正交试验法在河道底泥脱水调理剂筛选试验中的应用

王茜徽,王 慧*,翟晓峰,李化山,桂 丕　(深圳市铁汉生态环境股份有限公司,广东深圳 518000)

摘要　[目的]筛选具有良好底泥脱水效果的脱水调理剂。[方法]设置了对照(不添加调理剂)和配方Ⅰ、配方Ⅱ2个试验组,其中试验组以底泥比阻为试验指标,以药剂成分为因素、药剂用量为水平,设计正交试验,筛选各配方的最佳组合。[结果]配方Ⅰ的最优配比为活性炭0.034 0 g,粉煤灰0.085 0 g,生石灰粉0.034 0 g,聚合氯化铝铁0.169 8 g,比阻为2.12×10^9 m/kg;配方Ⅱ的最优配比为铁粉0.014 8 g,硫代硫酸钠0.040 0 g,甲壳素0.012 5 g,柠檬酸0.014 8 g,比阻为53.70×10^9 m/kg。[结论]正交试验法在底泥脱水领域具有一定的应用性,不仅可以快速有效地筛选出脱水效果好的药剂,也对脱水调理药剂的配比起到优化作用,对实际生产起到重要作用。

关键词　正交试验法;底泥;脱水;比阻
中图分类号　S181　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　0517 -6611(2016)32 -0067 -04

Application of Orthogonal Test in Dewatering Conditioners Screening Test for Sediment Sludge

WANG Xi-zheng, WANG Hui*, ZHAI Xiao-feng et al　(Shenzhen Techand Ecology & Environment Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000)

Abstract　[Objective] The aim was to select dewatering conditioners efficiently. [Method] A control group(without conditioner) and two experimental groups(formula Ⅰ and formula Ⅱ) were included in this study. The experimental groups were orthogonal tests, with specific resistance of sludge (SRF) as the index, conditioner compositions as factors and dosages as levels. [Result] The optimal proportion in formula Ⅰ was: activated carbon powder 0.034 0 g, fly ash 0.085 0 g, quicklime powder 0.034 0 g, polymeric aluminum ferric chloride 0.169 8 g, SRF 2.12×10^9 m/kg; the optimal proportion in formula Ⅱ was: iron powder 0.014 8 g, sodium hyposulfite 0.040 0 g, chitin citric acid 0.014 8 g, SRF 5.37×10^{10} m/kg. [Conclusion] Orthogonal test can be used in sediment dewatering field, not only to select dewatering conditioners with good effect rapidly and effectively, but also to optimize the proportions of conditioners, which is vital to practical production.

Key words　Orthogonal test; Sediment sludge; Dewatering; SRF

随着国民生活水平的提高,环境污染问题受到广泛关注,从最初可见的水污染、空气污染到一些潜在的环境污染,河道底泥淤积所造成的内源污染也成为备受关注的污染类型之一。底泥的生物毒性已被证实,如乐安江20~195 km段沉积物均显示出毒性[1]。底泥对水体富营养化也有很大影响,如云南滇池中80%的氮和90%的磷都分布在底泥中[2]。因此,河道底泥的治理是削减水体污染的有效途径之一。目前,治理河道底泥的方法有原位处理和异位处理2种。原位处理方法包括原位物理、化学和生物控制法[3-6],具有占地面积小、工艺流程简单等优点,但同时存在所需周期长、易引入二次污染和增加底泥量等问题;异位处理法虽然工艺复杂,所需成本较高,但不易造成二次污染,且对于急需清淤的河道效果明显,因此作为常见的河道底泥处理方法。河道底泥异位处理是在底泥疏浚的基础上,对底泥进行淋洗、固化稳定化、焚烧、浓缩和脱水干化等处理[7-9]。我国每年因港口建设、维护及河湖治理产生了大量的疏浚底泥[10],为防止疏浚底泥堆积产生二次污染,缩短减量化时间,底泥普遍采用“添加脱水调理剂+机械脱水”的处理方法。该方法也是快速实现底泥减量化及后续资源化利用的一项实用技术[11],其核心是调理剂的种类、配比及机械脱水参数[12-16]。然而,现有的脱水调理剂种类繁多[17],效果不同,成分配比不明确,导致脱水调理剂的成分确定工作难度大、负荷重。为快速准确地确定脱水调理剂的配方,常采用正交试验法。笔者运用正交试验法筛选河道底泥脱水调理药剂及其最佳配比,旨在为今后配制新的底泥脱水调理剂提供技术依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料　试验对象:采自深圳某河工业区及其宿舍区附近底泥,该底泥黑臭,且带有较多细颗粒泥砂。试验配制泥浆的稀释用水与底泥取自同一区域,为所采底泥的上覆河水,pH为6.5~7.5,呈灰绿色,有臭味。

