和 12.23%。對灌水小區單位面積年總費用的構成進行分析，當毛管管徑由 12mm 增大到 25mm 時，兩種佈置模式下灌水小區單位面積年總費用中固定費用所占百分比增大，運行管理費用所占百分比減小，具體為毛管單向佈置灌水小區單位面積年總費用中固定費用所占百分比由 80.82%增大至 88.04%，運行管理費用所占百分比由 19.18%減小至 11.96%，毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用中固定費用所占百分比由 80.47%增大至 87.92%，運行管理費用所占百分比由 19.53%減小至 12.08%，其他條件相同時，兩種佈置模式下灌水小區單位面積年總費用的構成比例基本相當。兩種佈置模式下灌水小區供灌面積均隨著毛管管徑的增大而增加，增加的百分比分別為 606.27%和 480.80%。對比兩種佈置模式下灌水小區的優化結果可以發現毛管雙向佈置灌水小區的單位面積年總費用均低於毛管單向佈置灌水小區，降低的百分比為 0.58%~2.11%；毛管雙向佈置灌水小區的供灌面積均大於毛管單向佈置灌水小區，面積增大的百分比為 73.95%~157.93%。說明減小毛管管徑及毛管雙向佈置有利於降低灌水小區單位面積年總費用，增大毛管管徑及毛管雙向佈置有利於增加灌水小區供灌面積。

由圖 2(b)可以得出，毛管單向佈置及雙向佈置灌水

小區支管長度均隨著毛管管徑的增大而增加，當毛管管徑由 12mm 增大至 25mm 時，兩種佈置模式下支管長度分別增加了 148.39%和 97.30%。毛管單向佈置灌水小區順坡毛管長度、毛管雙向佈置灌水小區順坡及逆坡毛管長度均隨著毛管管徑的增大而增加，所增加的百分比分別為 184.34%、203.07%和 184.81%，這是由於在毛管管段流量一定的情况下，隨著毛管管徑的增大，單位長度管段所產生的水頭損失較小，根據以往的研究，灌水小區允許水頭差分配給毛管的比列是一定的，因此可以選擇較長的毛管長度。支管長度和毛管長度的共同增加決定了灌水小區供灌面積隨著毛管管徑的增大而增加。對比兩種佈置模式下灌水小區的優化結果，可以發現毛管雙向佈置灌水小區支管長度略大於毛管單向佈置灌水小區，但其順坡毛管長度略小於毛管單向佈置灌水小區。此外，毛管雙向佈置灌水小區順坡及逆坡毛管長度之差值也隨著毛管管徑的增大而增加，進一步分析可以得出支管位置隨著毛管管徑的增大而減小，即支管位置隨著毛管管徑的增大而向逆坡毛管一側移動。

4.2.2 支管管徑對優化結果的影響

以毛管管徑 $D_f=18\text{mm}$ ，灌水器設計流量 $q=2.0\text{ L h}^{-1}$ ，毛管方向地面坡度 $s_f=1/200$ 對不同支管管徑下毛管單向佈置灌水小區、毛管雙向佈置灌水小區進行優化分析。

由圖 3(a)可以得出，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區單位面積年總費用、單位面積年固定費用及單位面積年運行管理費用均隨著支管管徑的增大而稍有增加，但增加的百分比很小，具體為當支管管徑由 40mm 增大至 90mm 時，毛管單向佈置灌水小區單位面積年總費用增加了 2.32%，毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用增加了 0.48%。對灌水小區單位面積年總費用構成進行分析，兩種佈置模式下灌水小區單位面積年總費用的構成基本相當，其中單位面積年固定費用約占 84%，單位面積年運行管理費用約占 16%。兩種佈置模式下灌水小區供灌面積均隨著支管管徑的增大而增加，當支管管徑由 40mm 增大至 90mm 時，毛管單向佈置灌水小區供灌面積增加了 178.74%，毛管雙向佈置灌水小區供灌面積增加了 220.92%。對比兩種佈置模式下的優化結果可以得出，毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用較毛管單向佈置灌水小區降低了 0.64%~2.42%；毛管雙向佈置灌水小區供灌面積較單向佈置灌水小區增大了 29.82%~49.46%。說明減小支管管徑及毛管雙向佈置有利於降低灌水小區單位面積年總費用，增大支管管徑及毛管雙向佈置有利於增加灌水小區供灌面積。

