

引黄滴灌系统滴头抗堵塞适用性评价研究

于启辉

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年11月4日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月19日

摘要

本文研究引黄滴灌系统滴头抗堵塞适用性评价。黄河的河水因它所有的多泥沙、浑浊现象的特点使得人们在使用黄河水进行灌溉的情况下出现了多种问题。为了研究明确滴头的抗堵塞情况,本文选择的在相同的复合肥3%浓度下浑水滴灌,来试验不同的滴头类型的堵塞情况,并且对实验结果进行总结,从而提出更加适合现实生活中灌区的影响成果。文章采用层次分析法和模糊数学综合评价的方法确定了准则层和指标层的权重和隶属度,在以上基础上建立数学模型对滴头堵塞风险进行综合评价,将两种方式使用在一起就会提高对数据的准确性以及完整性进行。最终得出结论:灌水水质是较为影响引黄滴灌的重要因素,而滴头类型的堵塞风险评价顺序是:压力补偿式 < 内镶片式 < 圆柱式。

关键词

引黄灌溉, 适应用性, 滴头堵塞, 层次分析

Evaluation Study on the Anti-Clogging Applicability of Drippers in the Yellow River Drip Irrigation System

Qihui Yu

College of Geographic Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: November 4, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 19, 2025

Abstract

The research content of this article is the evaluation of anti-clogging applicability of emitters in the Yellow River drip irrigation system. Due to its characteristics of being rich in sediment and turbid, the Yellow River water has caused many problems when people use the Yellow River water for irrigation. In order to study and clarify the anti-clogging situation of drippers, this article chose muddy

water drip irrigation under the same compound fertilizer concentration of 3% to test the clogging situation of different dripper types, and summarized the experimental results, thereby proposing results that are more suitable for irrigation areas in real life. The article uses the analytic hierarchy process and fuzzy mathematics comprehensive evaluation methods to determine the weights and membership degrees of the criterion layer and the indicator layer. Based on the above, a mathematical model is established to comprehensively evaluate the risk of dripper clogging. Using the two methods together will improve the accuracy and completeness of the data. Finally, it was concluded that irrigation water quality is an important factor affecting drip irrigation in Yellow River diversion, and the order of clogging risk evaluation of dripper types is: pressure compensation type < inner insert type < cylindrical type.

Keywords

Yellow River Irrigation, Suitable Plasticity, Drip Emitter Clogging, Analytic Hierarchy Process

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滴头堵塞问题已经成为影响灌区的有效灌溉主要问题之一，挑选出相应灌区的抗堵塞的滴头产品是缓解堵塞问题的关键，在前者的研究中提出滴头流量是表示滴头堵塞的直接参考数据，一般采用 Dra 以及与之相对的系统的 Cu 这两个参数共同确定滴灌系统的滴头堵塞程度和灌水效果。当 Dra 小于 75%，则认为滴头发生堵塞， Dra 越小，则滴头堵塞越严重[1]。并且存在灌区水质一般、灌水均匀性较差、回收成本较高、环境污染严重等一系列问题[2]，在这种情况下，类似于滴头堵塞综合评价的研究过程也随之出现，这种研究主要是针对在滴头堵塞发生之前，在实验的情况下进行预测和评估，会使得研究结果具有实践性，在进行滴头选择的情况下，会有相对的依据性，由于是对堵塞发生之前所进行的研究，但是由于在一般的灌区滴灌的过程中会出现各种因素的影响，所以我们要更加对数据进行完善，来实现最大的效益化，应用进入灌区的合理、科学的使用、选择过程当中去，文章中使用了层次分析法和模糊矩阵数学的综合评价模型，根据数据的分析对固定检验的黄河灌区地带进行综合评价，提出适合不同黄河灌区的滴头滴头类型以及运行管理模式，提高滴灌系统的工作效率以及延长系统的使用寿命。

2. 国内外研究进展

2.1. 滴头堵塞类型以及成因

滴头堵塞最主要的因素就是水质的问题，是最主要、最重要的原因，所以经过水质的特征分析，分析出三种类型分别是物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞[3]。

物理堵塞是引起滴灌系统堵塞的主要原因，是由于水中所含有的无机物或者有机悬浮物以及固体颗粒造成的堵塞。以内镶片式斜齿形迷宫流道灌水器为研究对象，以不同的泥沙颗粒类型进行浑水实验检测，发现不同的泥沙造成灌水器堵塞的情况是不同的，当在一定的范围内如 0.100 mm 时，主要是通过泥沙的沉降以及堆积来影响灌水器的堵塞，当小于 0.038 mm 的时候则是通过小的泥沙颗粒通过聚集而造成的堆积堵塞现象。