调理剂成分:活性炭粉末、粉煤灰、生石灰粉、聚合氯化铝铁、铁粉、硫代硫酸钠、甲壳素、柠檬酸、硫酸铝、硫酸钙、碳酸钠、水泥粉和铁氧体。

仪器设备:六联搅拌器(同步数显)、真空泵(1 L)、真空表、布氏漏斗(1 mL、10 cm)、具塞计量筒(250 mL)及一些基本试验器材等。

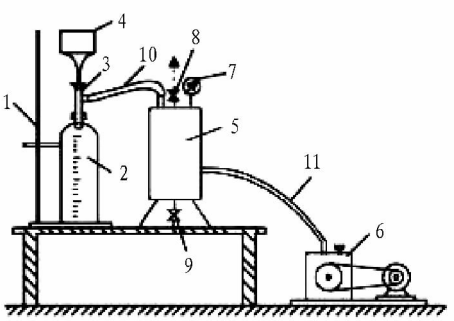
1.2　试验设计　设空白组、配方Ⅰ和配方Ⅱ3个处理。空白组:不向泥浆中添加任何调理剂;配方Ⅰ:在泥浆中添加活性炭粉末、粉煤灰、生石灰粉、聚合氯化铝铁;配方Ⅱ:在泥浆中添加铁粉、硫代硫酸钠、甲壳素、柠檬酸、硫酸铝、硫酸钙、碳酸钠、水泥粉和铁氧体。其中,配方Ⅱ的后5种成分均有确定配比,而配方Ⅰ和配方Ⅱ的前4种只有配比范围,需要通过正交试验确定具体的配比参数。该试验以加药后的底泥比阻作为底泥脱水性能的指标。试验装置如图1所示。

在获取的调理剂成分范围内,通过设计正交试验,以成分种类为因素,成分含量为水平,优化2种调理剂的成分配比。配方Ⅰ和配方Ⅱ均有4种成分作为因素,3个设定的加药量作为水平,因素与水平见表1、2。

1.3　操作方法　以环保绞吸船疏浚的泥浆平均含水率95%为初始含水率。通过测定底泥样品含水率计算加水量,将采

基金项目　铁汉生态研究院建设项目(2014B090903015);铁汉生态院士工作站建设项目(2015B090904008)。
作者简介　王茜徽(1990-),女,四川南充人,工程师,硕士,从事污泥脱水干化及资源化、土壤修复与改良研究。*通讯作者,硕士,从事污泥脱水干化及资源化研究。
收稿日期　2016-09-07

集的河水按计算量加入底泥中,配制成含水率为95%的初始泥浆。取配制的初始泥浆100 mL于250 mL烧杯中,分别按不同种类调理剂的加药步骤及加药量进行调理。设定快速搅拌速度为300 r/min,慢速搅拌速度为100 r/min,并用配制好的初始底泥做空白处理进行对比试验。各处理调理方案:空白:配制含水率为95%的初始泥浆→快速搅拌1 min→慢速搅拌5 min;调理剂Ⅰ:泥浆配制→活性炭、粉煤灰和生石灰添加→慢速搅拌3 min→聚合氯化铝铁→快速搅拌1 min→慢速搅拌5 min;调理剂Ⅱ:泥浆配制→调理剂添加→快速搅拌1 min→慢速搅拌5 min。



