

硫酸钾肥对静止黄河水泥沙絮凝沉降的影响

李学凯, 牛文全, 张文倩, 王亚琼, 温圣林, 杨小坤

(西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 为探索硫酸钾肥对黄河水泥沙在静止状态下沉降的影响, 以硫酸钾浓度和泥沙粒径为参数, 用移液管法研究了5种硫酸钾浓度和4种粒径范围段(<100 , $50\sim100$, $34\sim50$, $<34\ \mu\text{m}$)黄河泥沙的沉降过程, 探讨不同硫酸钾浓度对细颗粒泥沙沉降絮凝的影响。结果表明: 硫酸钾浓度越大, 含沙量下降越快, 泥沙沉降速度越大, 初始粒径 $<100\ \mu\text{m}$, 当硫酸钾浓度分别为0, 2.86, 7, 14 mmol/L时, 沉降30 min后相对含沙量分别为35.35%, 30.75%, 27.02%, 14.00%, 中值沉速 ω_{50} 分别为1.55, 3.00, 3.91, 4.93 cm/min; 泥沙初始粒径越小, 硫酸钾促进絮凝沉降的作用越明显, $<34\ \mu\text{m}$ 的泥沙受硫酸钾影响最大, 当硫酸钾浓度从0增大到60 mmol/L时, 初始粒径为 $<34\ \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝后的中值沉降速度从1.38 cm/min增加到8.53 cm/min, 增加518.12%, 初始粒径为 $34\sim50\ \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝后的中值沉降速度从6.29 cm/min增加到8.43 cm/min, 增加34.02%, 初始粒径为 $50\sim100\ \mu\text{m}$ 的泥沙中值沉降速度从7.12 cm/min增加到7.59 cm/min, 增加6.60%; 泥沙粒径越小, 硫酸钾浓度越大, 对絮凝后中值粒径的影响越大, 当硫酸钾浓度从0增大到60 mmol/L时, 初始粒径为 $50\sim100\ \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝后中值粒径与硫酸钾浓度之间无明显规律, 不同处理间无显著差异, 硫酸钾基本对该粒径段泥沙絮凝沉降没有影响, 初始粒径为 $34\sim50\ \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝后的中值粒径从38.8 μm 增加到41.0 μm , 增大5.76%, 初始粒径 $<34\ \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝后中值粒径从15.7 μm 增加到21.6 μm , 增大37.82%; 絮凝后沉降泥沙中小粒径颗粒相对含量减少, 大粒径颗粒相对含量增加, 最大粒径变大, 泥沙初始粒径为 $<34\ \mu\text{m}$, 硫酸钾浓度为60 mmol/L处理絮凝后最大粒径为200 μm 。研究成果为解决水肥一体化过程中的滴灌堵塞问题提供了参考。

关键词: 硫酸钾; 静水沉降; 黄河泥沙; 粒径级配

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0140-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.020

Effect of Potassium Sulfate Fertilizer on Flocculation and Sedimentation of Static Yellow River Water

LI Xuekai, NIU Wenquan, ZHANG Wenqian, WANG Yaqiong, WEN Shenglin, YANG Xiaokun

(Key Laboratory of Agricultural soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Water and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: There are many factors affecting the flocculation and sedimentation of fine sediments. The objective of this study was to explore the effect of potassium sulfate fertilizer on the sedimentation of the static Yellow River water. Taking potassium sulfate concentration and sediment particle size as parameters, five potassium sulfate concentrations and four particle size ranges (<100 , $50\sim100$, $34\sim50$, and $<34\ \mu\text{m}$) of Yellow River sediment were studied by pipette method. In the sedimentation process, the effects of different potassium sulfate concentrations on the flocculation of fine sediments were discussed. The results showed that the higher the concentrations of potassium sulfate were, the faster the sediment concentration decreased, the higher the sedimentation velocity was. The initial particle size was $<100\ \mu\text{m}$, and when the concentrations of potassium sulfate were 0, 2.86, 7, 14 mmol/L, the sedimentation time was 30 min, the relative sediment concentrations were 35.35%, 30.75%, 27.02%, 14.00%, and the median sedimentation speed ω_{50} was 1.55, 3.00, 3.91 and 4.93 cm/min, respectively. The smaller the initial sediment particle size was, the more obvious the promotion effect of potassium sulfate on flocculation sedimentation was. The sediment of <34

收稿日期: 2019-02-27

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202); 国家自然科学基金项目(51679205); 宁夏重点研发计划项目(2018BBF02006); 杨凌示范区科技计划项目(2018GY-08)

第一作者: 李学凯(1994—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: 13299110168@163.com

通信作者: 牛文全(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。E-mail: nwwq@vip.sina.com

μm sediment was most affected by potassium sulfate. When the potassium sulfate concentration increased from 0 to 60 mmol/L, the median sedimentation velocity after flocculation with initial particle size $<34\ \mu\text{m}$ increased from 1.38 cm/min to 8.53 cm/min, increased by 518.12%, and the median sedimentation velocity after flocculation with initial particle size of $34\sim50\ \mu\text{m}$ increased from 6.29 cm/min to 8.43 cm/min, with an increase of 34.02%. The median sedimentation velocity of sediment from 50 to $100\ \mu\text{m}$ increased from 7.12 cm/min to 7.59 cm/min, with an increase of 6.60%. The smaller particle size of sediment and the greater concentration of potassium sulfate gave the greater influence on the median particle size after flocculation. When the concentrations of potassium sulfate increased from 0 to 60 mmol/L, there was no obvious rule between the concentrations of potassium sulfate and the median particle size after flocculation of sediment with initial particle size of $50\sim100\ \mu\text{m}$. There was no significant difference between different treatments. Potassium sulfate had no effect on the flocculation settling of sediment with this particle size. After flocculation, the median size of sediment with initial particle size of $34\sim50\ \mu\text{m}$ increased from $38.8\ \mu\text{m}$ to $41.0\ \mu\text{m}$, increasing by 5.76%. After flocculation, the median size of sediment with initial particle size $<34\ \mu\text{m}$ increased from $15.7\ \mu\text{m}$ to $21.6\ \mu\text{m}$, increasing by 37.82%. After flocculation, the relative contents of small and medium-sized particles decreased, the relative contents of large-sized particles increased, and the maximum particle size increased. When the particle size of sediment was $<34\ \mu\text{m}$, the concentration of potassium sulfate was 60 mmol/L, and the maximum particle size after flocculation was $200\ \mu\text{m}$.