化学堵塞是指由于溶于水中的化学物质生成的不溶性沉淀所造成的堵塞[4]，主要是由于化学肥料以及水质沉淀造成的堵塞物，在滴灌施肥后残留在滴灌管道中，有些肥料含有硫酸钙等会发生沉淀的情况

出现从而造成滴头的堵塞，灌水当中的一些无机元素如 Fe、Ca、Mg、Mn 离子等与硫酸盐，磷酸盐，硅酸盐等发生化学反应；如果由于滴灌水属于硬水，碳酸盐含量偏高，长期使用会在滴灌的管道内壁中生成较多的水垢从而使得滴头堵塞，如果滴灌水质越硬，灌水器堵塞的程度更加严重，而且发现主要的沉淀物碳酸钙(我们所常说的水垢)。

生物堵塞主要是指因为水中的藻类，细菌，微生物等进入滴灌系统后生长繁殖，造成了流道的堵塞，当灌水中的杂质的表面与灌水内壁接触，就会形成生物膜，这种生物膜是由于聚集在表面的细菌性微生物组成，细菌的代谢会逐渐地改变灌溉水的理化特性(例如沉淀，形成废物及粘性物质，还有一些局部的 PH 值的变化)[5]。生物的出现也会改变引起滴头的改变，种植作物的根系入侵到滴灌出水孔，作物的根系的向水性以及灌溉的不均匀性，会导致根系向滴灌出水口生长；或者灌溉水中的藻类以及其他生物微生物的成长而引起的堵塞，这种情况是灌水中的藻类等其他生物含量丰富并且在一般的滴灌情况下会结合施肥滴灌，施肥池中避光的设施又不到位也会造成微生物的大量的繁殖，从而使得滴灌内壁被覆盖从而造成堵塞的情况出现。在其他的研究中发现，水源中的微生物含量与灌水器堵塞程度呈显著的正相关关系[6]。

一般的堵塞情况并不仅仅是一方面的堵塞情况而是三种物理，生物，化学共同作用的结果所呈现出来的，在工程开始的时候可以从控制三种因素来影响堵塞的情况。

2.2. 堵塞评价综合方法

滴灌器是滴灌系统的心脏，长久以来各方面的研究都是相对于滴头的抗堵塞问题而存在的，研究员在前人的研究之下也一直在探索着关于更合理、科学的选择方法，周博[7]提出研究生物堵塞的基本情况以及过程方法，通过持续五年通过污水处理厂的滴灌灌水器进行现场以及模拟试验分析生物堵塞发生的特征，得出如何进行滴头抗堵塞能力的快速评估方法，除此之外，也提出通过不同水源组的试验，探索了室内引黄滴灌系统灌水器堵塞的过程及诱发机理。结果表明，灌水器平均相对流量和流量偏差系数均随着系统运行而呈现波动平衡后线性变化的趋势($R^2 > 0.81$)，黄河水质更容易发生堵塞。李云开[8]等提出在滴灌过程中，进行“前排”、“中控”以及“后清”的情况来形成滴头堵塞的控制办法，并且提出了进一步的研究问题，也提出相应的解决方案。

2.3. 抗堵塞策略

滴灌系统工程在设计时要充分考虑到三种要素的影响情况，也要充分考虑到植物的类型、管道类型、水质情况以及其他必要因素所影响，一个整个滴灌系统在灌溉期中会有各种各样的变化[9]，需要经过多重的选择、合理的、正确地进行系统滴灌的运转情况，才可以使得农户的利益呈现最大化，为农业发展造福。

3. 滴头堵塞风险综合评价指标体系建立

滴头堵塞风险综合评价体系的建立要经过以下两个方面：

第一步，建立因素集和方案集，模糊数学方法的综合评价主要涉及 5 个因素：因素集 X，方案集 A，判断集 V，隶属矩阵 R 和权重分配向量 W，该结构由上而下有 3 层，分别是目标层(A)、准则层(V)、因素层(X)。在层次结构中，一切的基础都是存在于研究问题之上，顶层是目标层，只有一个因素需要描述要解决的问题。准则层应以目标层为前提，将总体因素划分为更详细的指标因素[10]。三者的关系相互连接，相互影响。

