

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20220831002

宋晴雯, 王灵, 刘晨通, 等. 油田再生水对不同植物种子萌发的毒性评价[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(5): 320-330

Song Q W, Wang L, Liu C T, et al. Phytotoxicity of reclaimed water from oilfield to seeds germination of different plants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(5): 320-330 (in Chinese)

油田再生水对不同植物种子萌发的毒性评价

宋晴雯^{1,3}, 王灵^{1,4,*}, 刘晨通¹, 陶雪², 粟文豪¹, 贾宏涛^{1,3}, 朱新萍^{5,#}

1. 新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052

2. 新疆农业大学草业学院, 乌鲁木齐 830052

3. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052

4. 新疆天熙环保科技有限公司, 乌鲁木齐 830000

5. 北京农学院生物与资源环境学院, 北京 102206

收稿日期: 2022-08-31

录用日期: 2022-11-08

摘要: 为探讨油田再生水对不同植物种子萌发的影响及评估其毒性, 本研究采用种子萌发试验, 以黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca elata*)、苏丹草(*Sorghum sudanense*)、旱麦草(*Eremopyrum triticeum*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)和沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)为研究对象, 研究油田再生水与蒸馏水体积占比为0%、10%、20%、30%、50%、100%浓度时对不同植物种子萌发的影响。结果表明: 黑麦草、高羊茅、苏丹草、旱麦草和盐地碱蓬种子发芽率、发芽势、发芽指数、芽长和根长等指标随油田再生水浓度增加呈先上升后下降趋势, 10%再生水浓度处理对黑麦草、高羊茅和苏丹草种子萌发和幼苗生长有显著促进作用($P < 0.05$), 20%再生水浓度处理对旱麦草和盐地碱蓬种子萌发和幼苗生长有显著促进效果, 50%以上油田再生水处理对6种植物种子萌发和生长均有显著抑制作用。通过植物种子根长建立剂量-效应曲线得出, 油田再生水对黑麦草、高羊茅、苏丹草、旱麦草和盐地碱蓬种子根生长的无观察效应浓度(NOEC)均为10%, 半最大效应浓度(EC₅₀)依次为32.87%、33.69%、30.56%、32.34%、38.23%。利用模糊数学隶属函数法评价得出, 盐地碱蓬的萌发和幼苗生长受油田再生水的影响最小, 对其更具有耐受性。研究结果可为国家建立再生水资源利用相关环境标准提供参考依据。

关键词: 再生水灌溉; 草坪草; 萌发; 根长; 芽长

文章编号: 1673-5897(2023)5-320-11

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

Phytotoxicity of Reclaimed Water from Oilfield to Seeds Germination of Different Plants

Song Qingwen^{1,3}, Wang Ling^{1,4,*}, Liu Chentong¹, Tao Xue², Su Wenhao¹, Jia Hongtao^{1,3}, Zhu Xinping^{5,#}

1. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. College of Grassland, Science Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

3. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China

4. XinjiangTianxi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi 830000, China

5. College of Bioscience and Resources Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China

Received 31 August 2022

accepted 8 November 2022

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划资助项目(2022E02026)

第一作者: 宋晴雯(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为干旱区资源与环境监测, E-mail: 690841164@qq.com

* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: 42216412@qq.com

共同通信作者 (Co-corresponding author), E-mail: zhuxinping1978@163.com

Abstract: The effects of reclaimed water from oilfield on six plant seeds (*Lolium perenne*, *Festuca elata*, *Sorghum sudanense*, *Eremopyrum triticeum*, *Suaeda salsa* and *Agriophyllum squarrosum*) germination and phytotoxicity were studied by adopting a seed germination test with six reclaimed water concentrations (0%, 10%, 20%, 30%, 50% and 100%, reclaimed water/deionization water, V/V). The results showed that the seed germination rate, germination potential, germination index, bud length and root length of *Lolium perenne*, *Festuca elata*, *Sorghum sudanense*, *Eremopyrum triticeum* and *Suaeda salsa* were firstly increased and then decreased with the increase of oilfield reclaimed water concentration. The seed germination and plant growth of *Lolium perenne*, *Festuca elata* and *Sorghum sudanense* seeds were significantly promoted ($P<0.05$) when the reclaimed water concentration was 10%, while the seed germination and plant growth of *Eremopyrum triticeum* and *Suaeda salsa* were significantly promoted under the 20% concentration, but the seed germination and plant growth of the six plants were significantly inhibited under more than the 50% concentration. From dose-effect curve established with data of reclaimed water concentration and seed root length, the NOEC of the reclaimed water for seed root length of *Lolium perenne*, *Festuca elata*, *Sorghum sudanense*, *Eremopyrum triticeum* and *Agriophyllum squarrosum* were 10%, and the EC_{50} were determined as 32.87%, 33.69%, 30.56%, 32.34% and 38.23%, respectively. According to the evaluation by using fuzzy membership function, the seed germination and plant growth of *Suaeda salsa* was least affected by the oilfield reclaimed water, and was more tolerant than other five plants. The experimental results provide scientific basis for the national establishment of environmental standards of renewable water resources.

