

矿井中水灌溉及土壤改良对早熟禾种子萌发和幼苗生长的影响

闫利军¹, 米福贵^{1*}, 郭郁频², 王晓龙¹, 郭跃武¹, 刘伟伟¹, 于洁¹

(1.内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019; 2.河北北方学院动物科技学院, 河北 张家口 075000)

摘要:采用培养皿种子暴露试验方法,研究了草地早熟禾2个常用绿化草种——新歌来德和奖品在不同水质浇灌和不同土壤改良方式下(石膏改良、碳粉改良、污泥改良)的种子萌发及幼苗生长的反应。结果表明:矿井中水灌溉以及2:1混合灌溉显著抑制了早熟禾种子的萌发和幼苗的生长,与矿井中水灌溉和2:1混合灌溉相比,1:1混合灌溉对早熟禾种子萌发和幼苗生长具有明显的促进作用;1:1混合灌溉草种的发芽率、发芽势、发芽指数和种子活力指数与清水对照处理没有显著差异,2个品种根长、苗长与对照相比均有所增加,其中新歌来德的根伸长更为显著($P<0.05$),增加了0.83 cm。说明矿井中水与清水1:1混合浇灌是可行的。此外,土壤的几种改良方式在一定程度上对草种的萌发及其幼苗的生长有积极的作用。总的来说矿井中水与清水2:1和1:1混合灌溉土壤在石膏改良方式下效果最好。

关键词:矿井中水;土壤改良;种子萌发;幼苗生长

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)05-1016-08 doi:10.11654/jaes.2014.05.027

Effects of Coal Mining Wastewater and Soil Amendments on Seed Germination and Seedling Growth of Kentucky Bluegrass

YAN Li-jun¹, MI Fu-gui^{1*}, GUO Yu-pin², WANG Xiao-long¹, GUO Yue-wu¹, LIU Wei-wei¹, YU Jie¹

(1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. College of Animal Science and Technology, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: In laboratory, petri dish exposure test was adopted to study seed germination and seedling growth of two common Kentucky bluegrass, Nuglade and Award, as influenced by coal mining wastewater and different soil amendments (gypsum, coal powder and sewage sludge). Seed germination and seedling growth were negatively influenced by reclaimed mining wastewater and 2:1 mixture of wastewater and clean water, however, irrigation with 1:1 wastewater and clean water had no significant influence on germination percentage, germination tendency, germination index and seed vigor index, and promoted root length and shoot length, compared with the control. In amendment treatments, seed germination and seedling growth were best in gypsum irrigated with 2:1 and 1:1 mixture of reclaimed wastewater and clean water.

Keywords: reclaimed mining wastewater; soil amendments; seed germination; seedling growth

神东矿区位于鄂尔多斯高原东南部、陕北黄土高原北缘、毛乌素沙漠的东南边缘,属世界八大煤田之一,是我国最大的煤炭生产基地和优质动力煤出口基

地^[1]。由于这一地区水资源十分缺乏,生态建设需要大量的水资源作为保障,而煤炭开采又必将对水资源造成很大影响^[2],应用中水灌溉是神东矿区生态建设的重要措施,也是生态建设取得成效的保障。但在中水长期的灌溉应用中,一些问题已然显现,如部分地段土壤严重盐碱化,植物生长不良,病害频发等,而且这些问题呈累积发展态势,如果不尽早解决,必然对生态安全构成威胁^[3]。矿井中水所含的营养元素及盐分较多,

收稿日期:2013-12-26

基金项目:国家科技支撑项目(2011BAD17B05);中国神华集团科技攻关项目(SHIL07443)

作者简介:闫利军(1986—),男,博士研究生,主要从事牧草种质资源育种、矿区生态恢复研究。E-mail:yanlijun456@126.com

*通信作者:米福贵 E-mail:mfguinm@163.com

是构成污水排放与绿化用水的一对矛盾因素和限制其广泛应用的主要原因,也是中水合理利用研究的热点。中水在我国的应用历史较短、使用范围小等特点决定了中水应用专项研究还很少,对矿井中水用于草坪灌溉的研究更是鲜有报导。

土壤次生盐碱化是应用中水灌溉绿地后多发的的问题之一。中水灌溉会造成土壤盐分的累积,对植物生长造成胁迫危害^[3-8]。解决土壤盐碱化问题需从两方面着手,一是恢复治理,二是源头控制。恢复治理就是对已受到影响的土壤进行改良与复壮,而源头控制就是通过对矿井中水净化处理达到中水成分不再对土壤与植被造成影响。为了加强植物的修复效果,向污染土壤加入改良剂也是修复退化土壤的重要措施^[9-10]。植物在修复盐碱土壤方面有工程措施无法相比的优势,其高效、安全、经济、持久等特点与实现可持续发展目标相吻合。许多研究表明,草类植物对盐碱土壤具有良好的修复效果^[11-13]。因此,种植具有吸盐能力的草坪绿化植物,不但能修复盐碱土壤,同时还能满足矿区居民对绿地景观的要求。草地早熟禾(*Poa pratensis*)是应用较为广泛的草坪植物之一,亦是我国北方重要的草坪草种,繁殖力强、再生性好,被美誉为“草霸王”;此外,它还具有生长年限长、耐旱、抗寒、返青早、绿期长等特点,堪称“绿草之冠”^[14]。