注:1. 固定铁架;2. 计量筒;3. 抽气接管;4. 布氏漏斗;5. 吸滤筒;6. 真空泵;7. 真空表;8. 调节阀;9. 放空阀;10. 硬塑料管;11. 硬橡皮管。

Note:1. Fixed brand; 2. Hopper; 3. Suction nozzle; 4. Buchner funnel; 5. Suction filter cartridge; 6. Vacuum pump; 7. Vacuum gauge; 8. Control valve; 9. Air release valve; 10. Hard plastic tube; 11. Hard rubber tube.

图1 比阻测定装置

Fig. 1 The device of testing specific resistance

表1 配方Ⅰ因素与水平

Table 1 Factors and levels of formula Ⅰ g

水平 Level	活性炭粉 Activated carbon powder(A)	粉煤灰 Fly ash(B)	生石灰粉 Quicklime powder(C)	聚合氯化铝铁 Polymeric aluminum ferric chloride(D)
1	0.034 0	0.085 0	0.034 0	0.017 0
2	0.101 8	0.254 8	0.101 8	0.051 0
3	0.339 5	0.848 8	0.339 5	0.169 8

表2 配方Ⅱ因素与水平

Table 2 Factors and levels of formula Ⅱ g

水平 Level	铁粉 Iron powder(E)	硫代硫酸钠 Sodium hyposulfite(F)	甲壳素 Chitin(G)	柠檬酸 Citric acid(H)
1	0.025 3	0.025 3	0.012 5	0.025 3
2	0.040 0	0.040 0	0.020 0	0.040 0
3	0.014 8	0.014 8	0.003 0	0.014 8

2 结果与分析

2.1 配方Ⅰ的正交试验结果 由表3可知,配方Ⅰ各成分的比阻极差不同,其中生石灰粉和聚合氯化铝均较粉煤灰和活性炭粉的比阻极差大,说明生石灰粉和聚合氯化铝在调理剂的脱水中所起的作用相对较大。原因与各成分的化学结构和化学性质有关,即活性炭粉和粉煤灰的主要作用是充当调理过程的骨架,而生石灰粉不仅可以提高颗粒密度,还可以调节底泥环境的酸碱度,聚合氯化铝铁作为一种无机高分子化合物,可以在调解过程中发挥网捕、卷扫的作用,促使底泥中胶粒脱稳,将细小松散的污泥微粒聚集成密集的大颗粒,经重力作用沉降后,污泥颗粒间隙中的游离水和间隙水得以从污泥中析出,从而达到脱水效果。通过正交分析,得出最优组合为 $A_2B_2C_3D_3$,其所对应的比阻值为 43.60×10^9 m/kg,较 2.12×10^9 m/kg 大,因此就比阻而言,配方Ⅰ的最优配方为 $A_1B_3C_3D_3$。此外,根据对底泥过滤后的滤饼含水率、滤液浊度、pH及沉降性能的测定结果,组合 $A_1B_3C_3D_3$ 同样具有优势。

表3 配方Ⅰ的正交试验结果

Table 3 Orthogonal test results of formula Ⅰ

试验号 Test No.	因素 Factctors A	B	C	D	比阻 SRF $\times10^9$ m/kg
1	1	1	1	1	31.70
2	1	2	2	2	10.60
3	1	3	3	3	2.12
4	2	1	2	3	8.86
5	2	2	3	1	4.07
6	2	3	1	2	14.00
7	3	1	3	2	4.32
8	3	2	1	3	8.97
9	3	3	2	1	29.00
K_1	14.80	15.00	18.20	21.60	
K_2	8.99	7.87	16.10	9.64	
K_3	14.10	15.00	3.50	6.65	
R	5.80	7.18	14.70	14.90	