Keywords: reclaimed water irrigation; the lawn grass; germination; root length; bud length

新疆地处干旱半干旱地区,干旱少雨,水土流失和风沙侵蚀严重^[1],面临着水资源短缺的巨大压力。再生水作为一种稳定可靠的水资源,通过适当的资源化处理^[2],可以应用于河道补给、工业生产^[3]、农林灌溉^[4]、市政杂用和地下水回灌^[5-6]等领域。但是由于再生水水质复杂,除了含有的氮和磷等植物所需营养外^[7],不同来源的再生水中还含有过量的盐分以及多种重金属等有害物质^[8],因此,当再生水用于生态恢复等领域时有必要进行植物种子萌发毒性评估测试。

种子萌发到胚根胚芽生长是植物生命周期中的重要阶段,同时也是最敏感的时期,极易受外界因素的干扰,影响其后期生长发育^[9],植物种子萌发试验因具有方法简单、应用方便,种子易获得、高等植物的种子可以在没有营养供应的测试水中生长等优点,应用于水环境毒性评价且备受欢迎^[10]。目前国内外广泛关注工业污水^[11]、城市生活污水^[4]和养殖废水^[12]对农作物^[13]和草本植物种子^[14]萌发及幼苗生长的影响。如吴哈萨^[15]研究了矿井水对草坪草生长的影响、廖林仙等^[16]研究了城市生活再生水对小白菜生长及产量的影响,Siddiqui 和 Abbas^[10]研究了城市生活再生水对鹰嘴豆种子萌发的影响及毒害作用评价等。但是,目前却没有关注工业再生水对于草坪草和荒漠植物的萌发和生长的影响。

黑麦草和高羊茅为多年生冷季型草坪草,有耐

践踏、成坪速度快等诸多优点^[17-18]。苏丹草是广泛分布于新疆的一种人工牧草,具有根系发达、抗性较强、适生范围广等特点,也常被用作水土保持和荒滩地治理植物^[19]。沙蓬、盐地碱蓬和旱麦草均为干旱区常见荒漠植物,是防风固沙和稳定生态系统的主要植物资源^[20]。虽然目前对于采油废水处理后的再生水大部分可进行回注,小部分经处理的采油废水则可外排至收纳水体(《污水综合排放标准》<GB 8978—1996>),但克拉玛依油田地处新疆准噶尔盆地西北缘荒漠戈壁中,采油废水经过处理后,由于地理原因缺少受纳地表水体,因此可考虑将其用于荒漠植被恢复、绿化或种植牧草。目前关于油田再生水用于生态治理与恢复这方面的相关研究还很少,经过处理后的再生水进行灌溉既能使资源合理化利用,又为植物提供所需的营养,可极大缓解生态用水窘境。油田再生水利用对各种植物种子萌发会产生哪些影响,再生水的毒性又如何?这些是油田再生水利用面对的关键问题。因此本研究选取了新疆地区常见的草本植物和荒漠植物种子作为研究对象,探究了不同稀释浓度油田再生水对6种植物种子萌发及幼苗生长的影响,并对油田再生水的毒性效应进行评价,研究可为油田再生水资源化利用提供新的解决方案,而且也为国家建立再生水资源环境利用相关标准提供参考依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 材料

黑麦草、高羊茅、苏丹草、旱麦草、盐地碱蓬和沙蓬种子均于2021年购自新疆农业科学院,采买后的种子保存于纸质种子袋中,常温(25~30℃)避光储藏待用。试验用油田再生水取自克拉玛依某区人工湿地外排水,再生水水质见表1,清水为试验室去离子水。