第二步，结合实际滴灌情况，选取合适的评价指标因子，本篇文章主要的因素是流道结构、滴灌水质特征、滴灌运行管理模式和滴灌环境这四种因素情况，建立包括目标层、准则层和指标层三个层次的

滴灌滴头堵塞风险评价体系。

三个层次的相互影响也体现了它们之间的相关性，基于此上我们可以了解到，每一层次的因素都会对下层次的某些因素起决定性作用，同时又受到上一层次因素的制约。通过各种的实验情况得知，从而形成完整的构成体系。根据实验的内部构成关系，将这类因素转化为层次结构。这种方法需要解决一个明确的问题，但是有些信息具有很强的模糊性，并且有些信息是未知的。将该不完全问题下的一些不确定因素定义为模糊集，构造良好的隶属函数，利用层次分析法的显式权向量完成模糊变换，最后对综合评价结果进行分析[11]。因此，为确保评价的科学性、客观性和准确性，划分为轻度堵塞(1分)、中度堵塞(2分)和重度堵塞(3分)三个等级(见下方表1)。来进行对应的相应评价。

Table 1. Evaluation indicator system and scoring standard for drip irrigation emitter clogging risk

表 1. 滴灌滴头堵塞风险评价指标体系及评分标准

目标层	准则层	指标因子	轻度(1分)	中度(2分)	重度(3分)
滴灌滴头堵塞风险综合评价系数 A	水质特征 B2	流道结构类型 C1	斜齿	弧齿	锯齿
		滴头流道结构 B1	>1.5 mm	0.7~1.5 mm	<0.7 mm
		滴头类型 C3	压力补偿	内镶片式	圆柱
		含沙量 C4	<500 mg/L	500~2000 mg/L	>2000 mg/L
		钙镁离子含量 C5	<150 mg/L	150~300 mg/L	>300 mg/L
		PH 值 C6	5.5~7.0	7.0~8.0	>8.0
		粘滞系数 C7	<1.2 mpa·s	1.2~1.7 mpa·s	>1.7 mpa·s
		肥料浓度 C8	<0.75 g/L	0.75~10.0 g/L	>10.0 g/L
		肥料类型 C9	不施肥、氮肥、复合肥	钾肥	磷肥
	运行管理模式 B3	细菌数 C10	<1.0 × 10 ⁴ No./ml	1.0~5.0 × 10 ⁴ No./ml	>5.0 × 10 ⁴ No./ml
		过滤设备 C11	叠片	网式	砂石
		灌水频率 C12	1/4~1/8 天	>1/8 天	<1/4 天
		冲洗周期 C13	1/1~1/2 周	<1/1 周	>1/2 周、无冲
	滴灌环境 B4	冲洗速度 C14	>0.6 m/s	0.3~0.6 m/s	<0.3 m/s
		灌水压力 C15	10 m	5 m	2 m
		灌溉水温 C16	>25°C	>35°C	<15°C
		空气温度 C17	15°C~35°C	>35°C	<15°C

4. 滴头堵塞风险评价因子权重及模糊矩阵的确定

4.1. 滴头堵塞风险评价因子权重的确定

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法。根据模糊数学的隶属度理论，将综合评价方法将定性评价转化为定量评价，即利用模糊数学对受多种因素制约的事物或对象进行综合评价[12]。它具有结果明确、系统性强的特点。它能较好地解决模糊性和难以量化的问题，适用于各种不确定问题的求解。

首先，基础的层次分析法，第一步进行每一层准则层的权重系数，在其之后的指标因子层也需要测出权重，最后进行全面的综合性评价从而得出结果。第一步建立目标层结构，设 A 是滴头堵塞风险评价各指标因子构成的体系，A 层中又含有 4 个准则层则是 B1、B2、B3、B4 在这四个准则层中又有 17 个相对应的指标因子就是 C1~C17。层次之间的关系是相互寄生的关系，是两两之间相互影响。但是属于同一层因素不存在支配关系(相互独立)，每一层因素不要超过 9 个因素，最下层为指标因子，中间层准则层。

然后第一步构建判断矩阵(如下表 2)。

Table 2. Judgment matrix scaling method
表 2. 判断矩阵标度法

不同的标度	定义内容
1	前者稍微重要
3	前者比较重要
5	前者十分重要
7	前者绝对重要
9	表示上述相邻判断的中间值
2、4、6、8	表示上述相邻判断的中间值
上述数据的倒数	后者比前者的重要程度的倒数