Keywords: potassium sulphate; hydrostatic sedimentation; Yellow River sediment; particle size grading

细粒泥沙具有特殊的电化性质,在水中易发生絮凝作用形成絮团^[1]。絮凝沉降的主要影响因素有水中电解质类型和浓度、泥沙粒径、泥沙矿物组成、水体紊动情况等^[2-5]。泥沙絮凝和沉降对泥沙的输移和沉降、灌溉系统的运行、水库及渠系淤积过程、黄河河道和河口变迁过程等具有重要影响^[6-7]。蒋国俊等^[2]研究了海水中常见电解质如 NaCl、MgCl₂ 等对河口细颗粒泥沙絮凝沉降的影响,有关灌溉中常见肥料中含有的电解质对于泥沙颗粒絮凝的影响方面的研究较少。有研究^[2,7]报道,河口或海岸等咸淡交界地区泥沙絮凝是常见现象,在该区域的研究也较多,目前已有大量学者用各种方法研究了长江口和黄河口细颗粒泥沙的絮凝沉降特性。对于黄河流域灌溉区域的研究目前相对较少,以往研究^[8-9]表明,在淡水中细颗粒泥沙也会产生絮凝现象、存在泥沙絮团,中国国土辽阔,江河湖海不同水体中的泥沙矿物组成和粒径大小等条件不尽相同,因此对于黄河水泥沙絮凝沉降以及对灌溉系统影响的研究是非常有必要的。

黄河是高含沙河流,且黏性细颗粒泥沙较多。近年来,宁夏、内蒙等地大面积推广应用黄河水滴灌,但是由于黄河水中泥沙较多且粒径较小,即使经过严格过滤后仍有大量粒径 $<0.01\ \text{mm}$ 的泥沙进入灌溉系统,如河套灌区总干渠多年平均含沙量为 $4.5\ \text{kg}/\text{m}^3$,进入总干渠的泥沙颗粒粒径 $<0.005\ \text{mm}$ 的约占 $1/2$ ^[10],水溶性肥料及液体肥会对黄河水中细粒泥沙絮凝、沉降产生影响,进而影响泥沙在管网中的输移和滴头堵塞,增加过滤设备成本和滴灌带投资费

用^[11-12]。因此,亟待探明水肥一体化滴灌过程中,水溶性肥对黄河水泥沙絮凝和沉降的影响,为进一步制定合理的滴灌系统管理方案提供技术依据。

为此,本文以黄河细颗粒泥沙为研究对象,探讨了硫酸钾对静水泥沙絮凝和沉降的影响,为以后进一步研究钾肥对灌溉系统的影响奠定初步基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 5 月 11 日至 9 月 24 日在中国旱区节水农业研究院水力大厅进行,试验所用泥沙为渭河滩表层淤泥(0—20 cm),将泥沙阴凉风干后过 $0.1\ \text{mm}$ 筛,去除枯枝落叶杂质及粗颗粒泥沙,泥沙级配见图 1。

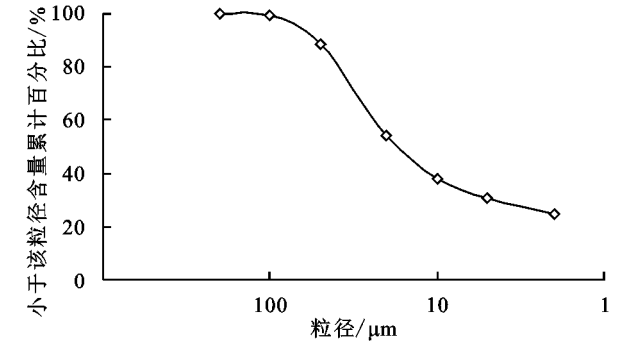


图 1 试验用泥沙颗粒机械组成

将部分泥沙过筛为 3 个粒径段($<34, 34\sim50, 50\sim100\ \mu\text{m}$)。

试验所用硫酸钾肥为广东光华科技股份有限公司生产,形态为无色透明结晶或粉末,易溶于水。

1.2 试验方法

将 51 g 六偏磷酸钠溶于水,稀释定容至 1 L 配成分散剂。用天平称取过筛风干土样 10 g 置于 500 mL 三角瓶中,加入 60 mL 分散剂,再加入 250 mL 蒸馏水配制成泥沙悬液,摇匀后放在电热板上加热至沸腾,并不断用玻璃棒搅拌以防止土粒沉积粘结成块或烧焦,保持悬液微沸 1 h 以得到分散的泥沙颗粒。待分散悬液冷却后,无损倒入沉降筒内(高 30 cm,内径 6.5 cm,容积 1 000 mL 的玻璃量筒),加蒸馏水定容使悬液水面与量筒的 1 000 mL 刻度线齐平,用搅拌器对悬液上下均匀搅拌 1 min,使泥沙均匀分布。停止搅拌后,在固定的深度(液面下 20 cm)位置上按照设置的取样时间(分别为 0,4,8,15,30,60,120,240 min,共 240 min)取 20 mL 悬浊液,在 105 ℃ 下烘干、称重,并计算泥沙浓度,换算为泥沙初始浓度的百分比^[13]。