本文采用种子暴露试验,通过研究2个国内外应用较为广泛的草地早熟禾品种在不同水质浇灌和不同土壤改良方式下的种子萌发及其幼苗生长试验,探讨矿井中水对草地早熟禾的生态危害,以其为矿区退化土壤的生态修复和绿化及矿井中水合理应用提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 矿井中水和清水

供试矿井中水和清水均取自神东矿区活鸡兔矿井污水处理厂。矿井中水为矿区废水在经过混凝、沉淀、过滤、消毒净化处理后,可以直接排放或用于生产的水。清水为矿井中水进一步淡化处理后的水(反渗透出水),用作对照。各种水质成分见表1。

1.1.2 土壤和改良剂

供试土壤取自神东矿区黑炭沟污水处理厂草坪区地表0~20 cm土壤,土壤经混匀、风干、研磨、过筛(2 mm)备用。土壤理化性质如下:pH 7.21,全氮 0.73 g·kg⁻¹,全磷 0.41 g·kg⁻¹,全钾 21.8 g·kg⁻¹,速氮 54.4 mg·kg⁻¹,速磷 26.7 mg·kg⁻¹,速钾 79.8 mg·kg⁻¹,有机质 18.5 g·kg⁻¹。脱硫石膏购自神东热电公司,碳粉取自神东矿区上湾煤矿附近,污泥取自神东矿区黑炭沟生活污水处理厂。

1.1.3 种子

供试草种以在神东矿区适应强的草地早熟禾品种新歌来德(Nuglade)和奖品(Award)为研究对象,种子购自北京克劳沃草业技术开发中心。均选用饱满、健康种子。

1.2 试验设计和方法

1.2.1 土壤处理

试验设计分为2部分:

第1部分设4个处理,分别为矿井中水(C1)、矿井中水与清水2:1混合(C2)、矿井中水与清水1:1混合(C3)和清水对照处理(CK),每个处理3次重复。选取直径120 mm的培养皿,每个培养皿放60 g过筛土壤。分别加入不同的试验用水,待水分挥发干后,搅拌均匀。这样连续处理5次后,放置几天使用。

第2部分设10个处理,处理分别为矿井中水石膏改良(C1S)、矿井中水碳粉改良(C1C)、矿井中水污泥改良(C1W)、2:1混合石膏改良(C2S)、2:1混合碳粉改良(C2C)、2:1混合污泥改良(C2W)、1:1混合石膏改良(C3S)、1:1混合碳粉改良(C3C)、1:1混合污泥改良(C3W)、清水无改良(CK),每个处理3次重复。土壤按第1部分设置,石膏、碳粉和污泥以土重2%的比例加入,混匀。为使各处理的重量一致,CK中加入2%的原状土。

1.2.2 发芽试验

将精选的饱满健康的新歌来德和奖品种子分别放入土壤表面,每个培养皿中均匀播种30粒,置光照培养箱培养,在25℃/15℃昼/夜(昼10 h/夜14 h)温度条件下萌发,每天用滴管补充相应的水分,用称重法使土壤水分维持在田间持水量的60%。发芽期间每

表1 水样水质调查

Table 1 Quality of water used in experiment

水样	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	K ⁺ +Na ⁺ /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	CO ₃ ²⁻ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	矿化度/mg·L ⁻¹	pH
矿井中水	124.3	14.1	450.4	292.1	445.3	25.5	623.4	1844	8.9
清水	0	0.6	23.5	20.6	24.5	0	84.2	250	7.1

天 8:00~10:00 记录一次,第 3 d 统计发芽势,第 8 d 统计发芽率,用直尺计量第 8 d 的苗长和根长并计算发芽指数和活力指数。

1.2.3 指标测定

发芽率=(种子发芽数/供试种子数)×100%

发芽势=(3 d 内种子发芽数/供试种子数)×100%

发芽指数(GI)= $\sum Gt/Dt$

式中:Gt 为在 t 日的发芽数;Dt 为发芽天数^[15]。

活力指数(VI)=GI×S

式中:S 为萌发第 8 d 幼苗的长度;GI 为发芽指数^[16]。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2007 制表、制图,运用 SPSS 13.0 软件对试验测得种子萌发指标及幼苗生长指标在不同处理下得到的结果进行单因素方差分析,用 Duncan 法多重比较,采用 LSD 法在 0.05 水平确定各个均值之间的差异显著性。用 DPS 7.02 软件的灰色系统方法进行关联度分析,取新歌来德和奖品各指标的平均值,初值无量纲处理。