1.2 方法

1.2.1 试验设计

试验共设计6个处理:CK(100%去离子水)、10%(10%油田再生水+90%去离子水)、20%(20%油田再生水+80%去离子水)、30%(30%油田再生水+70%去离子水)、50%(50%油田再生水+50%去离子水)和100%(油田再生水),以上浓度均按照体积比配制。

选取大小均匀、饱满的植物种子,先用75%乙醇表面消毒1 min,随后用30% H₂O₂溶液浸种10 min以防止真菌/细菌污染^[21],最后用去离子水冲洗4次。将处理后的种子均匀放入底部有双层滤纸的培养皿(直径9 cm)内,每皿30粒。将含有10.0 mL各配比的油田再生水溶液置于培养皿中,每个处理重复4次。试验过程中,每天采用称重法保证各处理水分不变。将培养皿放入温度25℃/15℃(日/夜),光周期16 h/8 h(光/暗)的人工光照培养箱中培养(GXZ型智能培养箱,宁波江南仪器厂,中国)。于培养第2天开始统计发芽数,以胚根伸出作为种子萌发的标志,每天统计1次,种子萌发结束以发芽率基本不再变化为准。试验周期为10 d。

1.2.2 指标测定

萌发指标测定:用计数法每天记录不同油田再生水浓度下的种子萌发数量,持续计数10 d后计算种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,计算公式如下:

$$\text{发芽率(GR)} = (\text{萌发种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽势(GE)} = (\text{发芽高峰时期种子的发芽数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数(GI)} = \sum (G_t / D_t) \quad (3)$$

式中: D_t 表示相应的时间(d), G_t 表示第 t 天的发芽率^[8];

$$\text{活力指数(VI)} = S \times GI \quad (4)$$

式中: S 为幼苗的生长势,用根长表示^[22]。

1.2.3 生长指标测定

胚芽、胚根长度测定:用游标卡尺测量幼苗的胚芽和胚根长度,每个处理随机取10株幼苗(幼苗少于10株的处理,取所有的幼苗),每组3次重复。鲜质量测定:试验进行至第10天时取植物幼苗,每个处理随机取10株(幼苗少于10株的处理取所有幼苗),用滤纸擦干其表面水分后,称其鲜质量,每组3次重复^[23]。

1.2.4 耐性评价

(1) 隶属函数分析

对不同油田再生水浓度下6种植物种子的萌发和幼苗生长指标进行综合评价^[24],计算发芽期和出苗期5项指标的隶属函数值,将其平均值作为最终评价标准。

$$X(a) = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (5)$$

$$X(b) = \frac{1 - (X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (6)$$

式中: X 为试验不同处理下植物种子某一指标的测定值, $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为测定指标的最大值和最小值。如果某一指标与促进萌发指标呈现负相关,则可以通过反隶属函数计算隶属函数值。将各方法处理下测定的植物种子萌发指标的隶属函数值累加求其平均值,根据平均隶属函数值的大小来确定促进种子萌发的强弱,平均隶属函数值越大,说明促进种子萌发作用越强,反之越弱^[25]。

(2) 再生水对植物根系毒性效应评价

通过计算植物根长的生长抑制率^[26],运用Origin进行回归模型拟合,将其平均值作为最终评价标准。

表1 试验用油田再生水水质
Table 1 Water quality of reclaimed oilfield water for test

pH	SS	总盐	BOD	COD	石油类	As	Hg	Pb	Cd	TN	TP
	/(mg·L ⁻¹)	/(mg·L ⁻¹) Total salt /(mg·L ⁻¹)			/(mg·L ⁻¹) Petroleum oil /(mg·L ⁻¹)						
7.92	100	7 903	85.5	350	0.04	0.25	0.14	<2.5	<2.5	1.5	4.2

抑制率(%) = $\frac{R_{LC}-R_{LT}}{R_{LC}} \times 100\%$ (7)

式中: R_{LT} 为不同处理下植物种子的根长, R_{LC} 为空白处理下植物种子的根长。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 录入数据, SPSS 22.0 统计软件对数据进行方差分析, Duncan 多重比较, 确定无观察效应浓度(NOEC), 采用概率回归法分析 50% 的植物生长变化的受试物浓度(EC_{50})。浓度-效应曲线通过 Origin 2019b Pro 软件进行拟合。显著性水平为 $P<0.05$, 所有试验数据均以平均值±标准差表示。

2 结果 (Results)

