

滴灌用黄河水泥沙分离参数优化

孙步功¹, 吴建民¹, 赵武云¹, 龚俊²

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对滴灌中黄河水泥沙含量高的问题, 根据其基本特征, 研制了适于黄河水泥沙分离的碟式分离机, 选用 FXJ-150-I 型旋流器, 将分离机与旋流器串联进行泥沙分离。通过三因素二次正交旋转回归试验, 考察了底流口直径、旋流入口压力、转鼓转速对溢流颗粒 D_{50} 的影响, 得出 D_{50} 与影响因素的回归模型。结果表明: 底流口直径和旋流入口压力对 D_{50} 的影响极显著 ($P < 0.01$), 转鼓转速对 D_{50} 的影响显著 ($P < 0.05$); 获得较小 D_{50} 的最佳结构和操作参数是底流口直径为 14 mm, 旋流入口压力为 0.06 MPa, 转鼓转速为 3 800 r/min。

关键词: 滴灌; 黄河泥沙; 中位径; 分离机; 旋流器; 优化

中图分类号: S274.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0027-04

农业节水是实现黄土高原地区水资源可持续利用的必要保证。大水漫灌水利用效率平均不足 40%, 一半以上的水资源在灌溉过程中损失, 最终形成有害的裸土蒸发, 导致大面积土地盐碱化, 威胁着农业的可持续发展^[1]。农业采用节水灌溉势在必行, 但黄河泥沙含量大, 容易造成滴灌孔、喷灌喷头、甚至管道的堵塞, 严重影响节水灌溉的推广^[2-7]。黄河泥沙分离的目的是用于农业节水灌溉, 最好采用机械分离。碟式分离机和旋流器是结构简单、成本低的分离设备。将碟式分离机和水力旋流器串联进行黄河泥沙分离, 其参数组合直接影响溢流颗粒 D_{50} 。本文通过试验研究, 探讨了旋流器底流口直径、旋流入口压力及转鼓转速 3 个参数对分离指标 D_{50} 的影响, 优化了参数, 为滴灌用黄河水泥沙分离研究提供了理论依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

黄河在不同的季节和流段, 其泥沙含量及粒配特性有很大差异。黄河从龙羊峡至孟津流经我国地形的第二台阶—黄土高原。该流域在兰州段之前主要为峡谷, 如龙羊峡、李家峡、积石峡和刘家峡等, 而兰州和银川等地为宽谷, 此段黄河泥沙主要来自峡谷地带^[1]。故夏季汛期兰州段黄河水能代表兰州至银川段黄河泥沙含量及粒配特性。试验结果可以在兰州至银川段黄河灌区推广。试验用 2006 年夏季兰州段黄河水泥沙粒配特性如表 1。

表 1 2006 年夏季兰州段黄河泥沙粒配组成

Table 1 The silt composition in Lanzhou's Yellow River in 2006 summer

粒径 Diameter (mm)	含量 Content (%)
<0.007	21.6
0.007-0.01	8.1
0.01-0.025	19.5
0.025-0.05	21.8
0.05-0.10	20.9
0.10-0.25	6.8
0.25-0.5	1.2
0.5-1.0	0.1

1.2 试验设备

碟式分离机采用研制的喷嘴排渣碟式分离机, 其结构如图 1 所示。上下桶体收集从转鼓中分离出来的溢流液、底液。分离机采用立轴皮带传动, 并具有张紧装置, 使立轴处的皮带轮刚性定位在机壳上, 让机壳承受皮带的张力, 解决了皮带张紧力对挠性轴定位的影响。碟片及套管通过分水盘上的扭矩销由立轴带动旋转^[8]。

旋流器选用 FXJ-150-I 型水力旋流器, 其基本结构参数如表 2 所示。

1.3 试验流程

黄河泥沙分离系统如图 2 所示。

将夏季兰州段黄河水加入水箱 12, 经搅拌均匀后经泵 11、流量计 14、压力表 16 进入分离机 18。分离后清液经压力表 1、流量计 2 进入水箱 5, 浊液经压力表 15、流量计 13 进入水箱 12; 水箱 5 中

收稿日期: 2009-12-25

基金项目: 黄土高原丘陵沟壑区保护性耕作技术集成研究与示范(2006BAD15B06); 国家教育部研究基金资助项目(008k-003)