2 结果与分析

2.1 灌溉水质对草地早熟禾种子萌发的影响

不同水质处理对新歌来德和奖品种子的发芽率无明显影响,但发芽势在矿井中水和 2:1 混合下与 1:1 混合相比显著降低($P<0.05$),新歌来德分别降低了 45.6%和 31.1%,奖品分别降低了 42.2%和 18.9%。发芽指数在 2:1 混合下与 1:1 混合相比差异性显著($P<0.05$),新歌来德分别降低了 8.2%和 5.0%,奖品分别降低了 8.2%和 3.7%。种子活力指数在矿井中水和 2:1 混合下与 1:1 混合相比显著降低($P<0.05$),新歌来德分别降低了 51.3%和 27.8%,奖品分别降低了 50.8%和 43.5%。总的来看,1:1 混合下新歌来德和奖品的发芽率、发芽势、发芽指数和种子活力指数与清水对照处理相比没有显著差异,且除发芽率与对照相同外其他均高于对照,新歌来德分别提高了 5.6%、0.8%、8.2%,奖品分别提高了 4.5%、0.7%、6.6%(表 2)。

2.2 灌溉水质对草地早熟禾幼苗生长的影响

对比各供试植物不同水质处理下苗长和根长数据的方差分析结果可以看出(图 1、图 2),在种子萌发期,2 个品种新歌来德和奖品在矿井中水和 2:1 混合下与 1:1 混合相比苗长和根长显著降低($P<0.05$),新歌来德苗长分别降低了 1、0.44 cm,根长分别降低了 1.93、1.8 cm,奖品苗长均降低了 1.03 cm,根长分别降低了 1.13、0.96 cm。与对照相比,1:1 混合下新歌来德的苗长和奖品的苗长、根长增长不显著,而新歌来德的根长伸长显著($P<0.05$),增加了 0.83 cm。

2.3 不同水质、不同土壤改良方式对草地早熟禾种子萌发的影响

不同水质、不同土壤改良方式对草地早熟禾种子萌发影响的试验结果列于表 3。在相同水质浇灌下,添加石膏和碳粉与添加污泥改良相比,新歌来德和奖品种子的发芽率、发芽势、发芽指数均显著提高($P<0.05$),种子活力指数差异不显著。在不同水质灌溉下,石膏、碳粉和污泥改良处理的新歌来德和奖品种子的发芽率差异不显著。1:1 混合和 2:1 混合浇灌与单一矿井中水浇灌相比,石膏改良在发芽势和发芽指数上显著提高($P<0.05$)。1:1 混合浇灌与矿井中水浇灌相比,碳粉改良可显著提高新歌来德种子的发芽势和活

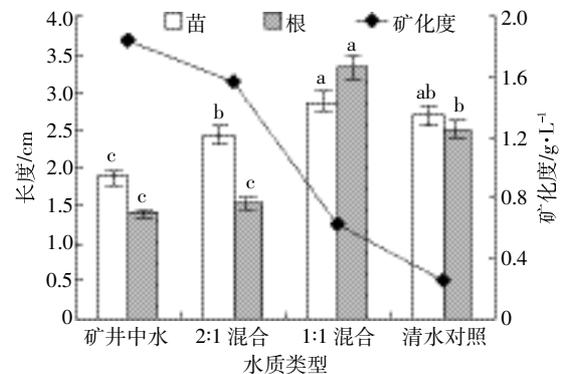


图 1 新歌来德在不同水质处理下的幼苗生长情况
Figure 1 Seedling growth of Nuglade in different ratios of wastewater

表 2 草地早熟禾 2 个品种在不同水质处理下的萌发情况

Table 2 Seed germination of two Kentucky bluegrass varieties in different ratios of wastewater

处理	新歌来德				奖品			
	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	种子活力指数	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	种子活力指数
矿井中水	96.67a	51.11b	28.04c	52.42c	93.33a	56.67c	28.28c	45.13b
2:1 混合	97.78a	65.56b	31.23b	75.95b	100.00a	80.00b	32.75b	52.49b
1:1 混合	100.00a	96.67a	36.20a	103.76a	100.00a	98.89a	36.43a	95.96a
清水对照	100.00a	91.11a	35.40a	95.61a	100.00a	94.44a	35.73a	89.36a

注:数据为平均值(n=3);同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著,相同字母表示差异不显著。下同。