过 0.1 mm 泥沙沉降试验中,泥沙初始浓度为 10 g/L,试验配置硫酸钾浓度分别为 0,0.14,0.28,0.57,1.14,1.42,2.86,7.00,14.00 mmol/L。取样时间和取样深度如上所述。取样温度控制在(21±1)℃,每次试验重复 3 次。

特定粒径范围泥沙沉降试验中,试验配置硫酸钾浓度分别为 0,5,15,30,60 mmol/L。其余设置与上皆同。取<100,<34,34~50,50~100 μm 4 种初始粒径范围泥沙进行静水沉降试验,配置硫酸钾浓度分别为 0,1,3,5,30,60 mmol/L(分别记做 C₀、C₁、C₃、C₅、C₃₀、C₆₀),静水试验结束后采用 MS 2000 型激光粒度仪(英国马尔文公司)测定沉降后底泥中值粒径。

泥沙沉速是描述泥沙沉积的一个重要物理参数,黏性泥沙常用沉降分析法,计算中值、时间加权平均和重量加权平均^[14]。本文以中值沉速计算法计算泥沙沉降速度^[15],即根据各水深 h 处含沙量为初始含沙量 50% 的沉降历时平均值 $t_{0.5}$ 得到的沉速 ω_{50} ,可表示为:

$$\omega_{50}=h / t_{0.5} \tag{1}$$

式中: h 为取样深度(cm)。

采用 SPSS 软件进行数据处理和统计分析,不同处理间比较采用最小显著性差异法(least-significant difference,LSD)进行检验,各处理间的显著性均为 $p<0.05$ 水平下的比较结果,以 Origin 和 Excel 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 硫酸钾对泥沙絮凝沉降过程的影响

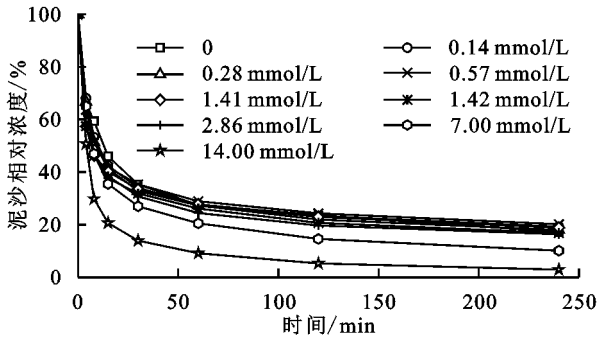
图 2 为硫酸钾浓度对液面下 20 cm 处含沙量变化的影响,沉降前泥沙为过 0.1 mm 筛的渭河泥沙。从图 2 可以看出,沉降过程总趋势是试验的初始阶段含

沙量下降很快,随着时间的增长,含沙量的下降速度越来越小。当硫酸钾浓度分别为 0,2.86,7,14 mmol/L 时,沉降 30 min 后相对含沙量分别为 35.35%,30.75%,27.02%,14.00%,沉降 240 min 后相对含沙量分别为 17.26%,16.39%,10.12%和 2.96%。说明当随着硫酸钾浓度的增加,含沙量的下降速度增加。试验结果表明,在试验泥沙含量下,不同硫酸钾浓度下的平均含沙量变化曲线表现为近似于幂指数关系,对沉降过程的平均含沙量变化曲线进行拟合:

$$\frac{c_t}{c_0}=at^b \tag{2}$$

式中: c_t 为 t 时刻的含沙量(g/L); c_0 为初始含沙量(g/L); a 、 b 为拟合参数,在同一组试验中为常数,与泥沙初始浓度、温度、泥沙级配等有关,其拟合值见表 1; t 为沉降时间(min)。拟合处理的相关系数在 0.96 以上。当 t 趋于无穷大时, c_t/c_0 趋于 0。

当硫酸钾浓度为 0 mmol/L、沉降 14.62 min 时,泥沙相对浓度为 45.47%,此时图 2 中泥沙含量变化曲线的斜率为-1,沉降过程从快速沉降阶段转入缓慢沉降阶段,快速沉降阶段的泥沙含量平均下降速度为 3.73%/min。当硫酸钾浓度不同时,快速沉降阶段的时长 t_c 、快速沉降阶段末的相对含沙量 c_c 和快速沉降阶段泥沙含量平均下降速度 v_c 见表 1。



注:图例中硫酸钾浓度单位为 mmol/L。

图 2 硫酸钾浓度对液面下 20 cm 处含沙量变化的影响

由表 1 可知,随着硫酸钾浓度的提高, a 值总体趋势为先减小再增大, b 值为先增大再减小。当 b 值绝对值越大,沉降曲线越陡,含沙量变化率越大。硫酸钾浓度越高,泥沙中值沉降速度 ω_{50} 越大。如未加入硫酸钾时,中值沉速 ω_{50} 为 1.55 cm/min,当硫酸钾浓度分别 0.57,1.42,7.00,14.00 mmol/L 时,分别为 2.18,3.02,3.91,4.93 cm/min,分别比未加硫酸钾处理增大了 40.64%,94.84%,152.26%和 218.06%。硫酸钾浓度为 0~2.86 mmol/L 时,快速下降阶段的时间 t_c 的变化规律与 a 值的变化趋势完全一致,与 b 值完全相反。快速沉降阶段末的含沙量 c_c 随着硫酸钾浓度的提高而减小,硫酸钾浓度为 7.00,14.00 mmol/L 的 c_c 分别为 35.70%和 21.49%,分别比未加硫酸钾处理减少 21.49%

和 52.74%。 v_c 基本随着硫酸钾浓度的提高而增大, 4.76%/min和 5.50%/min, 分别比未加硫酸钾处理硫酸钾浓度为 7.00, 14.00 mmol/L 时, v_c 分别为 增大 27.61%和 47.45%。