2.1 油田再生水对不同植物萌发的影响

由表 2 可知, 随着油田再生水浓度的升高, 黑麦草、高羊茅、苏丹草、早麦草和盐地碱蓬植物种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均呈现先增高后降低的趋势。不同配比的油田再生水处理对沙蓬种子的萌发均具有显著的抑制作用($P<0.05$), 且油田再生水配比越高, 对沙蓬种子萌发的抑制作用越明显。与 CK 相比, 100% 油田再生水处理下, 黑麦草、高羊茅、苏丹草、早麦草、盐地碱蓬和沙蓬发芽率分别降低了 40.55%、95.67%、57.86%、29%、38.67% 和 57.33%。

与 CK 处理相比, 10% 油田再生水处理下, 黑麦

草、高羊茅和苏丹草种子各萌发指标达到最大值(表 2), 其发芽率分别为 89.78%、100.00%、98.00%; 20% 油田再生水处理下, 早麦草和盐地碱蓬种子各萌发指标达到最大值, 其发芽率分别为 97.67% 和 96.31%。10% 及以上油田再生水处理下, 沙蓬种子的各萌发指标都显著低于 CK 处理($P<0.05$); 30% 及以上油田再生水处理下, 黑麦草种子和高羊茅种子的各萌发指标都低于 CK 处理($P<0.05$); 50% 及以上油田再生水处理下, 苏丹草、早麦草和盐地碱蓬种子的各萌发指标都显著低于 CK 处理($P<0.05$)。这表明油田再生水浓度不同, 植物种子对其响应也不同。

2.2 油田再生水对植物种子胚芽长、胚根长和鲜质量的影响

由图 1 可知, 随着油田再生水配比的升高, 高羊茅、苏丹草和盐地碱蓬植物种子的胚芽长和胚根长呈现先增高后降低的趋势。不同配比的油田再生水处理对沙蓬种子的胚芽长和胚根长具有显著的抑制作用, 且油田再生水配比越高, 对沙蓬的生长发育抑制作用越明显。与 CK 相比, 100% 油田再生水处理下, 黑麦草、高羊茅、苏丹草、早麦草、盐地碱蓬和沙蓬的胚芽长分别降低了 90.41%、100%、77.42%、485.02%、12.15% 和 100%, 胚根长分别降低了 51.08%、100%、66.18%、85.34%、37.58% 和 100%。

10% 油田再生水处理下, 黑麦草、高羊茅、苏丹

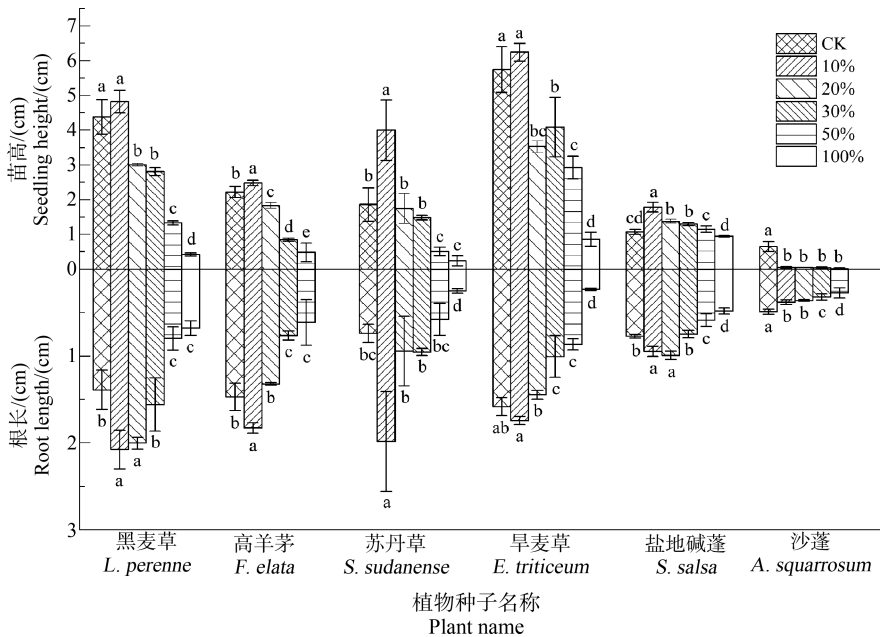


图 1 油田再生水对 6 种植物胚芽长和胚根长的影响

Fig. 1 Effect of reclaimed water on seedling height and root length of 6 plants

草、旱麦草和盐地碱蓬种子的胚芽最长,分别为 4.82、2.48、4.00、6.25 和 1.78 cm;黑麦草、高羊茅、苏丹草和旱麦草种子的胚根长最长,分别为 2.07、1.83、1.98 和 1.74 cm;20% 油田再生水处理下,盐地碱蓬种子胚根长最长,为 0.99 cm。10% 及以上油田再生水处理下,沙蓬的胚芽长和胚根长都显著低于 CK 处理($P<0.05$);20% 及以上油田再生水处理下,