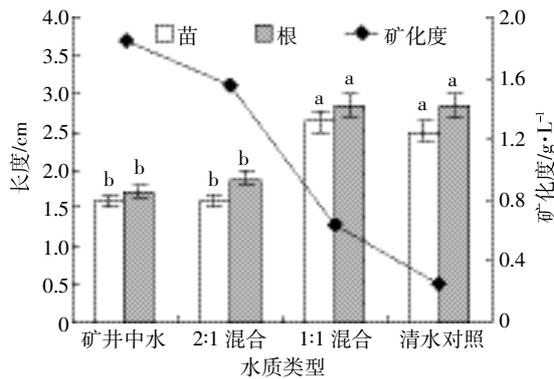


图2 奖品在不同水质处理下的幼苗生长情况

Figure 2 Seedling growth of Award in different ratios of wastewater

力指数,而污泥改良则显著提高了新歌来德和奖品种子的发芽势、发芽指数和活力指数。2:1混合浇灌与单一矿井中水浇灌相比,可显著提高新歌来德种子的发芽指数。可见,矿井中水对新歌来德和奖品种子的萌发具有很强的抑制作用。总体来看,1:1混合浇灌经石膏和碳粉改良后,新歌来德和奖品种子的所有萌发指标与对照相比差异不显著,2:1混合浇灌再加之石膏和碳粉改良后,供试草种的发芽率、发芽势、发芽指数与对照相比差异不显著,只有种子活力指数差异显著。

2.4 不同水质、不同土壤改良方式对草地早熟禾幼苗生长的影响

图3、图4的分析结果表明,在相同矿化度矿井中水灌溉的前提下,与土壤中加入石膏和碳粉的处理相比,土壤中加入污泥的处理可显著提高2种草地早熟禾材料的苗长,但对其根长的抑制作用同样显著。矿井中水灌溉后,经石膏和碳粉改良对新歌来德的苗长和根长以及奖品苗长的影响不显著,但对奖品的根

长影响显著($P<0.05$);2:1混合石膏改良与碳粉改良相比,新歌来德的根长显著提高($P<0.05$),而新歌来德的苗长和奖品的苗长、根长差异不显著,由此也可以看出石膏改良后供试材料的苗长、根长等指标稍优于碳粉改良;1:1混合石膏改良与碳粉改良相比,新歌来德和奖品的苗长、根长均显著提高($P<0.05$)。总体来看:1:1混合石膏改良后,新歌来德的苗长以及奖品的苗长、根长与对照相比差异不显著,而新歌来德的根长显著提高($P<0.05$);1:1混合碳粉改良后,供试材料的所有指标与对照相比差异不显著。

2.5 不同处理的关联度分析

试验观测了不同影响因素处理后,草地早熟禾2个品种的发芽率、发芽势、发芽指数、种子活力指数、苗长、根长6项指标,以试验结果中各性状最优值构造标准组合。在此基础上,采用灰色关联度分析的方法,评价各处理组合间的优劣。分析结果表明,关联系数最大的为处理7(1:1混合,石膏改良),与标准组合关系最近($\gamma=0.9920$),即该处理效果最好;处理组合3(矿井中水,污泥改良)的关联系数最小($\gamma=0.5476$),处理效果亦最差。由关联系数依次排列获得各处理的关联序(表4)。从表4看出,关联序排在前三位的组合依次是1:1混合石膏改良、1:1混合碳粉改良、2:1混合石膏改良和2:1混合碳粉改良,可见1:1混合和2:1混合浇灌的前提下,土壤经石膏改良的效果最好。

3 讨论

盐分抑制植物种子萌发的原因主要是由渗透胁迫、离子毒害以及其他因素如激素、蛋白质、氨基酸等引致^[17],盐分对幼苗生长的抑制亦主要通过渗透胁迫

表3 不同水质、不同土壤改良方式草地早熟禾种子的萌发情况

Table 3 Seed germination of Kentucky bluegrass in different combination of wastewater and soil amendments

处理	新歌来德				奖品			
	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	种子活力指数	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	种子活力指数
C1S	98.89ab	75.56c	31.78b	68.88def	96.67ab	64.44c	29.12c	64.96d
C1C	93.33bc	88.89b	30.07c	56.43f	94.44bc	87.78a	33.61b	68.27d
C1W	87.78d	42.22f	23.38e	60.04ef	90.00cd	44.45d	24.56d	62.09d
C2S	98.89ab	93.33ab	35.57a	79.40cd	95.56ab	94.44a	34.58ab	74.68cd
C2C	97.78abc	94.44ab	35.31a	69.41def	95.55ab	95.56a	34.80ab	73.37cd
C2W	88.89d	51.11e	25.98d	71.08de	86.67d	50.00d	25.68d	71.01cd
C3S	100.00a	96.67a	36.21a	106.17a	100.00a	97.78a	36.32a	104.11a
C3C	98.89ab	97.78a	36.03a	85.23bc	100.00a	95.56a	36.01ab	84.10bc
C3W	92.22cd	64.44d	29.79c	96.30ab	90.00cd	74.44b	30.16c	95.25ab
CK	100.00a	93.33ab	35.71a	93.98ab	100.00a	90.00a	35.21ab	90.41ab