由圖 3(b)可以得出，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區支管長度均隨著支管管徑的增大而增加，當支管管徑由 40mm 增大至 90mm 時，支管長度分別增加了 121.95%和 114.29%。毛管單向佈置灌水小區順坡毛管長度、毛管雙向佈置灌水小區順坡及逆坡毛管長度均隨著支管管徑的增大而增加，增加的百分比分別為 25.59%、42.76%和 58.27%。支管和毛管長度的共同增大決定了灌水小區供灌面積隨支管管徑的增大而增加。對比兩種佈置模式下的優化結果，毛管雙向佈置灌水小區支管長度較單向佈置減小了 14.63%~21.69%，這是由於當支管管徑一定時，毛管雙向佈置時通過支管的流量較大，產生的水頭損失也較大，根據以往的研究^[1]，灌水小區允許水頭差分配給支管的比列是一定的，因此優化過程中應選擇較小的支管長度。在其他條件相同時，不同支管管徑下毛管雙向佈置灌水小區順坡毛管長度均小於毛管單向佈置灌水小區，減小的百分比為 5.16%~16.58%。毛管雙向佈置灌水小區順坡

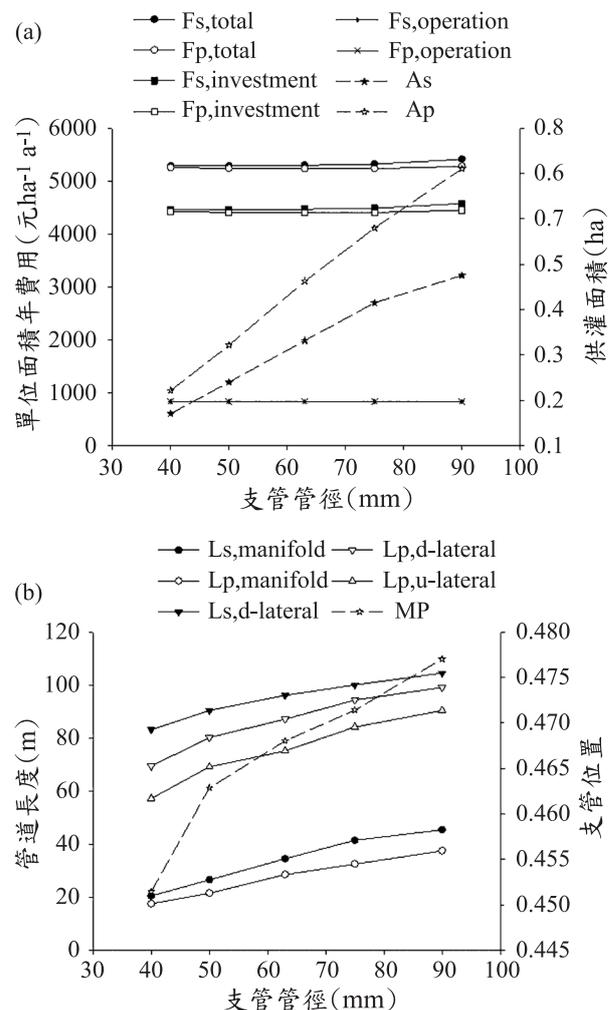


圖 3 支管管徑對灌水小區優化結果的影響

毛管與逆坡毛管長度的差值不隨支管管徑的變化而變化，進一步分析可知，支管位置隨著支管管徑的增大而增大，即支管位置隨著支管管徑的增大向順坡毛管一側移動。

4.2.3 灌水器流量對優化結果的影響

以毛管管徑 $D_I=18\text{mm}$ ，毛管方向地面坡度 $s_I=1/200$ 對不同灌水器流量下毛管單向佈置灌水小區、毛管雙向佈置灌水小區進行優化分析。

由圖 4(a)可以得出，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區單位面積年總費用均隨著灌水器流量的增大而增加，當灌水器流量由 1.6 L h^{-1} 增大至 2.5 L h^{-1} 時，單位面積年總費用增加的百分比分別為 1.39% 和 1.01%。對灌水小區單位面積年總費用的構成進行分析發現，兩種佈置模式下灌水小區的費用構成比例基本相等，單位面積年固定費用所占的比例約為 84%，單位面積年運行管理費用所占的比例約為 16%。兩種佈置模式下