从图2可以看出,不同药剂成分呈现不同的脱水特征,对于活性炭粉,其添加量过多或者过少时,都会使比阻增大,从而导致脱水效果变差,这是由于活性炭粉具有一定的吸附能力,其多孔的表面会吸附一些颗粒物,从而使粒径变大,颗粒物下沉,同时活性炭粉吸附于絮凝物上,有利于絮体的架桥,使脱水效果变好。但是由于该试验pH均大于7,活性炭表面带负电[18],当其添加量达到一定量时,其负电作用大于吸附作用,颗粒相互排斥,恢复稳定状态,脱水效果变差。粉煤灰对底泥脱水的作用效果与活性炭粉类似,添加量过多或者过少均不利于底泥脱水。随着生石灰粉添加量的增加,底泥比阻不断减小,即底泥脱水性能不断提升,原因是生石灰不仅可以调节底泥pH,而且生石灰中的钙与污泥中的有机物结合,可以提高污泥的颗粒密度,使污泥更容易与水分离。聚合氯化铝铁加入污泥中后经水解缩聚可形成大量的氢氧化物固体从水中析出,这些氢氧化物一般都是聚合体,如$[Al(OH)^3]_n$,可以网捕、卷带水中的细小胶粒形成絮状物。随着聚合氯化铝铁加入量的增加,比阻随之减小,底泥的脱水性能也随之提升,可见,聚合氯化铝铁越多,其产生的网捕、卷扫作用越强。虽然生石灰粉和聚合氯化铝铁的脱水性能随着添加量的增大而增强,但投药量的增加不仅会使底泥量增大,造成后期处理负荷过大,同时使得药剂被浪费。此外,生石灰投加量过大,也会使出水水质pH过高,造成水体污染。因此,各成分的用量不仅要满足提升底泥脱水性能的要

表 4　配方 Ⅱ 的正交试验结果
Table 4　Orthogonal test results of formula Ⅱ

试验号 Test No.	因素 Factctors E	F	G	H	比阻 SRF $\times 10^9$ m/kg
1	1	1	1	1	78.10
2	1	2	2	2	292.00
3	1	3	3	3	64.50
4	2	1	2	3	90.70
5	2	2	3	1	100.00
6	2	3	1	2	119.00
7	3	1	3	2	125.00
8	3	2	1	3	53.70
9	3	3	2	1	160.00
K_1	145.00	98.00	83.60	113.00	
K_2	103.00	149.00	181.00	179.00	
K_3	113.00	115.00	96.70	69.60	
R	41.50	50.60	84.20	109.00	

求,同时还应该结合经济成本和环境影响将其控制在合理的范围内。因此,配方 Ⅰ 的最优配比方案为活性炭粉 0.040 7 g,粉煤灰 0.101 9 g,生石灰粉 0.135 8 g,聚合氯化铝铁 0.067 9 g。

2.2　配方 Ⅱ 的正交试验结果　由表 4 可知,柠檬酸的比阻极差较其他 3 个成分大,可见柠檬酸在该配方中起着重要作用,影响也较大。原因在于柠檬酸可以调节底泥 pH,对药剂配方所处的大环境造成影响,从而对药剂脱水起重要作用。从图 3 可见,柠檬酸浓度越大,底泥比阻越大,也就是当柠檬酸浓度较小时,该配方的药剂才能使底泥具有良好的脱水效果,因此,其他 3 个成分的添加量与比阻的关系受柠檬酸浓度的影响,而非仅仅受成分本身性质的影响。因此,通过对正交试验,可以得出最优组合为 $E_2F_1G_1H_3$,配比方案为铁粉 0.016 0 g,硫化硫酸钠 0.010 1 g,甲壳素 0.005 0 g,柠檬酸 0.005 9 g。经验证,该组合的比阻为 365.00×10^9 m/kg,较正交试验中的比阻值大。从沉降效果而言,该配方的整体沉降速度都较慢,且沉降不够彻底,上清液较为浑浊,不作为选取最优组合的条件,因此就比阻而言,该配方的最优组合为 $E_3F_2G_1H_3$,比阻为 53.70×10^9 m/kg。