注:C1,C2,C3分别表示矿井中水,2:1混合,1:1混合;S,C,W分别表示石膏改良,碳粉改良,污泥改良;CK表示清水无改良对照。下同。

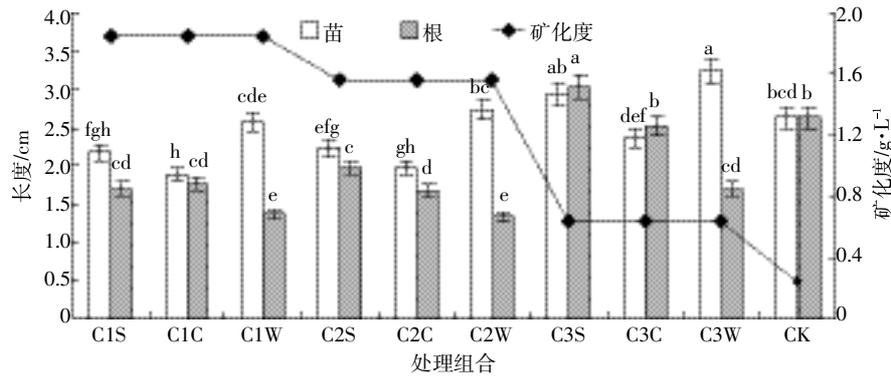


图3 不同水质、不同土壤改良方式对新歌来德幼苗生长的影响

Figure 3 Seedling growth of Nuglade in different combinations of wastewater and soil amendments

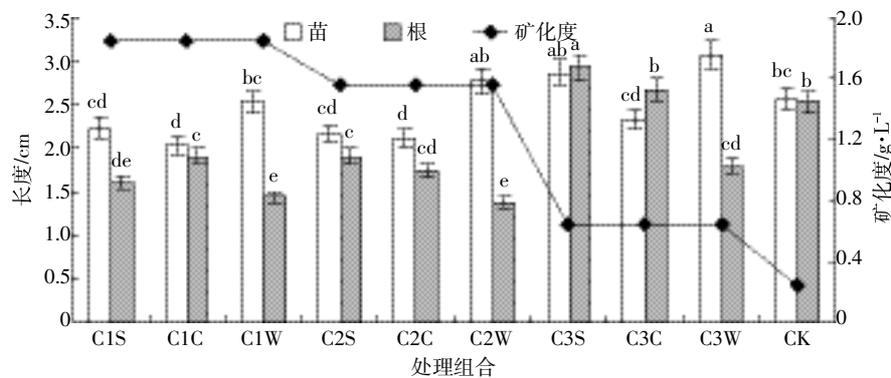


图4 不同水质、不同土壤改良方式对奖品幼苗生长的影响

Figure 4 Seedling growth of Award in different combinations of wastewater and soil amendments

迫、离子毒害和离子吸收不平衡等因素影响植物^[18]。

供试材料新歌来德和奖品种子萌发与幼苗生长在 1:1 混合浇灌下存在促进效应,随着矿化程度的加重呈现下降的趋势,即高矿化度矿井中水含有影响植物种子萌发和幼苗生长的较多盐分,也可能是高矿化度矿井中水破坏了土壤环境,使土壤盐碱化。总之,种

表4 不同处理组合的关联系数及关联序

Table 4 Grey relational coefficients and relational order in different combinations of wastewater and soil amendments

处理编号	处理组合	关联系数	关联序
1	C1S	0.569 1	9
2	C1C	0.676 2	7
3	C1W	0.547 6	10
4	C2S	0.781 6	3
5	C2C	0.765 6	4
6	C2W	0.579 1	8
7	C3S	0.992 0	1
8	C3C	0.829 3	2
9	C3W	0.758 5	5
10	CK	0.739 3	6

子萌发和幼苗生长是植物生活史中对环境胁迫反应最为敏感的时期^[19]。苗期是植物整个生命周期中耐盐碱性最差的时期,而发育早期又是对盐分胁迫最为敏感的时期,此时期生长环境盐分的高低不仅影响植物能否定植,甚至还会决定物种的分布和群落组成^[20]。高水平的盐碱条件无疑会完全抑制种子的萌发,而低水平盐碱条件诱导种子的休眠^[21],或者对种子萌发没有显著的抑制作用^[22],或者促进某些植物种子的萌发^[23]。1:1 混合浇灌促进了草种的萌发和幼苗的生长,可能是由于矿井中水与清水混合有效降低了矿井中水的矿化度,而且矿井中水富含植物生长的营养物质,营养成分起主导作用促使种子的萌发和幼苗的生长,同时掩盖了盐害作用,随着灌溉时间的增长盐害可能会表现出来。中水与常规的灌溉水相比含有较高的盐分,因而中水长期灌溉对绿地土壤和植物的影响备受关注^[24-27]。郑伟等^[28]研究发现,与清水相比,中水灌溉 2 年后总体呈现土壤盐分增加的趋势;Pintou 等^[29]发现中水灌溉后土壤 pH 值增高;王齐^[30]研究发现,中水中盐离子在土壤中积累,在短期或交替灌溉