灌水小區的供灌面積均隨著灌水器流量的增大而減小，具體為當灌水器流量由 1.6 L h^{-1} 增大至 2.5 L h^{-1} 時，減小的百分比分別為 61.96% 和 48.68%。對比兩種佈置模式下的優化結果，當灌水器流量由 1.6 L h^{-1} 增大至 2.5 L h^{-1} 時，毛管雙向佈置灌水小區的單位面積年總費用較單向佈置降低了 0.83%~1.20%，毛管雙向佈置灌水小區供灌面積較單向佈置增加了 92.62%~165.14%。說明減小灌水器流量及毛管雙向佈置既有利於降低灌水小區單位面積年總費用，又有利於增加灌水小區供灌面積。

灌水器流量愈小其供灌面積愈大，這是在毛管管徑相同的情況下，灌水器流量愈小，毛管管段流量愈小，產生的水頭損失也較小，根據以往的研究，灌水小區允許水頭差分配給毛管的比例是一定的，因此可以選擇較長的毛管長度；通過分析發現雖然毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區毛管長度增加(灌水器數量增加)，但由於灌水器流量較小，毛管進口流量(即支管節點流量)減小，根據以往的研究，灌水小區允許水頭差分配給支管的比例是一定的，因此優化過程中可以選擇較長的支管長度。支毛管長度均隨灌水器流量的減小而增加，因此灌水器流量愈小其供灌面積愈大。具體為當灌水器流量由 1.6 L h^{-1} 增大至 2.5 L h^{-1} 時，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區支管長度減小的百分比分別為 38.60% 和 25.40%，毛管單向佈置灌水小區順坡毛管長度、毛管雙向佈置灌水小區順坡及逆坡毛管長度減小的百分比分別為 38.04%、31.24% 及 31.16%。對比兩種佈置模式下的優化結果，不同灌水器流量下毛管雙向佈置灌水小區支管長度均大於毛管單向佈置，增加的百分比為 7.55%~34.29%。不同灌水器流量下毛管雙向佈置灌水小區毛管總長度大於毛管單向佈置灌水小區，增加的百分比為 52.07%~81.35%；毛管雙向佈置灌水小區支毛管長度均大於毛管單向佈置灌水小區，因此其供灌面積大於單向佈置，增加的百分比為 92.62%~165.14%。不同灌水器流量下，毛管雙向佈置灌水小區順坡毛管長度均小於單向佈置情況，減小的百分比為 4.31%~5.89%。進一步分析，毛管雙向佈置灌水小區順坡毛管與逆坡毛管長度之差隨著灌水器流量的增加而略有減小，支管位置隨著灌水器流量的增大而向順坡毛管一側移動。