第二步, 进行权重的计算, 构建的判断矩阵 $A: AW = \lambda_{\max} \cdot W$, 计算矩阵 A 的最大特征根 λ_{\max} 和对应的特征向量 W 。具体计算过程如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (1)$$

$$RI = \frac{\lambda'_{\max} - m}{m - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

其中式中 CI 为一致性指标, m 为判断矩阵阶数, RI 为判断矩阵平均随机一致性指标(通过排列组合总结出平均的随机的一致性指标), CI 数值越高, 说明一致性越不理想。 m 值越大, 提示判断一致性相对也就越差, 减小维数 m 值, 并引入修正值 RI , $CR = CI/RI$ 用作一致性的衡量指标[13]。 $CR \leq 1.0$, 判断矩阵一致性是否完全一致。若否, 提示某个权重赋予太高或是太低, 有必要重新比较, 得到另一个判断矩阵。根据最终的应用结果, 计算出各个维数对应的修正值 RI 。一致性指标值如表 3。基本的一致性指标值不会发生变化会有微小的差距但是不会影响结果的发生。

Table 3. Consistency index values
表 3. 一致性指标值

阶数	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26
阶数	7	8	9	10	11	12
RI	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

4.2. 滴头堵塞风险评价因子的模糊矩阵的确定

隶属函数表示滴灌灌水器堵塞评价因子属于某一评价等级的隶属度[14]。不同的实验是有不同的实验结果, 但只要确保使用相同的隶属函数就可以确保实验的一致性。就可以保证模糊概念的统一, 使得整个实验也是有统一的标准化。

设有 m 个评判对象, n 个评判指标, 评判指标标记为 y_{ij} ($i=1,2,\dots, m$; $j=1,2,\dots, n$), 即 y_{ij} 代表第 i 个

方案中的第 j 个评判指标, 常规的特征值矩阵如下图。在得到模糊关系矩阵之后是无法得出最总的评价结果还需要对数据进行以进一步的分析, 目标层(方案层) A 的结果, 需要根据 B 层和 C 层的公共值进行进一步的评估, 才可以得出最终的评价结果。

5. 滴头堵塞风险综合评价

由隶属矩阵 R 和因素权重 W , 得到方案集 A 的综合评价结果, 使得理论的数据结果更加接近于事实的情况我们需要对于 B 中的值进一步数据分析, 最后根据具体的检验结果来最终确定评价的对象和具体标准的设立, 并且依照模糊评价的单因素结果来构建评价矩阵, 再结合已有矩阵和权重, 进行多级的模糊评价, 依照最大隶属度的原则, 来对定级做出最终评定[15]。以 B 层和 C 层的权重乘积来看如何进行综合评价。对于本文进行的滴头堵塞风险综合评价, 首先进行因素集的确定, 本文中的目标层 1 个, 准则层有 4 个, 指标因子有 17 个。其次, 评判集的确定, 评判档位有 3 个, 分为轻度、中度和重度。接下来, 权重集的确定以及权重的计算过程, 根据之前的研究者进行的权重集来计算各指标权重值(判断矩阵、计算各指标权重值、检验一致性)。最后, 进行权重的计算结果以及模糊评价, 模糊综合评价的结果向量等于权重向量与各级指标向量的乘积, 得到最终的结果。

6. 不同滴头类型施肥滴灌堵塞风险评价实例分析

6.1. 灌水概况

在此次实验中选用相同的复合肥 3% 浓度下浑水滴灌滴头堵塞机理研究为例(滴头类型分别为: 压力补偿式 E1、内镶片式 E2、圆柱式 E3), 与建立的轻度、中度、重度的共同建立的综合评价方法进行研究讨论。其具体的数值如见表 4。

Table 4. Statistics indexes of fertilization characteristics on emitter clogging in muddy water drip system

表 4. 浑水施肥滴灌滴头堵塞风险各项检测表

滴头堵塞风险评价模型定量指标													
处理	C2/mm	C4/mg·L ⁻¹	C5/mg·L ⁻¹	C6	C7/ds·m ⁻¹	C8/mpa·s	C9/g·L ⁻¹	C11/No·mL ⁻¹	C15/m·s ⁻¹	C16/m	C17/°C	C18/°C	
E1	0.9	800	39	7.79	0.42	1.15	30.1	24	0	7	25	32	
E2	0.9	800	82	3.21	4.67	1.73	30.1	24	0	7	26	33	
E3	0.9	800	45	7.31	29.02	1.81	30.1	24	0	7	24	31	