下不会对植物的生长产生危害,但长期单一中水灌溉可能会造成土壤盐渍化而对植物生长造成胁迫危害。本文重点研究了不同矿井中水处理下早熟禾种子萌发和幼苗生长指标的室内模拟试验,缺乏矿井中水长期灌溉下对土壤环境和植物生长的影响。因此,为了进一步研究矿井中水对草坪绿化植物的生态危害以及矿井中水的处理和应用,还应该加强长期矿井中水浇灌下土壤环境指标的监测及草坪植物的形态指标和生理生化指标的研究,从根本上解决矿井中水绿化应用与去污排放间矛盾的难题,实现从源头控制的目的。

为寻找进一步加强植物耐胁迫性及其修复效果的土壤改良措施,本研究还比较了在不同水质浇灌下添加不同改良剂后新歌来德和奖品种子萌发和幼苗生长的反应。结果表明,几种改良方式对新歌来德和奖品种子的萌发和幼苗生长在一定程度上表现出积极的作用。石膏改良可促进草种萌发和幼苗生长,具体原因可能是石膏改良后,盐碱土化学性质有明显改变,碳酸氢钠含量明显降低,钠质胶体变为钙质胶体,进而改善盐碱土的钙质营养条件,即石膏起到了离子代换作用^[31]。在盐碱地施用脱硫石膏具有降低土壤pH、提高作物出苗率和产量的效果^[32],此外石膏是一种钙肥,能提高植物的抗旱能力^[33]。研究还发现污泥改良促进了幼苗的生长,却抑制了种子的萌发和幼苗根的发育,可能是由于污泥中含有大量的营养元素促进了幼苗的生长,污泥盐分含量高则抑制种子萌发和根的发育。综合分析新歌来德和奖品的种子萌发和幼苗生长指标,石膏改良在1:1混合和2:1混合浇灌下效果最好。这可能是由于高矿化度矿井中水和清水混合有效降低了矿井中水的矿化度,对土壤的污染程度较小,同时石膏增施稳定增加了土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子含量,进而有效降低 HCO_3^- 离子含量、pH值和碱化度^[34],满足了新歌来德和奖品种子的萌发和幼苗的生长。利用中水过量灌溉存在的碱化趋势主要是由钙、镁离子变化引起的^[35],土壤碱化过程常是灌溉水中可溶性 Na^+ 与土壤胶体表面其他阳离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进行交换的过程。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 可以使土壤通气透水,导水性能改善,灌溉水中 Na^+ 过高可以引起土壤分散和膨胀,导致表层土壤板结与土壤碱化。在矿井中水灌溉条件下土壤中加入脱硫石膏可有效降低碱化的风险。本文研究了矿井中水和清水1:1和2:1两种比例以及2%的脱硫石膏添加比例早熟禾种子萌发和幼苗生长的响应,旨在验证矿井中水深度除盐效果

及选择适宜的混灌比例和合适的土壤改良措施。为了达到更好的效果,还需进一步研究矿井中水和清水的不同混合比例和石膏量的配置,以期实现无盐害土壤源头控制,受盐害土壤恢复治理。

综上所述,对矿井中水灌溉草坪应采取慎重态度。对未受矿井中水污染的草坪,在盐分易于累积的季节应适当调整灌溉方式、灌溉量,必要时采用中水与清水混合灌溉或轮灌等措施以减少盐分累积,并避免盐胁迫超过草坪的耐受限度。用矿井中水灌溉已受污染危害的草坪时,首先应对土壤进行改良,其次对矿井中水进行深度除盐后再进行灌溉或改进矿区的排水方式。经济、安全、有效的方法是应选育适宜性强的物种并结合矿区气候特点,科学调节灌溉方式、灌溉时间和灌溉量,使矿井中水利用效果达到最佳。

4 结论

神东矿区矿井中水矿化度为 $1844 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是对照 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的7.38倍,对草坪生长属于中度危害范畴;矿井中水亦含有较高浓度对土壤和植物产生毒害的钠离子和氯化物。因此,在用此种性质的矿井中水浇灌后,草地早熟禾两个品种种子的发芽势、发芽指数和种子活力指数会显著降低,幼苗生长受抑制。

矿井中水与清水混合有效降低了矿井中水的矿化度,同时矿井中水富含植物生长的营养物质,能促进种子萌发和幼苗生长。采用矿井中水与反渗透出水(清水)1:1混合的方法,既可以减少对反渗透设备的消耗,又可以满足绿化用水的要求,在一定程度上起到了源头控制的目的。

土壤改良措施中,石膏和碳粉的改良均能有效促进草种萌发和幼苗生长,但污泥改良措施主要促进幼苗生长,对种子萌发和根的发育有抑制作用。不同处理组合多指标的关联度分析结果表明,矿井中水与清水不同比例混合浇灌石膏改良效果最好,碳粉改良措施次之。

参考文献:

- [1] 王 安. 神东矿区生态环境综合防治体系构建及其效果[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5):83-87.
WANG An. Construction and benefits of integrated measures system for environment conservation in Shengdong Diggings[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(5):83-87.
- [2] 李 强, 李永春, 陈大勇, 等. 神东矿区水资源可持续利用问题研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9):141-147.