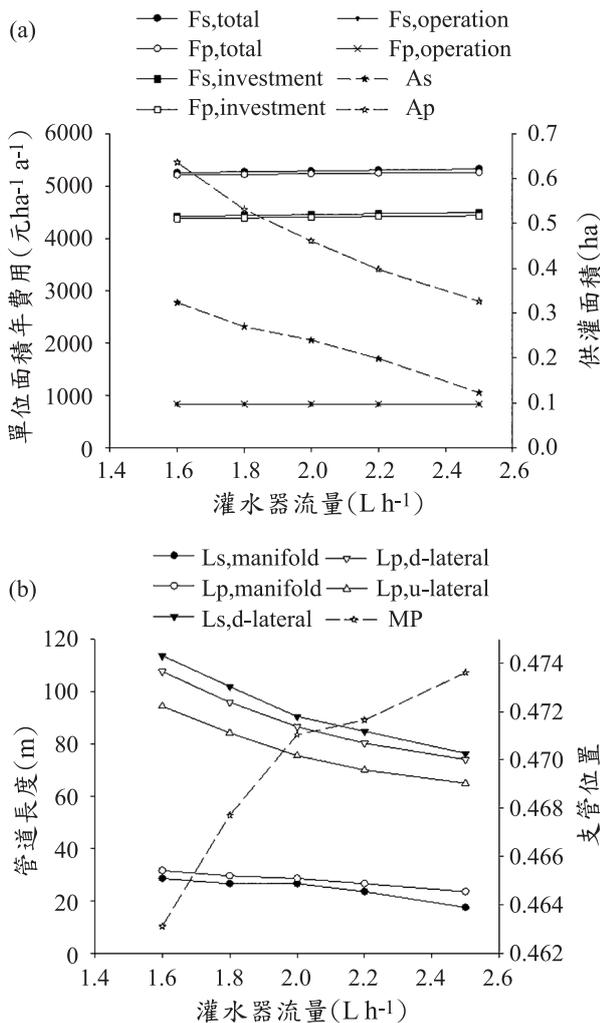


圖 4 灌水器流量對灌水小區優化結果的影響

4.2.4 毛管方向地面坡度對優化結果的影響

以毛管管徑 $D_I=18\text{mm}$ ，灌水器設計流量 $q=2.0\text{ L h}^{-1}$ 對不同毛管方向地面坡度下毛管單向佈置灌水小區、毛管雙向佈置灌水小區進行優化分析。

由圖 5(a)可以得出，毛管單向佈置及雙向佈置灌水

小區單位面積年總費用均不隨毛管方向地面坡度的變化而變化，兩種佈置模式下灌水小區單位面積年總費用中固定費用及運行管理費用的構成比例相等，單位面積年固定費用所占百分比約為 84%，單位面積年運行管理費用所占百分比約為 16%。當毛管方向地面坡度由 0 增加至 1/50 時，毛管單向佈置灌水小區供灌面積隨之增大，增大的百分比為 16.27%；毛管雙向佈置灌水小區的供灌面積不隨毛管方向地面坡度的變化而變化。對比分析兩種佈置模式下灌水小區的優化結果，毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用較單向佈置情況減少了 0.73%~1.12%，毛管雙向佈置灌水小區供灌面積較單向佈置增加了 74.95%~101.77%。說明毛管雙向佈置既有利於降低灌水小區單位面積年總費用，又有利於增加灌水小區供灌面積。

由圖 5(b)可以得出，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區支管長度均不隨毛管方向地面坡度的變化而變

化。對於毛管雙向佈置灌水小區，當毛管方向的地面坡度為 0 時，由於兩側毛管的水力條件相同，故順坡及逆坡毛管長度相等；隨著毛管方向地面坡度的增加，順坡毛管長度增加，逆坡毛管長度減小，當毛管方向地面坡度由 0 增加至 1/50 時，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區順坡毛管長度增加的百分比分別為 11.88%和 19.82%，毛管雙向佈置灌水小區逆坡毛管長度減小的百分比為 25.59%；此外，毛管雙向佈置灌水小區順坡毛管與逆坡毛管長度之和基本為一個定值，不隨毛管方向地面坡度的變化而變化。毛管單向佈置灌水小區支管長度不隨毛管方向地面坡度變化，順坡毛管長度隨著毛管方向地面坡度的增大而增加，因此，可以得出前述毛管單向佈置灌水小區供灌面積隨毛管方向地面坡度增大而增加的結論；毛管雙向佈置灌水小區支管長度、順坡及逆坡毛管總長度均不隨毛管方向地面坡度而變化，因此可以得出前述毛管雙向佈置灌水小區供灌面積不隨毛管方向地面坡度變化而變化的結論。進一步分析發現，毛管雙向佈置灌水小區支管位置隨著毛管方向地面坡度的增大而減小，即隨著毛管方向地面坡度的增大，支管位置向逆坡毛管一側移動。