表 1 硫酸钾浓度对沉降曲线参数的影响

硫酸钾浓度/ (mmol · L ⁻¹)	a	b	ω_{50} / (cm · min ⁻¹)	t_c / min	c_c / %	V_c / (% · min ⁻¹)
0	107.72	−0.321	1.55	14.62	45.47	3.73
0.14	104.85	−0.323	1.98	14.33	44.40	3.88
0.28	103.50	−0.329	2.23	14.22	43.17	4.00
0.57	93.59	−0.286	2.18	12.88	45.08	4.26
1.14	82.43	−0.267	3.00	11.48	42.93	4.97
1.42	85.95	−0.296	3.02	12.15	41.03	4.85
2.86	86.32	−0.304	3.00	12.26	40.24	4.87
7.00	95.56	−0.378	3.91	13.50	35.70	4.76
14.00	125.48	−0.664	4.93	14.27	21.49	5.50

对不同硫酸钾浓度下含沙量多重比较分析,结果见表 2。在 10 g/L 泥沙浓度条件下,硫酸钾浓度为 0~0.28 mmol/L 时,不同沉降时间点不同处理的含沙量间无显著性差异,说明此时泥沙沉降受硫酸钾影响较小。当硫酸钾浓度大于 1.14 mmol/L 时,随着硫酸钾浓度的增加,泥沙相对浓度下降的幅度也显著增大,硫酸钾浓度对含沙量的影响显著,这可能是由于硫酸钾对细颗粒泥沙的絮凝促进作用存在一个临界值^[16]。

表 2 硫酸钾浓度对不同沉降时间点相对含沙量的影响 单位: %

硫酸钾浓度/ (mmol · L ⁻¹)	4 min	15 min	60 min	120 min
0	66.18±1.71a	46.00±0.98a	27.51±1.23ab	23.63±0.10a
0.14	68.09±1.05a	42.46±2.02b	27.72±0.96ab	23.33±1.04a
0.28	66.67±1.79a	41.36±1.42bc	27.33±1.67ab	21.97±0.76a
0.57	63.61±2.11b	41.84±0.76b	28.92±1.05a	24.33±0.97a
1.14	57.36±1.06c	40.16±1.89bc	27.74±0.80ab	22.96±1.04a
1.42	57.43±1.19c	37.73±2.08c	26.15±1.31bc	20.70±1.33b
2.86	58.35±0.65c	38.53±0.31c	24.48±0.22c	19.73±0.20b
7.00	55.02±1.16d	35.52±1.24d	20.56±2.31d	14.64±0.58c
14.00	50.74±1.19f	20.69±0.95e	9.16±0.93e	5.32±0.71d

注:表中数据为平均值±标准偏差;同列不同字母表示处理间显著性差异($P<0.05$); $n=3$ 。下同。

2.2 硫酸钾浓度对不同粒径范围泥沙沉降的影响

从图 3 可以看出,未加硫酸钾时,初始粒径为 50~100 μm 的含沙量下降速度大于初始粒径为 34~50 μm 的,初始粒径为 34~50 μm 的下降速度大于初始粒径为 <34 μm 的。当初始粒径分别为 50~100, 34~50, <34 μm 时,沉降 8 min 后相对含沙量分别为 18.54%, 30.66%, 62.56%。沉降 240 min 时,初始粒径为 50~100 μm 的含沙量下降幅度为 88.90%, 初始粒径为 34~50 μm 的下降幅度为 79.60%, 初始粒径为 <34 μm 的下降幅度为 73.60%。说明未加硫酸钾时粒径越大含沙量下降越快,粒径越小含沙量下降越慢。

硫酸钾对不同初始粒径范围含沙量下降速度的影响不同,泥沙粒径越小,影响越大,如硫酸钾对粒径为 <34 μm 的含沙量下降速度影响最大,对于粒径为 50~100 μm 的影响最小,对粒径为 34~50 μm 的影响居

中。当硫酸钾浓度为 60 mmol/L 时,沉降 240 min 后初始粒径为 50~100, <34 μm 的含沙量下降幅度皆为 95%左右,而粒径为 34~50 μm 的为 93%。

对不同粒径和硫酸钾水平的沉降过程的平均含沙量变化曲线按公式(2)进行拟合,拟合结果表 3。由表 3 可知,当初始粒径 <34 μm 时,参数 a 、 b 基本随着硫酸钾浓度的提高而减小;初始粒径为 34~50 μm 时,参数 a 、 b 未呈现明显规律;初始粒径范围为 50~100 μm 时,参数 a 、 b 未呈现明显规律。随着硫酸钾浓度的提高,泥沙中值沉降速度 ω_{50} 不断增加,如当初始粒径 <34 μm 时,未加入硫酸钾的 ω_{50} 为 1.38 cm/min,硫酸钾浓度为 5, 15, 30, 60 mmol/L 的 ω_{50} 分别为 1.49, 5.01, 7.95, 8.53 cm/min, 分别比未加硫酸钾处理增大 7.97%, 263.04%, 476.09%和 518.12%。

当初始粒径 <34 μm 时,快速下降阶段的时长 t_c 随硫酸钾浓度增大而减小,说明随着硫酸钾浓度的增大,

泥沙快速沉降阶段时间缩短,快速沉降和缓慢沉降临界点提前;快速沉降阶段末的含沙量 c_c 随着硫酸钾浓度的提高而减小,硫酸钾浓度为 30,60 mmol/L 的 c_c 分别为 15.78%和 11.78%,分别比未加硫酸钾处理减少了 69.37%和 77.14%;快速沉降阶段含沙量平均下降速度 v_c 随着硫酸钾浓度的提高而增大,硫酸钾浓度为 30,60 mmol/L 时, v_c 分别为 17.42%/min 和 23.57%/min,分别比未加硫酸钾处理增大 27.61%和 47.45%。当初始粒径为 34~50 μm , t_c 无明显规律, c_c 随着硫酸钾浓度的提高而减小,硫酸钾浓度为 30,60 mmol/L 的 c_c 分别为 21.22%和 13.71%,分别比未加硫酸钾处理减少 36.81%和 59.17%, v_c 基本随着硫酸钾浓度的提高而增大。当初始粒径为 50~100 μm , t_c 无明显规律, c_c 随着硫酸钾浓度的提高而减小,硫酸钾浓度为 30,60 mmol/L 的 c_c 分别为 19.42%和 8.48%,分别比未加硫酸钾处理减少 15.97%和 63.31%, v_c 未呈现明显规律。