作者简介: 孙步功(1971—), 男, 甘肃通渭人, 副教授, 博士生, 主要从事农业节水技术研究。

* 通讯作者: 吴建民(1958—), 男, 甘肃定西人, 教授, 博导, 主要从事保护性耕作的教学与研究。

的水经搅拌混合均匀后经泵 6、流量计 4、压力表 3 进入旋流器 7,分离后溢流液经压力表 17、流量计 10 进入水箱 12,底流液经压力表 8、流量计 9 进入水箱 12。在进、出料管路上均装有开关阀、流量计和压力表,并有取样口。试验过程随时取样,利用 BT-1500 型离心沉降式粒度分布仪测定溢流液粒度分布并通过粒度分布函数计算中位径。

1.碟片组件 Dishes 2.转鼓组件 Drum 3.桶体 Bucket
4.电动机 Electromotor 5.底座 Base
6.传动系统 Transmission system

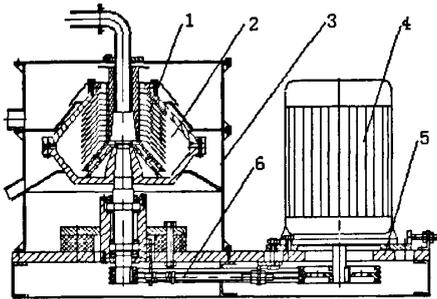


图 1 碟式分离机结构

Fig. 1 Structure diagram of the dish separator

表 2 水力旋流器基本结构参数

Table 2 Structure parameters of the hydrocyclone

结构参数 Structure parameter	取值 Value
内径 Inner diameter (mm)	150
柱体高 Cylinder height (mm)	150
进料口直径 Inlet diameter (mm)	32
溢流管直径 Overflow diameter (mm)	40
锥角 Taper angle (°)	15

1、3、8、15、16、17 压力表 Pressure meter;
2、4、9、10、13、14 流量计 Flowmeter;
5、12 水桶 Bucket; 6、11 泵 Pump;
7 旋流器 Hydrocyclone; 18 分离机 Separator

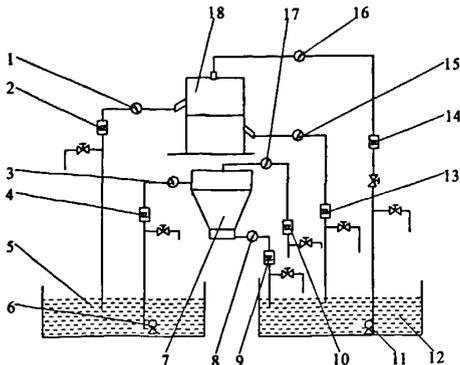


图 2 黄河泥沙分离系统示意图

Fig. 2 Process of separating silt in the Yellow River water

1.4 试验指标及因素

1.4.1 试验指标 悬浮液颗粒粒度分布是悬浮液中不同粒径的颗粒在颗粒总量中所占的百分数。将粒度分布函数等于 50% 所对应的粒径值作为平均粒径,称为中位径,用 D_{50} 表示。在黄河水泥沙分离时,为保证分离效率,应考虑溢流颗粒粒度分布的范围。本试验中,为了计算方便,选取 $10D_{50}(\mu\text{m})$ 作为试验指标^[9]。

1.4.2 试验因素 根据分离机和旋流器基本原理以及预试验结果,选取底流口直径 X_1 、旋流入口压力 X_2 和转鼓转速 X_3 3 个因素作为试验考察因素,以 $10D_{50}$ 为因变量 Y ,采用三因素二次正交回归组合进行试验设计,其因素水平编码见表 3。

表 3 因素水平编码表

Table 3 Factors and coded levels of the experiment

水平 Level	因素 Factors		
	底流口直径 X_1 Underflow diameter (mm)	旋流入口压力 X_2 Inlet pressure (MPa)	转鼓转速 X_3 Drum rotation speed (r/min)
1.682	18	0.060	4000
1	16	0.056	3800
0	14	0.050	3500
-1	12	0.044	3200
-1.682	10	0.040	3000
Δj	2	0.006	300