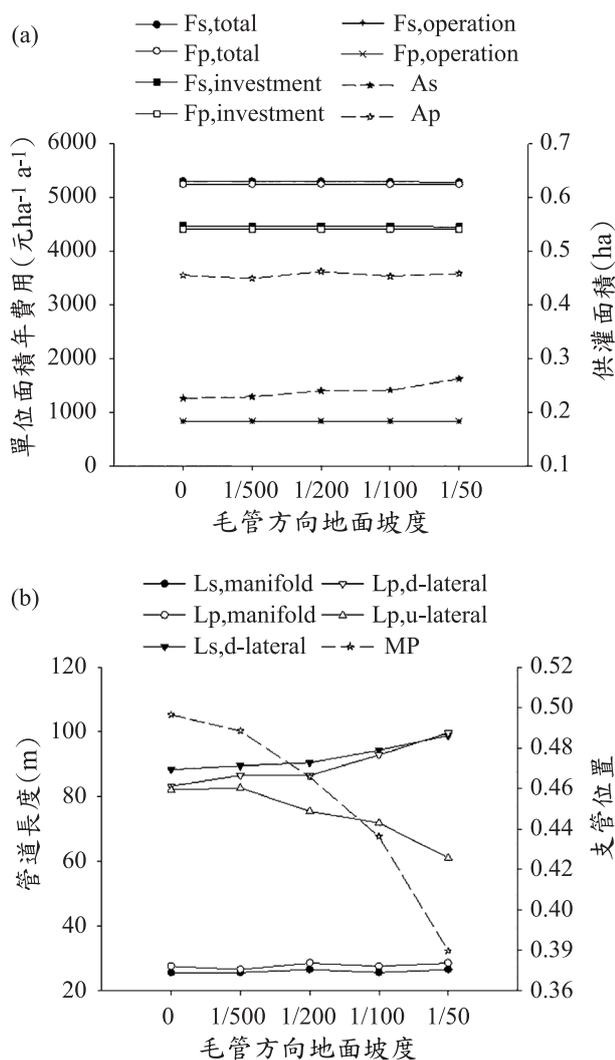


圖 5 毛管方向地面坡度對灌水小區優化結果的影響

4.2.5 灌水小區優化結果對應之灌水均勻係數

毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區優化結果對應之灌水均勻係數見表 4。可見文中所提方法優化之灌水小區在各參數組合下均具有較高的均勻度。

五、結論

- (1) 將微灌灌水小區作為一個整體，以灌水小區單位面積年總費用最低為目標，在不限定灌水小區形狀及面積的情況下，建立了毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區優化設計數學模型，採用罰函數法處理約束條件，採用遺傳算濃進行求解計算，能夠得到灌水小區優化設計方案。
- (2) 分析了不同毛管管徑、支管管徑、灌水器流量及毛管方向地面坡度對兩種佈置模式下灌水小區單位面積年總費用、供灌面積、支毛管長度及毛管雙向佈置灌水小區支管位置之影響。算例結果表明，毛管單向佈置及雙向佈置灌水小區單位面積年總費用隨著毛管管徑、支管管徑、灌水器流量的增大而增加，不隨毛管方向地面坡度的變化而變化。兩種佈置模式下灌水小區供灌面積隨著毛管管徑、支管管徑的增大而增加，隨著灌水器流量的增大而減小；毛管單向佈置灌水小區供灌面積隨著毛管方向

地面坡度的增大而增加，毛管雙向佈置灌水小區供灌面積不隨毛管方向地面坡度的變化而變化。毛管雙向佈置灌水小區支管位置隨毛管管徑及毛管方向地面坡度的增加向逆坡毛管一側移動，隨支管管徑及灌水器流量的增加向順坡毛管一側移動。實際工程中，應儘量採用較小的毛管管徑、支管管徑及灌水器流量以節省工程投資，採用較大的毛管管徑、支管管徑及較小的灌水器流量以增加灌水小區供灌面積。

- (3) 比較了兩種佈置模式下灌水小區的單位面積年總費用及供灌面積，算例結果表明，毛管雙向佈置灌水小區在單位面積年總費用及供灌面積兩方面均優於毛管單向佈置灌水小區，具體而言，毛管雙向佈置灌水小區單位面積年總費用較單向佈置降低了 0.58%~2.42%，供灌面積較單向佈置增大了 29.82%~165.14%，毛管雙向佈置模式在增加灌水小區供灌面積方面的優勢明顯大於在降低灌水小區單位面積年總費用方面的優勢。因此，在實際工程應儘量採用毛管雙向佈置的模式以增大灌水小區供灌面積、減小工程投資。
- (4) 本文所提出的方法適用於各種坡度下規則佈置、不限定形狀及面積的微灌灌水小區之優化設計。