泥沙颗粒越大快速沉降时间越短,临界点越提前,大量大粒径泥沙在沉降开始后短时间内迅速完成沉降。硫酸钾对不同初始粒径范围的泥沙影响不同,初始粒径越小硫酸钾对 t_c 、 c_c 和 v_c 的影响越大,如初始粒径为 50~100 μm ,上述参数基本不受硫酸钾影响。

对初始粒径<34 μm 、不同硫酸钾浓度下含沙量多重比较结果见表 4。硫酸钾浓度对不同时刻相对泥沙含量的影响显著,添加硫酸钾处理的相对含沙量显著低于未加硫酸钾处理。

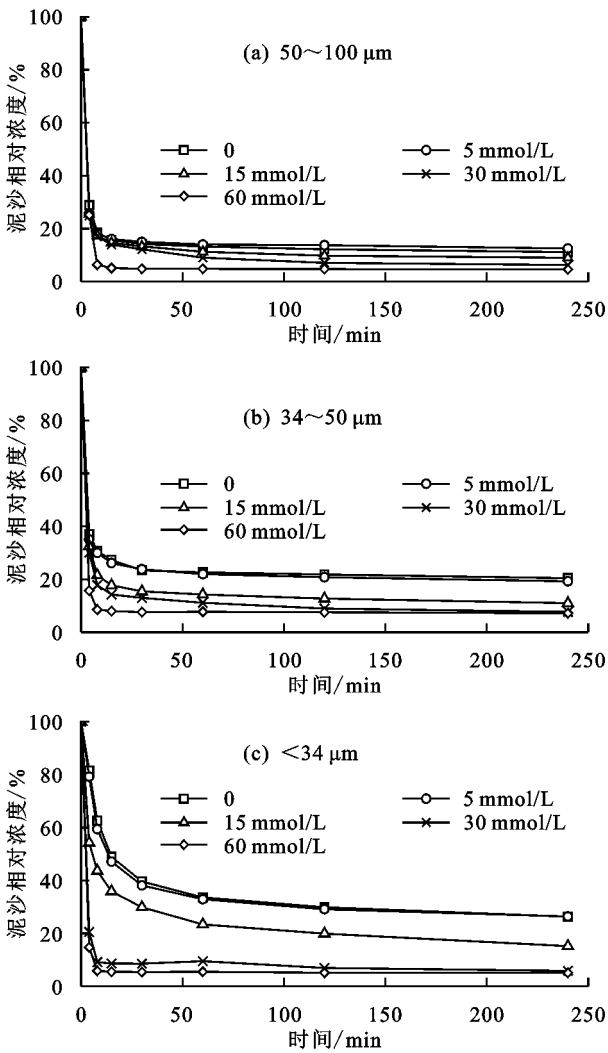


图 3 硫酸钾浓度对不同粒径范围泥沙沉降的影响

表 3 硫酸钾浓度对不同粒径泥沙沉降参数的影响

初始粒径 范围/ μm	硫酸钾浓度/ (mmol $\cdot\text{L}^{-1}$)	a	b	$\omega_{50}/$ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	$t_c/$ min	$c_c/$ %	$v_c/$ ($\%\cdot\text{min}^{-1}$)
<34	0	120.50	-0.308	1.38	15.84	51.52	3.06
	5	114.92	-0.302	1.49	15.25	50.41	3.25
	15	82.34	-0.303	5.01	11.81	38.94	5.17
	30	25.57	-0.306	7.95	4.83	15.78	17.42
	60	17.92	-0.318	8.53	3.74	11.78	23.57
34~50	0	43.19	-0.153	6.29	5.15	33.58	12.89
	5	41.49	-0.151	6.49	4.93	32.59	13.66
	15	43.58	-0.285	6.76	7.10	24.95	10.57
	30	45.20	-0.368	6.99	7.81	21.22	10.09
	60	16.60	-0.195	8.43	2.67	13.71	32.33
50~100	0	36.05	-0.252	7.12	5.83	23.11	13.19
	5	29.17	-0.177	7.43	4.03	22.78	19.14
	15	34.16	-0.275	7.46	5.79	21.09	13.63
	30	39.08	-0.360	7.51	6.98	19.42	11.53
	60	116.56	-1.150	7.59	9.75	8.48	9.38

2.3 硫酸钾浓度对泥沙絮凝后中值粒径的影响

6 种硫酸钾浓度溶液对 3 种不同初始粒径范围泥沙静水沉降试验后的中值粒径影响见图 4。多重比

较结果见表 5。从图 4 可以看出,当初始粒径为 50~100 μm 时,絮凝后中值粒径与硫酸钾浓度之间无明显规律,不同处理间无显著差异,说明硫酸钾基本对该粒径段泥