- LI Qiang, LI Yong-chun, CHEN Da-yong, et al. The water resource utilization in Shandong mining area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(9):141-147.
- [3] 寇雅芳, 朱仲元, 姚苏红, 等. 神东矿区矿井水深度除盐处理效果论证[J]. 节水灌溉, 2011, (6):41-43, 47.
- KOU Ya-fang, ZHU Zhong-yuan, YAO Su-hong, et al. Proof of effect of deep desalting treatment for mine water in Shandong Mining Area[J]. *Water Saving Irrigation*, 2011, (6):41-43, 47.
- [4] 韩烈保, 王昌俊, 苏德荣, 等. 不同水质灌溉下绿地养分积累及其比较[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6):62-66.
- HAN Lie-bao, WANG Chang-jun, SU De-rong, et al. Accumulation and comparison of greenbelt nutrients under different water irrigating ways[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(6):62-66.
- [5] 张洪生, 张克强, 韩烈保. 再生水灌溉对绿地土壤环境的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊1):78-84.
- ZHANG Hong-sheng, ZHANG Ke-qiang, HAN Lie-bao, et al. Effects of reclaimed water irrigation on soil environment of greenbelt[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(Suppl1):78-84.
- [6] Adrian M. The effects of irrigating turf grass with waste water[J]. *Turf-grass Bulletin*, 2003, 219(1):30-32.
- [7] Fabregat S, Mas J, Candela L, et al. Impact of urban treated waste water reuse during irrigation of golf courses[J]. *EGS XXVII General Assembly*, 2002, 77(3):21-26.
- [8] Hogg T J, Weiteman G, Tollefson L C. Effluent irrigation: The-saskatchewan perspective[J]. *Canadian Water Resources Journal*, 1997, 22(4):445-455.
- [9] 贺海升, 王文杰, 朱虹, 等. 盐碱地土壤改良剂施用对种子萌发和生长的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(11):5338-5346.
- HE Hai-sheng, WANG Wen-jie, ZHU Hong, et al. Influences on the seed germination and growth with addition of kriliiums in saline-alkali soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11):5338-5346.
- [10] 郑普山, 郝保平, 冯悦晨, 等. 不同盐碱地改良剂对土壤理化性质、紫花苜蓿生长及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9):1216-1221.
- ZHENG Pu-shan, HAO Bao-ping, FENG Yue-chen, et al. Effects of different saline-alkali land amendments on soil physicochemical properties and alfalfa growth and yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(9):1216-1221.
- [11] 陈刚, 孙国荣, 彭永臻, 等. 星星草(*Puccinellia tenuiflora*)人工草地氮素积累对松嫩盐碱草地植被演替的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(5):2031-2041.
- CHEN Gang, SUN Guo-rong, PENG Yong-zhen, et al. Effect of nitrogen accumulation in *Puccinellia tenuiflora* grassland on the succession of vegetation in Songnen alkaline grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5):2031-2041.
- [12] 郝金标, 张福锁, 陈阳, 等. 盐生植物根冠区土壤盐分变化的初步研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1):53-58.
- XI Jin-biao, ZHANG Fu-suo, CHEN Yang, et al. A preliminary study on salt contents of soil in root canopy area of halophytes [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):53-58.
- [13] 肖苏, 张新全. 草类植物在污染环境修复中的研究应用概述[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(36):11961-11964.
- XIAO Su, ZHANG Xin-quan. Review of the research and application of grass in the remediation of contaminated environment[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35(36):11961-11964.
- [14] 萧文一. 中国草坪植物栽培[M]. 哈尔滨:黑龙江教育出版社, 1990:188.
- XIAO Wen-yi. The lawn plant cultivation in China [M]. Harbin: Heilongjiang Education Publishing House, 1990:188.
- [15] 王慧, 徐胜, 陈玮, 等. 土壤菲污染对两种草坪种子萌发及其幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8):1627-1631.
- WANG Hui, XU Sheng, CHEN Wei, et al. Responses of two turfgrass species seed germination and seedling growth to phenanthrene stress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8):1627-1631.
- [16] 鱼小军, 王彦荣, 曾彦军, 等. 温度和水分对无芒隐子草和条叶车前种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(5):883-887.
- YU Xiao-jun, WANG Yan-rong, ZENG Yan-jun, et al. Effects of temperature and osmotic potential on seed germination of *Cleistogenes songorica* and *Plantago lessingii* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5):883-887.
- [17] 赵可夫, 冯立田, 范海. 盐生植物种子的休眠、休眠解除及萌发的特点[J]. 植物学通报, 1999, 16(6):677-685.
- ZHAO Ke-fu, FENG Li-tian, FAN Hai. Characteristics of seed dormancy, dormancy breaking and germination in halophytes[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(6):677-685.
- [18] Ramoliya P J, Patel H M, Pandey A N. Effect of salinisation of soil on growth and macro- and micro-nutrient accumulation in seed lings of *Acacia catechu* (Mimosaceae) [J]. *Annals of Applied Biology*, 2004, 144:321-332.
- [19] 李小双, 彭明春, 党承林. 植物自然更新研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12):2081-2088.
- LI Xiao-shuang, PENG Ming-chun, DANG Cheng-lin. Research progress on natural regeneration of plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):2081-2088.
- [20] 渠晓霞, 黄振英. 盐生植物种子萌发对环境的适应对策[J]. 生态学报, 2005, 25(9):2389-2398.
- QU Xiao-xia, HUANG Zhen-ying. The adaptive strategies of halophyte seed germination[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9):2389-2398.
- [21] Khalid M N, Iqbal H F, Tahir A, et al. Germination potential of chickpeas (*Cicerarietinum* L.) under saline conditions[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2001, 4:395-396.
- [22] Huang Z Y, Zhang X S, Zheng G H, et al. Influence of light, temperature, salinity and storage on seed germination of *Haloxylon ammodendron* [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55:453-464.
- [23] 曾幼玲, 蔡忠贞, 马纪, 等. 盐分和水分胁迫对两种盐生植物盐爪爪和盐穗木种子萌发的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9):1014-1018.
- ZENG You-ling, CAI Zhong-zhen, MA Ji, et al. Effects of salt and water stress on seed germination of halophytes *Kalidium foliatum* and *Halostachys caspica* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9):1014-1018.
- [24] 徐蕾, 杨雅银, 王晓. 再生水绿地灌溉影响研究进展[J]. 环境科