滴头堵塞风险评价模型定性指标统计值						
处理	C1	C3	C10	C12	C13	C14
E1	齿形(1分)	压力补偿式(1分)	复合肥(1分)	140 目筛网(2分)	1/1 天(3分)	无(3分)
E2	齿形(1分)	内镶片式(2分)	复合肥(1分)	140 目筛网(2分)	1/1 天(3分)	无(3分)
E3	齿形(1分)	圆柱(3分)	复合肥(1分)	140 目筛网(2分)	1/1 天(3分)	无(3分)

6.2. 权值和矩阵的确定

本实验中影响滴灌滴头堵塞发生的准则层包括: 滴头流道结构、水质特征、运行管理模式以及滴灌环境, 其对比矩阵如下表, 经过一致性检验该指标满足一致性的要求, 可以继续进行综合性的评估。如下表 5~9。

根据计算出准则层的权重来看, 在目标层中灌水质量的权重是 0.678, 在总比重中相对较大, 是影响滴灌系统的重要因素。接下来对不同目标层(B1, B2, B3, B4)所包含的 17 个指标因子层判断矩阵及权重。其具体的数值如见表 6~9。

Table 5. Criteria layer judgment matrix and weight**表 5.** 准则层判断矩阵及权重

准则层	B1	B2	B3	B4	W (权重)
B1	1	1/9	1/3	1/2	0.056
B2	9	1	7	5	0.678
B3	3	1/7	1	3	0.171
B4	2	1/5	1/3	1	0.095

Table 6. Determination matrix and weight of dropper passage structure**表 6.** 滴头流道结构判断矩阵及权重

	B1	C1	C2	C3	W _i
C1		1	1/5	1/7	0.072
C2		5	1	1/3	0.279
C3		7	3	1	0.649

Table 7. Water quality characteristic judgment matrix and weight**表 7.** 水质特征判断矩阵及权重

B2	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	W _i
C4	1	2	1/2	3	1/3	1/4	1/5	0.068
C5	1/2	1	1/3	2	1/4	1/5	1/6	0.045
C6	2	3	1	4	1/2	1/3	1/4	0.104
C7	1/3	1/2	1/4	1	1/5	1/6	1/7	0.031
C8	3	4	2	5	1	1/2	1/3	0.159
C9	4	5	3	6	2	1	1/2	0.240
C10	5	6	4	7	3	2	1	0.354

表 7 中的细菌数 C10 是影响水质特征的重要指标。

Table 8. Operating management mode judgment matrix and its weight**表 8.** 运行管理模式判断矩阵及权重

B3	C11	C12	C13	C14	C15	W _i
C11	1	9	7	5	3	0.516
C12	1/9	1	1/3	1/5	1/7	0.034
C13	1/7	3	1	1/2	1/5	0.068
C14	1/5	5	2	1	1/3	0.118
C15	1/3	7	5	3	1	0.263

表 8 中的过滤设备 C11 是占比较大。

Table 9. Environmental judgment matrix and weight of drip irrigation**表 9.** 滴灌环境判断矩阵及权重

B4	C16	C17	W _i
C16	1	1/9	0.100
C17	9	1	0.900

表 9 中所出现空气温度 C17 占比较重。

根据权重以及实验数据来确定特征向量矩阵的确定, 评价的 3 级标准, 采用隶属函数法对体系中的 17 个指标进行计算如下:

$$R1-17 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 0.8 & 0.8 & 0.8 & 1.5 & 1.1 & 0.7 \\ 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 800 & 800 & 800 & 500 & 1250 & 2000 \\ 38 & 81 & 45 & 150 & 225 & 300 \\ 7.79 & 3.21 & 7.31 & 6 & 7.5 & 8 \\ 0.41 & 4.67 & 29.02 & 0.75 & 1.87 & 3 \\ 1.14 & 1.73 & 1.81 & 1.2 & 1.45 & 1.7 \\ 30.0 & 30.0 & 30.0 & 0.75 & 5 & 10 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 23 & 23 & 23 & 10000 & 30000 & 50000 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.45 & 0.3 \\ 6 & 6 & 6 & 10 & 5 & 2 \\ 25 & 26 & 24 & 25 & 15 & 5 \\ 32 & 33 & 31 & 25 & 35 & 15 \end{bmatrix}$$