2 结果及分析

2.1 试验结果

三因素二次正交回归组合试验设计及其结果见表 4。为减少误差,保证试验数据的可靠性,每个处理做 5 次,取其平均值作为该处理的试验指标值^[10]。

2.2 结果方差分析表

对表 4 的试验结果进行方差分析,见表 5。

2.3 模型建立

由试验数据通过 DPS 数据处理软件拟合得到初步回归方程为: $Y = 41.67 - 2.495X_1 + 1.44X_2 + 0.935X_3 - 2.69X_1^2 - 0.185X_2^2 - 0.995X_3^2 + 0.125X_1X_2 + 1.125X_1X_3 + 0.875X_2X_3$ 。如方差分析表 5 所示,当在 $\alpha = 0.10$ 显著水平下,剔除不显著项 X_2^2 和 X_1X_2 后,简化的回归方程为

$$Y = 41.67 - 2.495X_1 + 1.44X_2 + 0.935X_3 - 2.69X_1^2 - 0.995X_3^2 + 1.125X_1X_3 + 0.875X_2X_3。$$

表 5 的 F 检验结果表明 F_2 在 $P < 0.01$ 水平上极显著,说明二次回归方程的回归是显著的。 $F_1 <$

$F_{0.01}(5,8) = 6.63$,说明失拟不显著,回归方程与实际情况拟合较好,试验得出的因子变化与试验结果之间的影响关系真实可靠^[11],拟合所得回归方程科学合理。

表 4 三因素二次正交回归试验设计及结果

Table 4 Design and results of three-factor quadric orthogonal regression composite experiments

编号 Coding	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$(X_1)'$	$(X_2)'$	$(X_3)'$	$Y (\mu\text{m})$
1	1	1	1	1	1	1	1	0.406	0.406	0.406	42.5
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	0.406	0.406	0.406	37.0
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	0.406	0.406	0.406	36.0
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.406	0.406	0.406	34.0
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	0.406	0.406	0.406	46.0
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0.406	0.406	0.406	45.0
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.406	0.406	0.406	40.0
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	0.406	0.406	0.406	42.5
9	1	-1.682	0	0	0	0	0	2.234	-0.594	-0.594	39.0
10	1	1.682	0	0	0	0	0	2.234	-0.594	-0.594	33.0
11	1	0	-1.682	0	0	0	0	-0.594	2.234	-0.594	42.5
12	1	0	1.682	0	0	0	0	-0.594	2.234	-0.594	43.5
13	1	0	0	-1.682	0	0	0	-0.594	-0.594	2.234	39.0
14	1	0	0	1.682	0	0	0	-0.594	-0.594	2.234	42.5
15	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	45.0
16	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	44.5
17	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	43.5
18	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	43.0
19	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	43.0
20	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	44.5
21	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	44.0
22	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	43.5
23	1	0	0	0	0	0	0	-0.594	-0.594	-0.594	45.0
$d_j = \sum x^2$	23.00	13.65	13.65	13.65	8	8	8	15.88	15.88	15.88	
$B_j = \sum xy$	958.50	-34.09	19.68	12.73	1	9	7	-42.735	-2.97	-15.865	
$b_j = B_j/d_j$	41.67	-2.495	1.44	0.935	0.125	1.125	0.875	-2.69	-0.185	-0.995	
$Q_j = b_j B_j$		85.145	28.378	11.867	0.125	10.125	6.125	114.95	0.555	15.785	

表 5 试验结果方差分析表

Table 5 Variance analysis of experimental results

变异来源 Variation source	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Average of square	F 值 F value	显著水平 P Significance
X_1	85.145	1	85.145	51.37	0.00001
X_2	28.378	1	28.378	17.12	0.00185
X_3	11.867	1	11.867	7.16	0.03540
X_1^2	114.950	1	114.950	69.35	0.00000
X_2^2	0.555	1	0.555	0.33	0.60569
X_3^2	15.785	1	15.785	9.52	0.01340
X_1X_2	0.125	1	0.125	0.075	0.80043
X_1X_3	10.125	1	10.125	6.11	0.03702
X_2X_3	6.125	1	6.125	3.69	0.09314
回归 Regression	273.055	9	30.340	$F_2 = 18.31$	0.00012
剩余 Residue	21.530	13	1.657		
失拟 Lack of fit	16.452	5	3.290	$F_1 = 5.18$	0.03250
误差 Error	5.077	8	0.635		
总和 Total	294.585	22			