沙絮凝沉降没有影响。当初始粒径为 34~50 μm 时,絮凝后中值粒径随着硫酸钾浓度的增加而增大,表现为 $C_0 < C_1 < C_3 < C_5 < C_{30} < C_{60}$,添加硫酸钾处理的中值粒径显著高于 C_0 处理,絮凝后的中值粒径从 38.8 μm 增加到 41.0 μm ,增大 5.76%。当初始粒径 $<34 \mu\text{m}$ 时,絮凝后中值粒径随硫酸钾浓度的增加而增大,表现为 $C_0 < C_1 < C_3 < C_5 < C_{30} < C_{60}$,且 C_3 、 C_5 、 C_{30} 、 C_{60} 处理显著大于 C_0 处理。当硫酸钾浓度从 0 增大到 60 mmol/L 时,絮凝后中值粒径从 15.7 μm 增加到 21.6 μm ,增大 37.82%。这说明硫酸钾对粒径 $<34 \mu\text{m}$ 的絮凝作用大于粒径为 34~50 μm 的,对粒径为 50~100 μm 的影响较小,这与硫酸钾浓度对不同粒径范围含沙量影响的结果一致。当初始粒径 $<0.1 \text{ mm}$ 时,随硫酸钾浓度的增加絮凝后中值粒径增加,与 C_0 比, $C_3 \sim C_{60}$ 处理的絮凝后中值粒径显著增大,但 C_3 、 C_{60} 处理间无显著差异。当硫酸钾浓度从 0 增大到 60 mmol/L 时,絮凝后的中值粒径从 18.3 μm 增加到 23.6 μm ,增大 28.94%。

表 4 硫酸钾浓度对粒径 $<34 \mu\text{m}$ 泥沙不同时间点相对含沙量的影响

硫酸钾浓度/ (mmol $\cdot\text{L}^{-1}$)	4 min	30 min	120 min	240 min
0	81.60 $\pm$ 1.06a	39.61 $\pm$ 0.68a	29.87 $\pm$ 0.55a	26.32 $\pm$ 1.80a
5	79.18 $\pm$ 2.00b	38.14 $\pm$ 1.32b	29.11 $\pm$ 0.50b	26.39 $\pm$ 1.33b
15	54.26 $\pm$ 2.71c	29.86 $\pm$ 1.59c	19.94 $\pm$ 0.82c	15.21 $\pm$ 0.97c
30	20.52 $\pm$ 2.08d	8.59 $\pm$ 0.20d	6.95 $\pm$ 0.47d	5.85 $\pm$ 0.25d
60	14.71 $\pm$ 0.51e	5.40 $\pm$ 0.06e	5.15 $\pm$ 0.05e	5.12 $\pm$ 0.10d

表 5 硫酸钾浓度对不同级配泥沙沉降后中值粒径的影响

单位: μm

初始粒径 范围/ μm	0 mmol/L	1 mmol/L	3 mmol/L	5 mmol/L	30 mmol/L	60 mmol/L
0~34	15.7 $\pm$ 0.25dD	16.1 $\pm$ 0.34dD	16.9 $\pm$ 0.08cD	18.1 $\pm$ 0.09bD	21.5 $\pm$ 0.51aD	21.6 $\pm$ 0.28aD
34~50	38.8 $\pm$ 0.04eB	39.2 $\pm$ 0.11dB	39.5 $\pm$ 0.12cB	40.9 $\pm$ 0.07bB	41.0 $\pm$ 0.03abB	41.1 $\pm$ 0.04aB
50~100	48.5 $\pm$ 0.28bA	48.3 $\pm$ 0.16bA	48.4 $\pm$ 0.22bA	48.3 $\pm$ 0.08bA	48.8 $\pm$ 0.11aA	48.7 $\pm$ 0.09aA
0~100	18.3 $\pm$ 0.10cC	17.6 $\pm$ 0.16dC	18.3 $\pm$ 0.01cC	19.2 $\pm$ 0.03bC	23.4 $\pm$ 0.04aC	23.6 $\pm$ 0.01aC

注:表中不同小写字母表示同行处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同列处理间差异显著($P<0.01$)。

3 讨论

絮凝的直接原因是泥沙颗粒之间的碰撞,当悬浮泥沙浓度越大,颗粒间的平均距离越小,碰撞的概率也就越大,絮团量增多,沉速加大,所以随着泥沙浓度增大,絮凝作用也越强烈^[17-18]。此次试验中泥沙浓度设定为 10 g/L,黄河宁夏段下河沿水文站多年平均泥沙含量为 5.79 g/L^[12],实际灌溉过程中,经过沉砂池沉淀和过滤器过滤后的灌溉水泥沙含量多在 1 g/L 以下。但有研究^[19-20]结果表明,在泥沙含量低于 1 g/L 时,细颗粒泥沙也会在电解质作用下发生絮凝作用生成絮团^[19-20]。即使是微弱的絮凝作用也可能

2.4 不同硫酸钾浓度对泥沙粒径级配的影响

初始粒径 $<34 \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝沉降后的泥沙级配随硫酸钾浓度的变化见图 5。与未加硫酸钾处理相比,随着硫酸钾浓度的增加,沉降泥沙中小颗粒相对含量减少,大粒径增加,沉降泥沙的最大粒径变大。如未加入硫酸钾时,粒径 $<5 \mu\text{m}$ 的泥沙相对含量为 29.96%,当硫酸钾浓度分别为 1,3,5,30,60 mmol/L 时,粒径 $<5 \mu\text{m}$ 的泥沙相对含量分别为 27.37%,27.04%,26.43%,19.23%和 18.72%,分别比未加硫酸钾处理减少 8.64%,9.75%,11.78%,35.51%,37.52%。未加入硫酸钾时,粒径 $>20 \mu\text{m}$ 的泥沙相对含量为 39.85%,当硫酸钾浓度分别为 1,3,5,30,60 mmol/L 时,则分别为 40.35%,42.55%,45.61%,54.02%,54.11%,比未加硫酸钾处理增加 1.25%,6.78%,14.45%,35.56%,35.78%。当硫酸钾浓度为 30,60 mmol/L 时,沉降泥沙的最大粒径分别为 100,200 μm ,比初始最大粒径增加 2.94~5.88 倍。