特征矩阵中, 1~3 列是不同滴头类型实验方案中的指标特征值, 4~6 列为轻度、中度、重度堵塞风险等级对应的标准值。使用标准化进行计算得到矩阵如下:

$$R1-17 = \begin{bmatrix} 0.333333 & 0.333333 & 0.333333 & 0.333333 & 0.666667 & 1 \\ 0.875 & 0.875 & 0.875 & 0.466667 & 0.636364 & 1 \\ 0.333333 & 0.666667 & 0.666667 & 0.333333 & 0.666667 & 1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.25 & 0.625 & 1 \\ 0.126667 & 0.27 & 0.27 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0.97375 & 0.40125 & 0.91375 & 0.75 & 0.9375 & 1 \\ 0.136667 & 1.556667 & 9.673333 & 0.25 & 0.623333 & 1 \\ 0.670588 & 1.017647 & 1.064706 & 0.705882 & 0.852941 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 0.075 & 0.5 & 1 \\ 0.333333 & 0.333333 & 0.333333 & 0.333333 & 0.666667 & 1 \\ 0.00046 & 0.00046 & 0.00046 & 0.2 & 0.6 & 1 \\ 0.666667 & 0.666667 & 0.666667 & 0.333333 & 0.666667 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.333333 & 0.666667 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.333333 & 0.666667 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.666667 & 1 \\ 0.333333 & 0.333333 & 0.333333 & 0.2 & 0.4 & 1 \\ 0.2 & 0.192308 & 0.208333 & 0.2 & 0.333333 & 1 \\ 0.46875 & 0.454545 & 0.483871 & 0.6 & 0.428571 & 1 \end{bmatrix}$$

6.3. 模糊分析

二级初判结果分析：

在对于准侧层的权重分析，其中灌水特征的权重值最大，说明在四个准侧层中，灌水特征的影响最大，其次是运行管理模式、滴灌环境、流道结构。滴头流道结构中最重要的是滴头类型的选择，这符合本文的主要要求。

滴头堵塞风险的综合评价如下：

$$A = \sum_{i=1}^{17} W_{B_i} B_i = [0.6481 \ 0.6594 \ 0.8554 \ 0.3375 \ 0.6227 \ 1]$$

此数据的后三列为轻度、中度、重度等级所对应的风险系数的标准值，当风险系数小于 0.00~0.3375 的时候定义为轻度堵塞风险，系数的数值存在于 0.3375~0.6227 的范围之内为中度堵塞风险，在 0.6227~1.00 范围之内则为重度堵塞风险情况。按照实验中所得到的数据得出在试验中的三种滴头类型中压力补偿式 E1，内镶片式 E2，圆柱式 E3，堵塞风险排序为：压力补偿式 E1 < 内镶片式 E2 < 圆柱式 E3。从综合的评价结果来看，圆柱式滴灌风险最高，实验中获得的情况是处在 II 级(中度)与 III 级(重度)堵塞之间，并且接近重度堵塞的范围之内，压力补偿式 E1 和内镶片式 E2，在特定的灌水情况之下，更接近 II 级(中度)风险。相比较之下内镶片式 E2 更接近中度的堵塞风险情况。

7. 结论和建议

7.1. 结论

文章将模糊综合评价模型引入滴灌滴头堵塞风险的评价当中，使用了 17 个指标层因子的对比矩阵来进行计算矩阵以及指标权重，通过风险评价标准与实际的灌水情况列出隶属度特征矩阵，使不同的指标因子对滴头堵塞风险进行大小排序，使用这样的方法也可以判断出不同滴头风险距离标准值的远近关系。但是试验的过程仍需要与现实的滴灌情况相结合。在建立的模糊数学的方法下对试验中的实例进行分析，得出压力补偿式、内镶片式、圆柱式的综合指数分别为 0.6481、0.6594 和 0.8553，由此可见，圆柱式的滴头堵塞风险是大于其他 2 种滴头类型的，而其他两种压力式补偿式以及内镶式的滴头堵塞风险的差距不大，尤其是压力补偿式的会相对较小。预测的试验结果表明，在特定的肥料浓度滴灌的情况下，圆柱式的滴头堵塞风险会更大，该预测的结果复合模型科学合理。文中所建立的滴头堵塞风险评价模型还需要进一步的试验来验证，因为在实验的过程中也会有其他未考虑到的指标因素，进而影响实验的发展情况，通过数据的观察，并将实验结果和预测值进行相对应的比较，进行试验和修正，以使实验的数据和结果更加有科学性和合理性。本实验通过对比测试，得出了三种滴头(压力补偿式、内镶片式、圆柱式)的抗堵塞性能排序为：压力补偿式 < 内镶片式 < 圆柱式。这一结果不仅是一个现象描述，其背后蕴含着深刻的流体动力学机理。