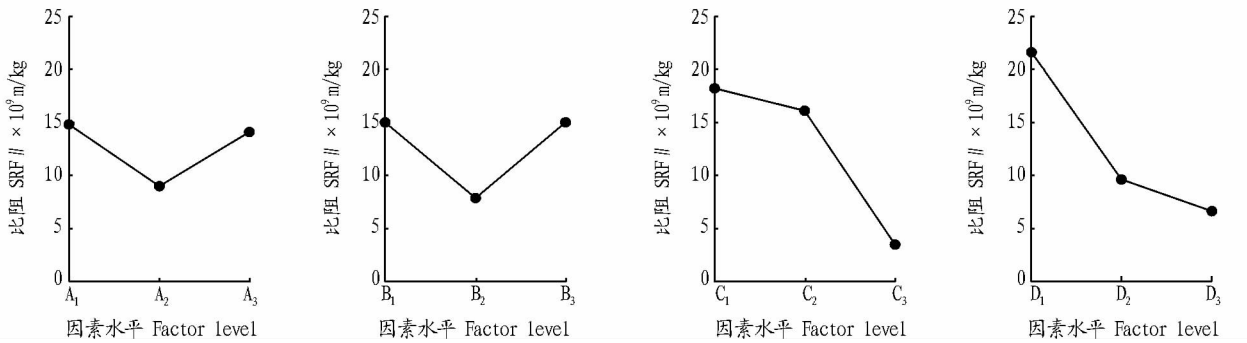


图 2　配方 Ⅰ 中各药剂添加量对底泥比阻的影响
Fig. 2　Effect of different dosage of Formula Ⅰ on SRF to the bottom

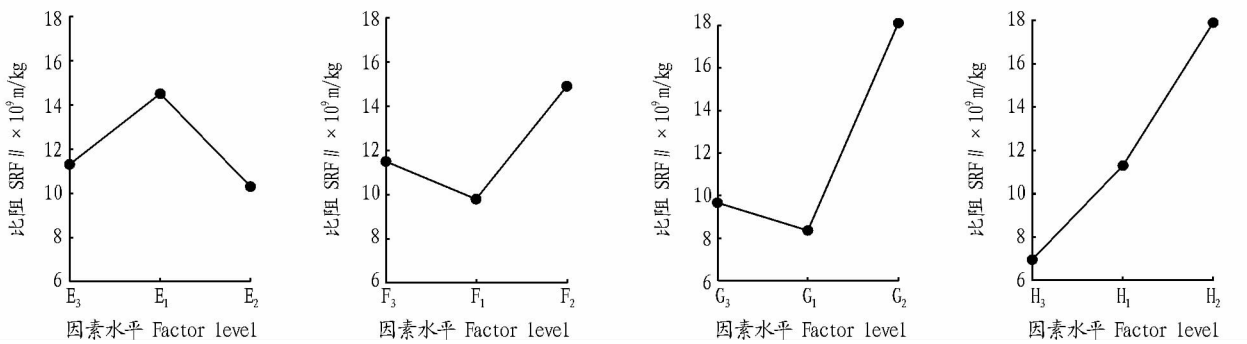


图 3　配方 Ⅱ 中各药剂添加量对底泥比阻的影响
Fig. 3　Effect of different dosage of Formula Ⅱ on SRF to the bottom

3　结论与讨论

正交试验法在底泥脱水领域具有一定的应用性,不仅可以快速有效地筛选出脱水效果好的药剂,也可以优化脱水调理药剂的配比,对实际生产具有重要作用。该试验中,配方 Ⅰ 最优配比为 $E_1F_3G_3H_3$,比阻为 2.12×10^9 m/kg;配方 Ⅱ 最优配比为 $E_3F_2G_1H_3$,比阻为 53.70×10^9 m/kg。无论是配方 Ⅰ 还是配方 Ⅱ,脱水效果均是几种药剂综合反应的结果。只有通过正交试验分析、成本核算和环境影响分析,才能确定最终的药剂用量,取得最优效果。此外,正交试验法可以指示配方中各成分起主要作用还是次要作用,在明确各成分作用机理的基础上可以为研制新的调理剂配方提供思路。