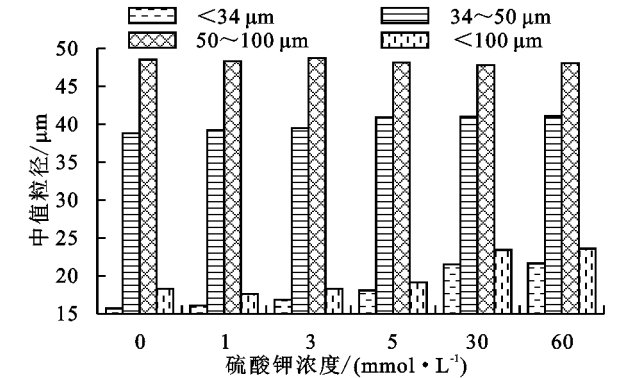


图 4 硫酸钾浓度对絮凝后中值粒径影响

钾肥会促进灌溉系统管道、渠系、灌水器中的细颗粒泥沙沉降(表 4),从而会增加造成系统管道或灌水器堵塞的风险,因此,泥沙在系统管道或灌水器中快速沉降是很不利的。

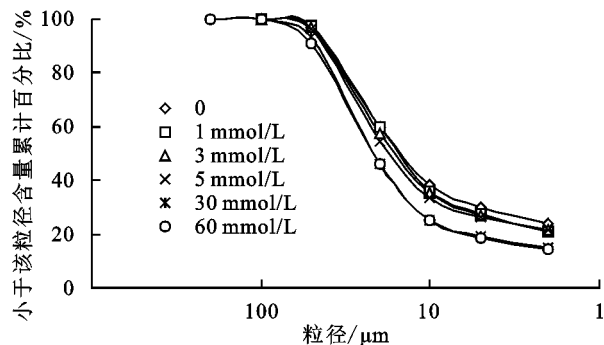


图 5 初始粒径为 $<34 \mu\text{m}$ 泥沙絮凝沉降后级配曲线

当硫酸钾浓度增大,溶液中的阳离子浓度增大,这些正离子与带负电的泥沙颗粒中和,泥沙颗粒表面电位值下降,泥沙颗粒之间双电层斥力减小压缩双电层,颗粒之间的平衡被破坏,颗粒稳定性降低,从而颗粒之间发生凝聚加快泥沙颗粒沉降。张德茹等^[3]、徐志刚^[21]、杨扬等^[22]、钱宁等^[23]通过试验得出絮凝临界粒径为多为 $10\sim 40 \mu\text{m}$ 。即天然泥沙,当粒径 $>40 \mu\text{m}$,絮凝作用就不明显。但本次试验中高浓度硫酸钾对 $34\sim 100 \mu\text{m}$ 粒径的泥沙沉降也显示出一定的促进作用,对 $50\sim 100 \mu\text{m}$ 也有促进作用,主要表现为当硫酸钾浓度为 60 mmol/L 时,中值沉速略有增加,快速沉降阶段末含沙量有一定幅度下降,或快速沉降阶段含沙量平均沉降速度有所增加,但也有学者提出过这种现象,如柴朝辉等^[24]提出,不能以临界粒径作为絮凝的单一标准,因为即使泥沙中值粒径 $>40 \mu\text{m}$ 也会发生絮凝。本试验发现,当初始粒径 $<34 \mu\text{m}$,随着硫酸钾浓度增加,快速沉降阶段时长、快速沉降阶段末含沙量显著降低,快速沉降阶段含沙量平均下降速度增加,因此灌溉中硫酸钾肥主要是对 $<34 \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝沉降起作用,基于黄河水中粒径 $<35 \mu\text{m}$ 的粉细颗粒泥沙较多,应考虑在渠系或者沉砂池输送阶段进行一定处理以使泥沙浓度和粒径减到最小。

本试验发现,当硫酸钾浓度为 $14, 30 \text{ mmol/L}$ 时,沉降 10 min 左右的浑水含沙量分别下降 73% 和 $80\%\sim 87\%$,此时大部分泥沙颗粒皆已完成沉降,当硫酸钾浓度 $>30 \text{ mmol/L}$ 时,硫酸钾浓度对含沙量的下降促进作用不随硫酸钾浓度的增加呈明显增加趋势,硫酸钾浓度对絮凝后中值粒径的促进作用不随硫酸钾浓度的增加呈明显增加趋势。因此,对于水流从施肥器处至滴头出口大概 10 min 的黄河水灌区,对浑水中泥沙产生重要影响的硫酸钾浓度范围为 $14\sim 30 \text{ mmol/L}$ 。

4 结论

(1)硫酸钾对泥沙浓度的下降具有促进作用,即硫酸钾促进细颗粒泥沙絮凝沉降。当初始粒径 $<100 \mu\text{m}$ 时,硫酸钾浓度为 14 mmol/L 的泥沙中值沉降速度与未加入硫酸钾时沉速相比增大 218% 。当粒径 $<34 \mu\text{m}$ 时,硫酸钾浓度为 60 mmol/L 的泥沙中值沉降速度为 8.53 cm/min ,比未加硫酸钾处理增大 518.12% 。

(2)初始泥沙颗粒越细,沉降后泥沙粒径变化受硫酸钾的影响越大。当硫酸钾浓度从 0 增大到 60 mmol/L 时,絮凝前初始粒径为 $34\sim 50 \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝后中值粒径从 0.0388 mm 增加到 0.0410 mm ,增大 5.76% ,初始粒径 $<34 \mu\text{m}$ 的泥沙中值粒径从 0.0157 mm 增加到 0.0216 mm ,增大 37.82% 。

(3)硫酸钾可以显著影响沉降后的泥沙级配,硫酸钾促进细颗粒泥沙相对含量减少,粗颗粒泥沙增加,沉降泥沙的最大粒径变大。硫酸钾浓度为 60 mmol/L 时,沉降后,初始粒径 $<34 \mu\text{m}$ 处理的 $<5 \mu\text{m}$ 泥沙相对含量比未加硫酸钾处理减少 37.52% , $>20 \mu\text{m}$ 泥沙相对含量增加 35.78% ;初始粒径 $<34 \mu\text{m}$ 的泥沙絮凝后最大颗粒粒径可以达到 $200 \mu\text{m}$,比絮凝前的最大粒径增大 5.88 倍。