7.1.1. 压力补偿式滴头：高剪切与不稳定流场抑制堵塞

压力补偿式滴头之所以表现出最优的抗堵塞性能，核心在于其独特的弹性补偿膜片设计所创造的流体动力学环境。高流速与强剪切力：为实现压力补偿功能，水流必须通过一个极其狭窄的、由膜片调节的缝隙流道(通常宽度在 0.1~0.3 mm)。根据质量守恒定律($Q = A \times V$)，在恒定流量下，流道截面积 A 的急剧减小，必然导致流速 V 的显著增加。极高的局部流速产生了强大的流体剪切力。这种剪切力能够有效地：

1. 冲刷已附着颗粒：对于已经接近流道壁面的颗粒，强大的剪切力会将其“撕扯”下来，随主流带

走，难以稳定附着。

2. 粉碎有机质：对于柔性或絮状的有机堵塞物，高剪切流场可以将其打散、破碎，防止其形成大的团聚体。

湍流效应与压力脉动：狭窄的缝隙流道使得水流雷诺数急剧增大，极易形成强烈的湍流。湍流内部的涡旋和脉动使得水流方向瞬息万变，颗粒物在湍流扩散作用下难以按照稳定轨迹运动，从而极大地抑制了其向壁面沉降的趋势。此外，弹性膜片在工作时的微振动引入了额外的流场不稳定性，进一步扰乱了颗粒的沉降过程。

不利的颗粒沉降环境：从颗粒动力学角度看，在此类流道中，惯性力、湍流扩散力远大于重力，颗粒几乎无法获得足够的静止时间来完成沉降和附着。因此，尽管流道最窄，但其内部的“动态自清洁”效应使其抗堵塞能力最强。

7.1.2. 内镶片式滴头：迷宫流道内的“沉降陷阱”与“冲刷区”

内镶片式滴头的流道为长而曲折的迷宫形式，其堵塞风险介于两者之间，是流道内“有利区域”和“不利区域”共同作用的结果。

低流速区与沉降风险：迷宫流道的总长度较长，截面尺寸相对压力补偿式滴头的缝隙要大。因此，在流道的某些低速区域(如流道拐角、宽截面处)，局部流速会降至较低水平。根据斯托克斯定律，颗粒的沉降速度与流速成反比。在这些低流速区，水流携带颗粒的能力减弱，为颗粒(尤其是密度较大的无机沙粒)提供了沉降和滞留的机会，形成“沉降陷阱”。

二次流与附着促进：在流道的弯折处，离心力会诱导产生垂直于主流方向的二次流(Dean Vortices)。这种二次流虽然在一定程度上增强了混合，但也可能将颗粒输运至主流难以冲刷到的外侧角隅区域，促进了颗粒在这些“死角”的聚集和附着。

高流速区的自清洁作用：幸运的是，迷宫流道设计中也包含了众多突然收缩和扩张的段落。在这些狭窄段落，流速会短暂升高，产生较强的局部剪切力，对上游来的沉积物进行周期性冲刷。这种“沉积-冲刷”的交替过程，使得内镶片式滴头虽然会发生堵塞，但进程相对缓慢，其风险低于圆柱式滴头。

7.1.3. 圆柱式滴头：层流化与稳定的附着环境

圆柱式滴头通常具有相对宽大且短促的流道，这恰恰是其在流体动力学上最易导致堵塞的设计。

整体低流速与层流化倾向：由于其流道截面积最大，根据 $Q = A \times V$ ，在相同流量下，其内部平均流速是三者中最低的。低流速直接导致流体雷诺数较低，流态更容易趋向于层流。在层流中，流体分层运动，互不混合，缺乏湍流那种能将颗粒从壁面卷吸走的脉动力。