2.4 因素效应分析

由方差分析可知 X_1 、 X_2 和 X_1^2 在 $P < 0.01$ 水平上极显著, X_3 、 X_3^2 和 X_1X_3 在 $P < 0.05$ 水平上极显著。因此底流口直径、入口压力、转鼓转速以及底流口直径与转鼓转速的交互作用对溢流颗粒 D_{50} 均有显著影响。回归方程的一次项系数表明主因素的效应从大到小依次为 X_1 、 X_2 、 X_3 , 即底流口直径、旋流入口压力、转鼓转速^[11]。

2.5 因素水平的优化组合

堵塞是滴灌应用中最主要的问题,严重时会使整个系统无法正常工作,故应使进入滴灌系统的黄河水 D_{50} 越小越好。由简化后回归方程预测可得,最优水平各个因素组合为 $X_1 = 0$, $X_2 = 1.682$, $X_3 = 1$, 即 $X_1 = 14$ mm, $X_2 = 0.06$ MPa, $X_3 = 3\ 800$ r/min, 此时可获得 D_{50} 最小的分离液。

根据滴灌中对水质颗粒含量及粒径的要求,取因变量 Y 的临界值为 $40\ \mu\text{m}$ 。用统计寻优法对预测结果作频数分析,每个因素取 5 个水平: ± 1.682 、 ± 1 和 0,利用计算机进行方案寻优,得出 $Y < 40$ 的方案有 10 个^[8]。当 3 个因素分别在 $X_1(-0.704 \sim -0.096)$ 、 $X_2(1.202 \sim 1.616)$ 、 $X_3(0.366 \sim 1.243)$, 即底流口直径为 $12.6 \sim 13.8$ mm, 旋流入口压力为 $0.0572 \sim 0.0597$ MPa, 转鼓转速为 $3\ 609.5 \sim 3\ 984.8$ r/min 时,则因变量 Y 有 95% 的可能小于 $40\ \mu\text{m}$ 。结果见表 6。

表 6 因变量 $10\ D_{50} < 40\ \mu\text{m}$ 的 10 个方案中各个因子频率表

Table 6 Factors frequency distributions among the ten designed schemes with predicted values under 40

因素 Factor	加权均数 Average of coefficient	标准误 Standard error	95% 的置信区间 Variation range of 95%	参数设置 Preference
X_1	-0.400	0.154	-0.702 ~ -0.095	12.6 ~ 13.8 mm
X_2	1.407	0.105	1.201 ~ 1.615	0.0572 ~ 0.0597 MPa
X_3	0.803	0.223	0.365 ~ 1.242	3609.5 ~ 3984.8 r/min

3 结论

1) 采用二次正交回归组合设计,进行了黄河水泥沙分离的试验研究,建立了溢流颗粒 D_{50} 同影响因

素之间回归模型,为黄河水泥沙分离提供量化基础条件。其数学模型为 $Y = 41.67 - 2.495X_1 + 1.44X_2 + 0.935X_3 - 2.69X_1^2 - 0.995X_3^2 + 1.125X_1X_3 + 0.875X_2X_3$, 且底流口直径和旋流入口压力对溢流颗粒 D_{50} 的影响最为显著。

2) 通过频数分析得出,即底流口直径为 $12.6 \sim 13.8$ mm, 旋流入口压力为 $0.0572 \sim 0.0597$ MPa, 转鼓转速为 $3\ 609.5 \sim 3\ 984.8$ r/min 时,因变量 $10 \times D_{50}$ 小于 $45\ \mu\text{m}$ 的概率为 95%。

3) 黄河水的高泥沙问题是滴灌技术在沿黄灌区推广应用的“拦路虎”,使不含泥沙或少含泥沙的黄河水进入滴灌系统则是农业滴灌能够在沿黄灌区顺利进行的保证。实践证明,研发的喷嘴排渣碟式分离机与 FXJ-150-I 型水力旋流器串联,可以使黄河水经过该串联设备处理后直接用于滴灌,解决了长期以来黄河水不能直接应用于滴灌的问题,为节水灌溉提供了可靠保证。

参考文献:

- [1] 景可,陈永顺,李凤新.黄河泥沙与环境[M].北京:科学出版社,1993:31—55.
- [2] 石元春,刘昌明,龚元石.节水农业应用基础研究进展[M].北京:中国农业出版社,1995:3—56.
- [3] 王龙昌,马林,赵惠青,等.国内外旱区农作制度研究进展与趋势[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):188—94.
- [4] Svarovsky L. 王梦剑译.固液分离[M].北京:原子能出版社,1982:15—29.
- [5] 王宏,李授农,洪明,等.低压滴灌小孔出流孔前压力变化研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):174—176.
- [6] 牛文全,吴普特,范兴科.低压滴灌系统研究[J].节水灌溉,2005,(2):29—32.
- [7] 吴建民,高焕文.甘肃河西走廊水资源供需分析及耕作节水研究[J].农业工程学报,2006,22(3):36—38.
- [8] 孙步功,龚俊,辛舟.黄河泥沙分离机流量公式推导及试验流量确定[J].甘肃农业大学学报,2004,39(6):710—712.
- [9] 康绍忠,蔡焕杰.河西石羊河流域高效农业节水的途径与对策[J].干旱地区农业研究,1996,14(3):10—17.
- [10] 龚俊,孙步功,辛舟.碟式分离机整机平衡方法及应用[J].兰州理工大学学报,2004,30(6):46—48.
- [11] 孙步功.适于黄河泥沙分离的碟式离心机设计与试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2004.

(英文摘要下转第 63 页)

- 6(3):91—95.
- [15] 李映强,曾觉廷.不同耕作制度下水稻土有机质变化及其团聚作用[J].土壤学报,1991,28(4):4084—4091.
- [16] 李爱宗,张仁陟,王晶.耕作方式对黄绵土水稳定性团聚体形成的影响[J].土壤通报,2008,39(3):481—484.
- [17] 廉晓娟,吕贻忠,刘武仁,等.不同耕作方式对黑土有机质和团聚体的影响[J].天津农业科学,2009,15(1):49—51.
- [18] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J].土壤学报,1997,34(4):3659—3661.

Effects of different tillage on soil aggregates in the arid areas of South Ningxia

YAN Bo¹, JIA Zhi-kuan^{1,2*}, HAN Qing-fang^{1,2}, YANG Bao-ping^{1,2}, NIE Jun-feng^{1,2}

(1. Research center of Agriculture in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Crop Production and Ecology, Chinese Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In this study, three different tillage treatments of conventional tillage(CT), the following year no-tillage-subsoiling(NT→ST) and subsoiling-no-tillage(ST→NT) were conducted on the arid areas of South Ningxia. After 3 years of consistent tillage treatment, using dry sieving and wet sieving methods, the changing of soil aggregates was analyzed and tested. The results showed that the content of >0.25 mm mechanical aggregates in 0~40 cm layers of NT→ST increased by 33.11% and 29.51% and ST→NT increased by 40.51% and 36.91% compared with those of natural soil and CT. The content of >0.25 mm water-stable aggregates of NT→ST in 0~30 cm layers increased by 7.33% compared with that of natural soil, and that in 0~10 cm layers increased by 1.47% compared with CT, but that in 10~40 cm layers had no significant difference compared with CT; Compared with those of natural soil and CT, the content of >0.25 mm water-stable aggregates in 0~10 cm layers of ST→NT increased by 10.75% and 10.12%. The results also show that subsoiling-no-tillage(ST→NT) is more conducive to increase the stability of soil aggregates content.

Keywords: tillage; soil aggregates; the arid areas of South Ningxia

(上接第30页)

Optimization of parameters for separating sediments in the Yellow River water used for drip irrigation

SUN Bu-gong¹, WU Jian-min¹, ZHAO Wu-yun¹, GONG Jun²

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Mechanic and Electronic Engineering, Lanzhou Science and Technology University, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the problem of silt in the Yellow River water for agricultural drip irrigation, a dish separator is designed and manufactured in accordance with the major characteristics of silt in the Yellow River and the FXJ-150-I hydrocyclone is chosen. The separator and hydrocyclone are arranged in series for separating silt of the Yellow River water. Half-content diameter D_{50} was selected as experimental target, with three-factor quadric orthogonal regression composite experimental design, the influences of underflow port diameter, inlet pressure and drum rotation speed were investigated, and a regression equation with high reliability was obtained. The results show that underflow port diameter and inlet pressure have very significant influence on separation efficiency ($P < 0.01$), and drum rotation speed has significant influence ($P < 0.05$). The optimum parameters are 14mm of underflow port diameter, 0.06 MPa of inlet pressure and 3 800 r/min of drum rotation speed.

Keywords: drip irrigation; silt in the Yellow River water; half-content diameter; separator; hydrocyclone; optimization