黑麦草、高羊茅及旱麦草的胚芽长都显著低于 CK 处理($P<0.05$);30% 及以上油田再生水处理下,高羊茅和旱麦草的胚根长都显著低于 CK 处理($P<0.05$);50% 及以上油田再生水处理下,苏丹草的胚芽长和黑麦草及盐地碱蓬的胚根长都显著低于 CK 处理($P<0.05$)。这表明不同浓度的油田再生水处理对不同种子的胚芽长和胚根长抑制作用不同。

表 2 油田再生水对 6 种植物种子萌发的影响

Table 2 Effect of reclaimed water on seed germination of 6 plants

植物材料 Plant material	处理 Treatment	发芽率/% GR/%	发芽势/% GE/%	发芽指数 GI	活力指数 VI
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	CK	86.11±3.61ab	55.67±10.26b	7.56±0.41c	2.65±0.05b
	10%	89.78±1.92a	75.67±2.31a	9.59±0.38a	3.90±0.67a
	20%	82.22±1.92ab	54.33±2.31b	8.97±0.88ab	2.49±0.03b
	30%	79.33±5.09bc	36.67±0.58c	8.55±0.57b	2.28±0.12b
	50%	72.33±3.85c	31.00±1.73d	7.51±0.30c	1.08±0.09c
	100%	45.56±7.70d	15.33±4.04e	5.77±0.38d	0.23±0.03d
高羊茅 <i>Festuca elata</i>	CK	95.67±7.51ab	65.67±2.31ab	8.60±0.93b	2.12±0.23b
	10%	100.00±0.00a	69.33±3.00a	9.95±0.21a	2.48±0.08a
	20%	90.00±3.00b	54.33±9.24b	8.58±0.33b	1.93±0.12b
	30%	57.67±5.03c	31.33±7.51c	4.26±0.95c	0.49±0.04c
	50%	52.33±8.08c	23.33±6.51c	3.53±0.24c	0.25±0.15d
	100%	0.00±0.00d	0.00±0.00d	0.08±0.14d	0.00±0.00e
苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>	CK	87.67±4.04ab	36.67±11.93b	17.87±0.94c	2.12±0.23b
	10%	98.00±1.73a	52.33±4.04a	21.03±0.58a	2.48±0.08a
	20%	91.33±7.51ab	40.00±7.00b	19.77±0.77b	2.20±0.12b
	30%	81.00±1.73b	35.33±6.81b	13.38±0.85d	0.49±0.036c
	50%	49.31±3.46c	22.11±1.73c	8.70±0.42c	0.25±0.15d
	100%	28.81±10.15d	9.01±1.73d	5.25±0.50f	0.00±0.00e
旱麦草 <i>Eremopyrum triticeum</i>	CK	72.33±4.77c	44.33±5.13c	15.98±0.55b	3.58±0.72c
	10%	88.00±1.73b	57.67±4.04b	19.45±0.41a	4.49±0.35b
	20%	97.67±4.04a	76.33±5.77a	13.03±0.76c	5.12±0.17a
	30%	75.67±2.31c	48.33±4.53c	12.10±0.47c	3.85±0.12c
	50%	63.33±3.00d	33.33±3.51d	9.37±0.61d	1.24±0.28d
	100%	43.33±6.51e	23.33±3.51e	2.89±0.21e	0.37±0.09e
盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	CK	82.00±1.73b	41.00±8.54ab	7.36±0.49a	0.93±0.06c
	10%	86.33±1.73ab	49.00±4.04a	8.26±0.36a	1.18±1.37b
	20%	96.31±1.15a	52.33±3.46a	6.45±0.55b	1.64±0.06a
	30%	83.67±1.13b	45.67±4.04ab	6.06±0.62bc	1.07±0.06c
	50%	62.33±4.01c	33.33±5.74bc	4.83±0.29c	0.51±0.02d
	100%	43.33±6.51d	23.33±5.74c	3.01±0.88d	0.41±0.07d
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	CK	60.33±5.77a	32.33±10.79a	5.67±0.36a	0.39±0.06a
	10%	42.03±1.73b	20.00±0.00b	3.72±0.38b	0.13±0.01b
	20%	41.00±7.32b	20.00±0.00b	3.71±0.62b	0.02±0.00b
	30%	34.68±4.04c	18.00±1.73b	3.05±0.04c	0.02±0.02b
	50%	27.67±4.04d	15.67±2.31b	1.52±0.13d	0.03±1.00b
	100%	3.00±0.00e	3.00±0.00c	0.42±0.14e	0.00±0.00b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$);下同。

Note: Different lowercase letters in the same column in the table indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$); the same below.