剪切力微弱：宽大的流道壁面处的流速梯度小，因此产生的流体剪切力极其微弱。这种微弱的力量不足以克服颗粒与流道壁面之间的范德华力等吸附力。一旦颗粒在布朗运动或重力作用下接触壁面，就很容易稳定附着，并成为后续颗粒聚集的“晶核”。

稳定的压力分布与零流速区：层流状态下，流场稳定，压力分布均匀。在流道的直角、凹槽等结构死角，极易形成近乎静止的“滞止区”或回流区。这些区域是颗粒和微生物膜附着的“理想温床”。有机黏液首先在这些区域附着，进而网罗水中更细小的颗粒，像“滚雪球”一样逐步发展，最终导致流道有效过水面积减小，直至完全堵塞。

综上所述，三种滴头的堵塞风险差异本质上是其内部流体动力学环境对颗粒行为影响的直接体现。

压力补偿式滴头通过创造高剪切、高端流速的极端环境，主动抑制了颗粒的沉降与附着，实现了最佳的动态抗堵塞性能。内镶片式滴头的迷宫流道是一个矛盾体，其低速区提供了沉降可能，而高速收缩区则提供了一定的自清洁能力，整体风险居中。圆柱式滴头则因其低流速、层流化和显著的滞止区，为

颗粒提供了最稳定、最有利的附着与生长环境，因而堵塞风险最高。因此，在选择滴头时，除了考虑成本和均匀性，其内部流道所决定的流体动力学特性及其对堵塞风险的潜在影响，应成为一个重要的科学依据。

7.2. 建议

文章中所采用的滴灌水源代表性有限，关于引黄滴头灌溉堵塞的诱发机制还需要进一步的进行完善。在生活中，黄河的流域面积广阔，在不同的季节时期，其水质也会发生变化，使得引黄灌区的水质、含沙量、矿物组成和水流温度都会受到影响，从而产生差异。在此基础上，还需要对不同的灌水季节中和不同引黄灌水区的滴灌系统进行多次的试验，最终得到适用于不同地区、不同灌水季节、抗堵塞较优的水肥一体化的滴头类型的选择以及滴灌方式。其中各个实验的情况也要结合实际问题进一步进行规划，并且这样更加有利于风险评价的结果产生，使得数据进一步进行完善和改正。

参考文献

- [1] 牛夏, 张彩霞, 张芮. 滴灌系统灌水器结构优化与抗堵性能提升研究进展[J]. 甘肃水利水电技术, 2021, 57(6): 26-29.
- [2] 周博, 李云开, 宋鹏, 许振赐. 引黄滴灌系统灌水器堵塞的动态变化特征及诱发机制研[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Z1): 123-128.
- [3] 牛文全. 浑水特性与水温对滴头抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(03): 39-45.
- [4] 温圣林, 牛文全, 邬梦龙, 张文倩, 李学凯, 杨小坤. 浑水滴灌过程中不同类型滴头堵塞的动态变化特征[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 287-294.
- [5] 李玉刚, 王利霞. 西北干旱区智能滴灌系统投入与运行管理的实践与思考[J]. 农业科技与信息, 2020(3): 84-86.
- [6] 牛玉芬, 滨州市引黄灌区水利经济发展的建议分析[J]. 经济管理文摘, 2021(24): 3-4.
- [7] 周博. 滴灌系统灌水器生物堵塞特性、评估及机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [8] 李云开, 周博, 杨培岭. 滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 103-114.
- [9] 李云开, 杨培岭, 任树梅. 滴灌灌水器流道设计理论研究若干问题的综述[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 145-149.
- [10] 武志广. 肥液对不同迷宫结构滴头抗堵塞性能影响试验研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [11] 李红艳. 基于 AHP 模糊综合评价法的互联网金融风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东财经大学, 2015.
- [12] 梁山. 浅谈自流管道在平原区灌溉系统中的应用[J]. 河北水利, 2015(10): 37, 41.
- [13] 张万荣, 杨岩德. 浅谈温室滴灌系统运行管理[J]. 发展, 2012(9): 119.
- [14] 单美静. 基于 AHP 法的移动支付安全风险评估[J]. 计算机科学, 2015, 42(s2): 368-371.
- [15] 李德生. 基于 AHP (层次分析法)的学生成绩评价与就业竞争力研究体系[J]. 智富时代, 2017(11): 241.