参考文献:

- [1] 王保栋.河口细颗粒泥沙的絮凝作用[J].黄渤海海洋, 1994,12(1):71-76.
- [2] 蒋国俊,张志忠.长江口阳离子浓度与细颗粒泥沙絮凝沉积[J].海洋学报,1995,17(1):76-82.
- [3] 张德茹,梁志勇.不均匀细颗粒泥沙粒径对絮凝的影响试验研究[J].水利水运科学研究,1994(1):11-17.
- [4] 李芳,金鹰,刘曙光.高岭土颗粒的絮凝沉降试验研究[J].上海国土资源,2007,28(4):37-40.
- [5] 阮文杰.细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析[J].海洋科学, 1991(5):46-49.
- [6] 陈洪松,邵明安.细颗粒泥沙的絮凝沉降特性[J].土壤通报,2002,33(5):356-359.
- [7] 冯曦,周晶晶,金鹰.黄河口细颗粒泥沙基本特性实验研究[C]//中国海洋学会,第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集,南京,2009:1075-1079.
- [8] Winterwerp J C. Fine sediment dynamics in the marine environment[J].Elsevierence,2002,57:1200-1201.
- [9] Krishnappan B G. In situ size distribution of suspended particles in the Fraser River[J].Journal of Hydraulic Engineering,2001,126(8):561-569.
- [10] 于健,杨金忠,徐冰,等.内蒙古河套灌区三种水源形式滴灌发展潜力[J].中国水利,2015(19):50-53.
- [11] 侯峰,刘学军,周立华.宁夏滴灌技术应用调查与发展对策[J].人民黄河,2013,35(2):75-77.

yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J].Field Crops Research, 2017,205:106-115.

[13] 吴得峰,姜继韶,孙棋棋,等.减量施氮对雨养区春玉米产量和环境效应的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1202-1209.

[14] 郭胜利,党廷辉,郝明德.施肥对半干旱地区小麦产量、 NO_3^- -N 累积和水分平衡的影响[J].中国农业科学,2005,38(4):754-760.

[15] 李军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J].作物学报,2002,28(4):555-560.

[16] Lu Y L, Kang T T, GAO J B, et al. Reducing nitrogen fertilization of intensive kiwifruit orchards decreases nitrate accumulation in soil without compromising crop production[J].Journal of Integrative Agriculture, 2018,17(6):1421-1431.

[17] 董强,吴得峰,党廷辉,等.黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):856-863.

[18] 李恩尧,邱亚群,彭佩钦,等.洞庭湖红壤坡地减氮控磷对玉米产量和径流氮磷的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):32-35.

[19] 李伟,李絮花,李海燕,等.控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J].作物学报,2012,38(4):699-706.

[20] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响[J].农业资源与环境学报,2017,34(2):153-160.

[21] 茹淑华,张国印,耿暖,等.不同施肥措施对夏玉米产量和土壤硝态氮淋失的影响[J].河北农业科学,2012,16(2):46-50.

[22] 邵国庆,李增嘉,宁堂原,等.灌溉和尿素类型对玉米水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(3):58-63.

[23] 吴得峰,崔全红,王军尚.黄土旱塬施氮模式对春玉米产量和水肥利用效率的影响[J].西部大开发(土地开发工程研究),2017,2(11):47-54.

[24] 易镇邪,王璞,刘明,等.不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表观盈亏[J].水土保持学报,2006,20(1):63-67.

[25] 巨晓棠,张福锁.中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J].生态环境,2003,12(1):24-28.

[26] Guo Y J, Li B W, Di H J, et al. Effects of dicyandiamide (DCD) on nitrate leaching, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide in a greenhouse vegetable production system in northern China[J].Soil Science and Plant Nutrition,2012,58(5):647-658.

[27] 谷佳林,边秀举,刘梦星,等.不同缓控释氮肥对高羊茅草坪生长及硝态氮土壤残留与淋失的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):173-177.

(上接第 146 页)

[12] 张万宝,李聪敏,曹峰.黄河水滴灌工程泥沙处理效果评估[J].农业工程,2015,5(4):107-109.

[13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:科学技术出版社,1978:474-490.

[14] 黄建维.粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J].泥沙研究,1981(2):30-41.

[15] 陈洪松,邵明安.NaCl 对细颗粒泥沙静水絮凝沉降动力学模式的影响[J].水利学报,2002,33(8):63-67.

[16] 陈洪松,邵明安,李占斌.NaCl 对细颗粒泥沙静水絮凝沉降影响初探[J].土壤学报,2001,38(1):131-134.

[17] 蒋国俊,姚炎明,唐子文.长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析[J].海洋学报,2002,24(4):51-57.

[18] 金鹰,王义刚,李宇.长江口粘性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(3):61-63.

[19] 关许为,陈英祖.长江口泥沙絮凝静水沉降动力学模式的试验研究[J].海洋工程,1995(1):46-50.

[20] 王党伟,吉祖稳,邓安军,等.絮凝对三峡水库泥沙沉降的影响[J].水利学报,2016,47(11):1389-1396.

[21] 徐志刚.长江口细颗粒泥沙的絮凝特性试验[J].海洋学研究,1984(3):49-54.

[22] 杨扬,庞重光,金鹰,等.长江口北槽黏性细颗粒泥沙特性的试验研究[J].海洋科学,2010,34(1):12-24.

[23] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.

[24] 柴朝晖,李昊洁,王茜,等.黏性泥沙絮凝研究进展[J].长江科学院院报,2016(2):1-9.