由图 2 可知,随着油田再生水浓度的升高,黑麦草、苏丹草、早麦草、盐地碱蓬的鲜质量呈现先增加后减少的趋势,而高羊茅和沙蓬的鲜质量则呈现出降低的趋势。10% 油田再生水处理下,沙蓬种子的鲜质量显著低于 CK 处理,黑麦草、苏丹草和早麦草鲜质量显著高于 CK 处理($P<0.05$),分别为 269.73、541.10 和 142.66 mg;20% 油田再生水处理下,高羊茅种子的鲜质量显著低于 CK 处理,盐地碱蓬的鲜质量显著高于 CK 处理($P<0.05$),为 36.37 mg;50% 及以上再生水处理下,黑麦草、高羊茅、苏丹草和盐地碱蓬

的鲜质量均显著低于 CK 处理($P<0.05$)。

2.3 油田再生水与植物种子萌发和生长指标的相关性分析

如表 3 所示,运用皮尔逊相关性系数法对再生水浓度和植物萌发及生长指标进行相关性分析,结果表明,再生水浓度与黑麦草、高羊茅、苏丹草和早麦草的植物萌发及生长指标均呈显著负相关($P<0.01$)。再生水浓度与沙蓬和盐地碱蓬的发芽率、胚根长和鲜质量也均呈显著负相关($P<0.01$),与胚芽长呈显著负相关($P<0.05$)。

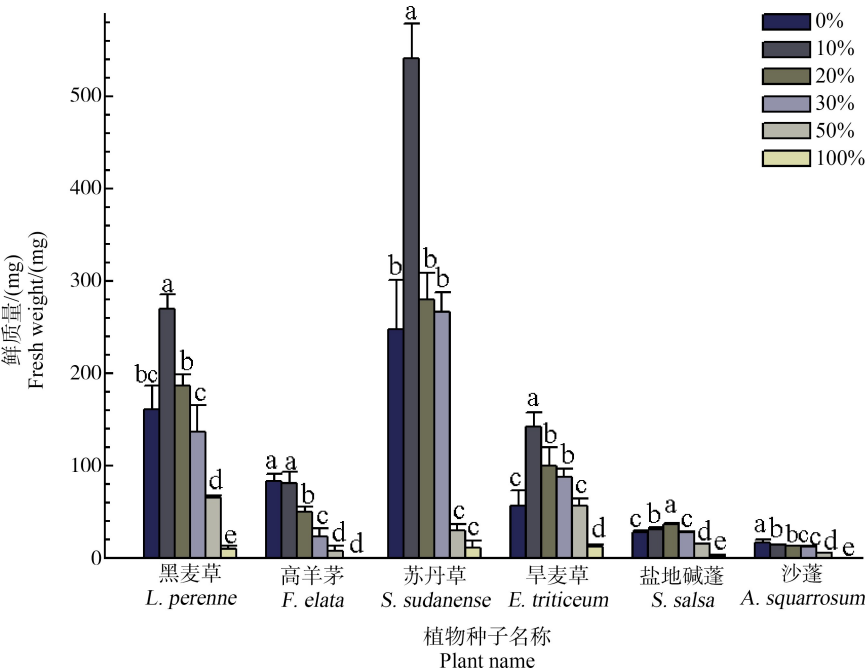


图 2 油田再生水对 6 种植物鲜质量的影响

Fig. 2 Effect of reclaimed water from oil field on fresh dry weight and water content of 6 plants

表 3 油田再生水与植物种子萌发和生长指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of oilfield reclaimed water and plant seed germination and growth index

	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	高羊茅 <i>Festuca elata</i>	苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>	早麦草 <i>Eremopyrum triticeum</i>	盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>
发芽率/% GR/%	-0.91**	-0.70**	-0.93**	-0.80**	-0.96**	-0.96**
胚芽长/cm Shoot length/cm	-0.92**	-0.89**	-0.70**	-0.91**	-0.56*	-0.53*
胚根长/cm Root length/cm	-0.74**	-0.91**	-0.59**	-0.95**	-0.79**	-0.97**
鲜质量/mg Fresh weight/mg	-0.85**	-0.85**	-0.75**	-0.67**	-0.91**	-0.97**

注:**在 0.01 级别(双尾),*在 0.05 级别(双尾),相关性显著。
Note: ** at level 0.01 (double-tail), * at level 0.05 (double-tail), the correlation is significant.