- 技, 2013, 26(5):73-76.
- XU Lei, YANG YA-yin, WANG Xiao. Review of study on effects of reclaimed water irrigation on green land [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 26(5):73-76.
- [25] Bedbabis S, Ferrara G, Ben R B, et al. Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 126(3):345-350.
- [26] Banon S, Miralles J, Ochoa J, et al. Effects of diluted and undiluted treated wastewater on the growth, physiological aspects and visual quality of potted lantana and polygala plants[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(4):869-876.
- [27] Pedrero F, Allende A, Gil M I, et al. Soil chemical properties, leaf mineral status and crop production in a lemon tree orchard irrigated with two types of wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109:54-60.
- [28] 郑伟, 李晓娜, 杨志新, 等. 再生水灌溉对不同类型草坪土壤盐碱化的影响[J]. 水土保持学报, 2009(4):101-104.
- ZHENG Wei, LI Xiao-na, YANG Zhi-xin, et al. Effects of turfgrass irrigation with reclaimed water on soil salinize-alkalization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009(4):101-104.
- [29] Pinto U, Maheshwari B L, Grewal H S. Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(7):429-435.
- [30] 王齐. 中水灌溉对城市绿地生态系统的影响及安全性评价[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2010:41-80.
- WANG Qi. Effect of reclaimed water irrigation on urban greenbelt ecological system and safty evaluation[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University, 2010:41-80.
- [31] Gupta R K, Zia M S. Reclamation and management of alkaline soils [C]//Rice Wheat Consortium of Indo Gangetic Plains, New Dehli: CIM-MYT, 2002:194-198.
- [32] 王金满, 杨培岭, 石懿, 等. 脱硫副产物对改良碱化土壤的理化性质与作物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3):34-37.
- WANG Jin-man, YANG Pei-ling, SHI Yi, et al. Effect on physical and chemical properties of soil and sunflower growth when sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulphurization [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3):34-37.
- [33] 孙毅, 高玉山, 闫孝贡, 等. 石膏改良苏打盐碱土研究[J]. 土壤通报, 2001, 32:97-101.
- SUN Yi, GAO Yu-shan, YAN Xiao-gong, et al. Application of gypsum for the improvement of sod a saline and alkaline soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32:97-101.
- [34] 李洪波. 神东矿区土壤对中水灌溉的响应及土壤改良措施研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010:41-45.
- LI Hong-bo. The research on the responses of reclaimed water irrigation and the improvement measures of soils in shendong mining area [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010:41-45.
- [35] 彭致功, 杨培岭, 王勇, 等. 再生水灌溉对草坪土壤速效养分及盐碱化的效应[J]. 水土保持学报, 2006(6):84-88.
- PENG Zhi-gong, YANG Pei-ling, WANG Yong, et al. Effects of irrigation with reclaimed water on available nutrient and salinize-alkalization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006(6):84-88.