参考文献

[1] 马梅,童中华. 乐安江水和沉积物样品的生物毒性评估[J]. 环境化学,1997,16(2):167 – 171.
[2] 张丽萍,袁文权,张锡辉. 底泥污染物释放动力学研究[J]. 环境工程学报,2003,4(2):22 – 26.
[3] 籍国东,倪晋仁,孙铁珩. 持久性有毒物污染底泥修复技术进展[J]. 生态学杂志,2004,23(4):118 – 121.

[4] 饶应福,夏四清. 分子生物技术在环境工程微生物领域中的应用[J]. 环境工程学报,2005,6(5):63-66.
[5] 曹金清,王峥,王朝旭,等. 污染水体底泥治理技术研究进展[J]. 环境科学与管理,2007,32(7):106-109.
[6] 张美兰,何圣兵,项颖颖. 生物膜技术原位处理有机污染河道研究[J]. 净水技术,2009,28(3):32-35,56.
[7] 程福周,雷学文,孟庆山,等. 水泥及其外加剂固化淤泥的试验研究[J]. 建筑科学,2014,30(9):51-55.
[8] 刘彤宙,劳敏慈,封帅. 非原位淋洗处理深圳河污染底泥的试验研究[J]. 水利水电技术,2015,46(2):8-13.
[9] 李川,张晴波,赵东华,等. 受污染河湖的疏浚底泥快速脱水干化新工艺的应用[J]. 净水技术,2015,34(3):101-104.
[10] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):39-41.
[11] 黎荣,赵新华,从月宾,等. 城市河道环保疏浚的试验研究[J]. 水利水电技术,2004,35(5):19-21,24.
[12] 高健磊,闫怡新,吴建平,等. 污泥压滤脱水条件的优化研究[J]. 环境科学与技术,2008,31(1):106-108.
[13] WEBER K, STAHL W. Improvement of filtration kinetics by pressure electrofiltration[J]. Separation and purification technology, 2002, 26(1): 69-80.
[14] 吕斌,杨开,杨小俊,等. 武汉某湖泊底泥的机械脱水性能研究[J]. 中国给水排水,2008,24(3):68-71.
[15] 李建华,王育来,杨长明. 崇明岛河道典型河段疏浚底泥絮凝脱水试验研究[J]. 净水技术,2010,29(3):69-74.
[16] 刘林双,杨国录,王党伟. 絮凝剂比例以及淤泥浓度对淤泥脱水速率的影响[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(4):57-59.
[17] 熊唯,刘鹏,刘欢,等. 污泥调理剂的研究进展[J]. 化工环保,2011,31(6):501-505.
[18] 缪蕊平,戴闽光. 活性炭的 Zeta 电位对其吸附达旦黄规律的影响[J]. 物理化学学报,1996,12(2):173-176.

(上接第 30 页)

2.5 对小麦根长的影响 吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液处理的平均根长分别为13.73 和 13.58 cm,差异不显著;吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)4 000 倍液处理的平均根长为 12.84 cm,极显著低于上述 2 个处理的小麦平均根长,但极显著高于吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)5 000 倍液处理的平均根长12.02 cm。对照药剂吲哚丁酸·萘乙酸(2%可溶粉剂)5 000 倍液处理的根长为 13.55 cm,S-诱抗素处理的平均根长为11.69 cm ,空白对照组的小麦平均根长为11.51 cm。吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液、4 000 倍液处理的平均根长分别比空白对照组增加 2.22、2.07 和1.33 cm;增长率分别达 19.28%、17.94% 和 11.51%(表 1)。