2.4 植物种子对再生水的耐性评价

不同植物种子萌发对逆境胁迫的反应不同,单一的指标很难准确地评价植物整体抗逆性的强弱^[27]。隶属函数评判法应用到植物耐性评价中能够准确地反映植物的抗逆性特征,植物毒性指数也是衡量水毒性的指标之一^[28],因此采用隶属函数方法和植物毒性指数对 6 种植物种子进行了综合耐性评价,挑选出对油田再生水具有更好耐性的植物。

如表 4 所示,采用隶属函数,综合考量 6 种植物

种子的 6 项萌发指标指数,得出 6 种植物种子属函数平均值范围为 0.4389 ~ 0.4964。6 个植物种子的隶属函数平均值分别为 0.4869、0.4847、0.4521、0.4482、0.4964 和 0.4389,由隶属函数值大小排序得出,种子对再生水的耐受性依次为:盐地碱蓬>黑麦草>高羊茅>苏丹草>早麦草>沙蓬。

由根长计算各个浓度油田再生水对 6 种植物的生长抑制率,以剂量-效应关系作图(图 3),并对结果进行统计分析,得出不同再生水浓度条件下的 NO-EC 和 EC₅₀,结果列于表 5。

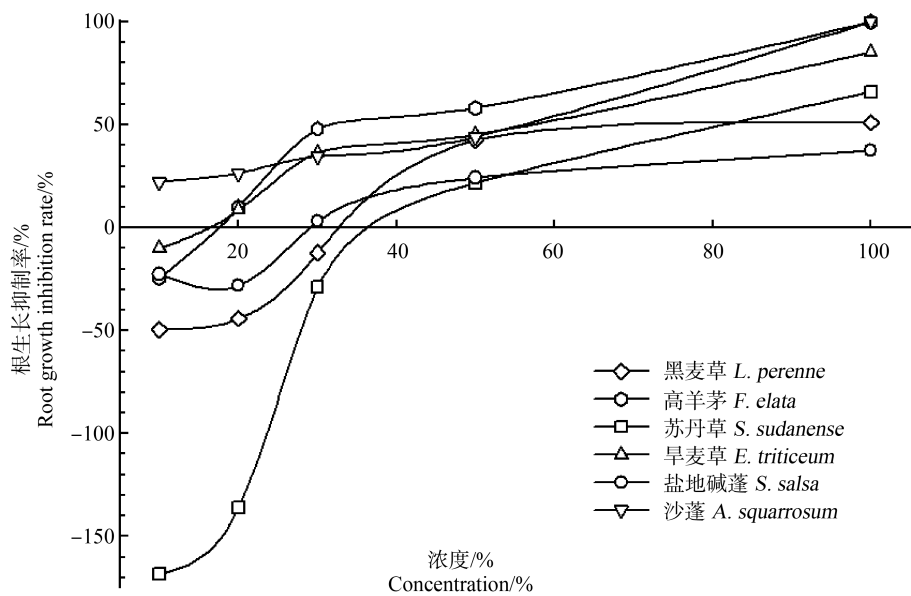


图 3 再生水对植物种子根长的剂量-效应关系

Fig. 3 Dose-effect relationship of reclaimed water on the root length of plant seeds

表 4 6 种植物隶属指标
Table 4 The subordinate indexes of 6 plant species

植物材料 Plant material	发芽率 GR	发芽势 GE	发芽指数 GI	胚根长 Root length	鲜质量 Fresh weight	平均值 Average	排名 Sequence
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	0.4302	0.5240	0.5341	0.4943	0.4467	0.4869	2
高羊茅 <i>Festuca elata</i>	0.4500	0.4967	0.4947	0.4969	0.4864	0.4847	3
苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>	0.4554	0.4181	0.4972	0.42225	0.4674	0.4521	4
早麦草 <i>Eremopyrum triticeum</i>	0.4490	0.4594	0.4006	0.4765	0.4556	0.4482	5
盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	0.4526	0.5253	0.4487	0.5839	0.4735	0.4964	1
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	0.4456	0.4829	0.4897	0.3791	0.3974	0.4389	6