參考文獻

- Baiamonte G., Provenzano G. and Rallo G., "Analytical approach determining the optimal length of paired drip laterals in uniformly sloped fields," *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 141(1), 04014042, 2015.
- Carión F., Montero J., Tarjuelo J. M., et al, "Design of sprinkler irrigation subunit of minimum cost with proper operation. Application at corn crop in Spain," *Water Resources Management*, 28(14), 5073-5089, 2014.
- Jiang S.F. and Kang Y. H., "Simple method for the design of microirrigation paired laterals on sloped fields," *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 136(4), 271-275, 2010.
- Ju X. L., Weckler P. R., Wu P. T., et al, "New simplified approach for hydraulic design of micro-irrigation paired laterals," *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1521-1534, 2015.
- Kang Y. H., Nishiyama S., "Design of microirrigation submain units," *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 122(2), 83-89, 1996.
- Keller J. and Karmeli D., "Trickle Irrigation Design Parameters," *Transactions of the ASAE*, 17(4), 678-684, 1974.
- Monserrat J., Barragan J. and Cots L., "Design of paired laterals on uniformly sloping fields," *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 144(6), 04018008, 2018.
- Singh A., Singh R. P., Mahar P. S., et al, "Optimal design of tapered microirrigation submain manifolds," *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 126(6), 371-374, 2000.
- Valiantzas J. D., "Explicit hydraulic design of microirrigation submain units with tapered manifold and laterals," *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 129(4), 227-236, 2003.
- Wu P. T., Zhu D. L. and Wang J., "Gravity-fed drip irrigation design procedure for a single-manifold subunit," *Irrigation Science*, 28(4), 359-369, 2010.
- Wu I. P. and Gitlin H. M., "Drip Irrigation Lateral Line Network Design," *Transactions of the ASAE*, 25(3), 0675-0685, 1982.
- Zhang L., Wu P. T., Zhu D. L., "Hydraulic design procedure for drip irrigation submain unit based on relative flow difference," *Irrigation Science*, 31(5), 1065-1073, 2013.
- 白丹: 灌溉管網優化設計, 陝西科學技術出版社發行, 1998。
- 白丹: 「微灌田間管網的優化」, 水利學報, 第 28 卷第 1 期, pp. 59-64, 1996。
- 白丹、黨志良: 「不規則微灌田間管網的優化」, 農業機械學報, 第 28 卷第 1 期, pp. 53-57, 1997。
- 蔣樹芳、康躍虎、曲強: 「坡地上灌水器流量均等微灌雙向毛管設計方法」, 農業機械學報, 第 42 卷第 7 期, pp. 82-85, 2011。
- 鞠學良、吳普特、PAUL WR、等: 「基於能坡線法的微灌雙向異徑毛管設計」, 農業機械學報, 第 46 卷第 12 期, pp. 47-54, 2015。
- 雷英傑、張善文: MATLAB 遺傳算法工具箱及其應用, 西安電子科技大學出版社, 2014。
- 李光永、雷廷武、鄭耀泉、等: 「均勻坡定水頭微灌支管的優化」, 北京農業工程大學學報, 第 14 卷第 1 期, pp. 69-74, 1994。
- 王新坤: 「基於遺傳算灑的微灌坡地雙向毛管管徑優化」, 農業機械學報, 第 38 卷第 9 期, pp. 108-111, 2007。
- 王新坤、蔡煥傑: 「微灌坡地雙向毛管最佳支管位置

- 遺傳算灑優化設計」, 農業工程學報, 第 23 卷第 2 期, pp. 31-35, 2007。
22. 王新坤、蔡煥傑: 「微灌毛管水力解析及優化設計的遺傳算灑研究」, 農業機械學報, 第 36 卷第 8 期, pp. 55-58, 2005。
23. 魏秀菊: 「平坦地形時微灌設計單元內允許壓差在支、毛管上的合理分配」, 節水灌溉, 第 3 期, pp. 16-18, 1995。
24. 楊建康、陳學敏: 「微灌系統田間管網允許壓力差的最優分配方法」, 水利學報, 第 6 期, pp. 14-18, 2001。
25. 張國祥: 「微灌雙向有坡毛管情況下支管位置的確定方法」, 農業工程學報, 第 28 卷第 21 期, pp. 98-104, 2012。
26. 張志新: 「均勻坡度情況下微灌系統支、毛管允許壓力差最優分配比」, 節水灌溉, 第 4 期, pp. 2-6, 1993。
27. 朱德蘭、吳普特、李嵐斌、等: 「自壓滴灌支管灌水單元設計方法」, 排灌機械工程學報, 第 28 卷第 1 期, pp. 59-62, 2010。
28. 中華人民共和國住房和城鄉建設部, 中華人民共和國國家質量監督檢驗檢疫總局, GB/T 50485-2009 「微灌工程技術規範」, 北京: 中國計畫出版社, 2009。
29. 中華人民共和國水利部, SL 103-95 「微灌工程技術規範」, 北京: 中國水利水電出版社, 1995。

收稿日期: 民國 108 年 04 月 16 日

修正日期: 民國 108 年 06 月 03 日

接受日期: 民國 108 年 07 月 27 日