2.6 对小麦地下部分鲜重的影响 吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液、4 000 倍液处理 20 株小麦地下部分鲜重分别为 31.85、31.78 和 31.20 g,差异不显著;吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)5 000 倍液处理 20 株小麦地下部分鲜重为 30.45 g,与吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)4 000 倍液处理间差异不显著,但极显著低于吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000倍液处理,极显著高于 2 个对照农药处理及空白对照处理。对照药剂吲哚丁酸·萘乙酸(2%可溶粉剂)5 000 倍液处理 20 株小麦地下部分鲜重为 31.90 g,与吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液、4 000 倍液处理间差异不显著;对照药剂 S-诱抗素处理 20 株小麦地下部分鲜重为 29.30 g,空白对照组 20 株小麦地下部分鲜重为 28.63 g。吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液、4 000 倍液、5 000 倍液处理 20 株小麦地下部分鲜重分别比空白对照组重 3.22、3.15、2.57 和 1.82 g,增长率分别为 11.27%、11.00%、9.00% 和 6.38%(表 1)。

2.7 对小麦地上部分鲜重的影响 吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液处理 20 株小麦地上部分鲜重分别为 124.40 和 124.28 g ,差异不显著;吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)4 000 倍液处理 20 株小麦地上部分鲜重为 122.35 g,极显著高于吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)5 000 倍液、对照药剂 S-诱抗素及空白对照处理,极显著低于吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液处理及对照药剂吲哚丁酸·萘乙酸(2%可溶粉剂)5 000 倍液;对照药剂吲哚丁酸·萘乙酸(2%可溶粉剂)5 000 倍液处理 20 株小麦地上部分鲜重为 125.25 g,对照药剂 S-诱抗素处理 20 株小麦地上部分鲜重为117.55 g,空白对照组 20 株小麦地上部分鲜重为 115.25 g。吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)2 000 倍液、3 000 倍液、4 000 倍液、5 000 倍液处理 20 株小麦地上部分鲜重分别比空白对照组重 9.15、9.03、7.10 和 3.98 g,增长率分别为 7.94%、7.84%、6.16% 和 3.45%(表 1)。

3 结论与讨论

该试验结果显示,吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)5 000 倍液、4 000 倍液、3 000 倍液、2 000 倍液可以使小麦株高降低 3.31%、3.39%、10.74% 和 15.29%,可以使分蘖增加 2.80%、6.54%、7.48% 和 8.41%,根长增加 4.41%、11.51%、17.94% 和 19.28%,根数增加 9.21%、17.23%、24.91% 和 26.08%,地下部分鲜重增加 6.38%、9.00%、11.00% 和 11.27%,地上部分鲜重增加3.45%、6.16%、7.84% 和7.94%。说明吲哚丁酸·S-诱抗素具有矮化小麦植株、促进新根生长、增加分蘖、增加小麦鲜重等作用。但增加小麦地上部分鲜重的结果与黄益洪等[6]研究结果不一致。可能是因为吲哚丁酸·S-诱抗素促进小麦分蘖,分蘖数增多,导致小麦地上部分鲜重增加。吲哚丁酸·S-诱抗素(1%可湿性粉剂)是否具有增强小麦抗逆性、促进灌浆、改善品质、提高产量等功能,有待于进一步研究。

参考文献

[1] 解艳玲,杜军,沈振荣,等. S-诱抗素研究进展[J]. 安徽农业科学,2013,41(4):1517-1518,1554.
[2] 武建宽,秦焕荣,杨萍. S-诱抗素对小麦生长调节作用及增产效果试验研究[J]. 陕西农业科学,2014,60(2):6-7.
[3] 朱蕙香,张宗俭,张宏军,等. 常用植物生长调节剂应用指南[M]. 北京:化学工业出版社,2010:69-71.
[4] 冒宇翔,沈俊明,陈惠,等. 1% S-诱抗素·吲哚丁酸在水稻生产上的应用研究[J]. 现代农药,2009,8(3):55-56.
[5] 何忠全,肖亮,毛建辉,等. 脱落酸· 吲哚丁酸在水稻上的应用研究[J]. 西南农业学报,2008,21(3):597-601.
[6] 黄益洪,汤日圣,叶晓青,等. 脱落酸(ABA)对白粒小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 麦类作物学报,2009,29(3):503-507.