如图 3 所示,随着油田再生水浓度增大,6 种植物种子的根生长抑制率也逐渐增大。50% 以上再生水处理对黑麦草、苏丹草以及盐地碱蓬种子根生长具有明显的抑制毒性;10% 以上再生水处理对高羊茅和旱麦草种子根生长具有明显的抑制毒性;而 10% ~ 100% 浓度的再生水对沙蓬种子的根系生长具有很强的抑制作用。说明沙蓬种子根系萌发受油田再生水毒性敏感,耐受性低。相反由生长抑制率还可得出,在 10% 的低浓度再生水对除沙蓬种子外地其余植物种子根系生长出现不同程度的促进作用。

NOEC 表示再生水没有显著降低植物根长时添加再生水的最高剂量($P>0.05$),通过方差分析和邓

肯多重比较进行检验。当添加最低剂量再生水时,植物的生长就受到了显著抑制,这种情况下无法测定 NOEC^[29]。EC₅₀ 被认为是最精确的毒性效应值,它能反映不同毒物的毒性大小或者不同受体对毒物的耐受性大小^[30]。对于沙蓬而言,很低浓度的再生水就可以对其产生抑制毒性,其 EC₅₀ 值为 67.22% ($R^2_{adj}=0.9953$)。对其他 5 种植物而言,较低浓度的再生水就可以对 5 种植物产生影响,30% 及以下油田再生水对其根具有促进影响,30% 及以上则对植物根具有不同程度的抑制作用。EC₅₀ 值大小顺序为:盐地碱蓬(38.23%)>高羊茅(33.69%)>黑麦草(32.87%)>旱麦草(32.34%)(表 5)。

表 5 不同再生水浓度下不同植物根长的 NOEC 和 EC₅₀
Table 5 NOEC and EC₅₀ of different plants at different reclaimed water concentrations

植物名称 Plant	无观察效应浓度(NOEC) No observed effect concentration (NOEC)	半数效应浓度(EC ₅₀) Concentration for 50% of maximal effect (EC ₅₀)	R^2_{adj}
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	10%	32.87%	0.8975
高羊茅 <i>Festuca elata</i>	10%	33.69%	0.8269
苏丹草 <i>Sorghum sudanense</i>	10%	30.56%	0.9311
旱麦草 <i>Eremopyrum triticeum</i>	10%	32.34%	0.9380
盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	10%	38.23%	0.9114

3 讨论 (Discussion)

目前研究者广泛认为工业污水、城市生活污水和养殖污水含有大量的营养物质可用于农作物种植和草本植物灌溉,但其对植物种子萌发的毒性作用也逐渐受到人们的重视。有研究表明,未经稀释的工业污水对农作物的萌发和生长均有一定的抑制作用,而稀释后的工业污水则可以促进农作物种子和草本植物的萌发和生长,起到一定的肥料作用,适合用于灌溉^[31-35]。城市生活污水根据不同的处理方式,对农作物和草本植物的影响也不同,有研究者认为稀释后的城市生活污水对农作物和草坪草的萌发和生长起到促进作用^[36-37],而朱敏和隋燕^[4]的研究表明,稀释和未稀释的城市生活污水均对草坪草有抑制作用。本研究则表明,油田再生水浓度的增加与 6 种植物种子的发芽率、胚芽长、胚根长和鲜质量均呈显著负相关,油田再生水在 30% 及以下处理时,对黑麦草、高羊茅、苏丹草、旱麦草和盐地碱蓬的

萌发和幼苗生长均有促进作用,未经稀释的油田再生水则对其均有不同程度的抑制作用,这可能是由于未经稀释的油田再生水中有较高浓度的重金属、石油烃和盐离子^[36],其共同作用抑制了种子萌发和幼苗生长,而水中的有些重金属,例如镉、铅等在低浓度对植物生长有一定的促进作用,因而适当稀释油田再生水后,减少了油田再生水的毒性,降低了重金属^[38]、石油烃和盐离子浓度,从而促进了植物的生长。不同的植物种子对油田再生水的耐受性不同,对于沙蓬而言,稀释过的油田再生水依旧显著抑制了其萌发和生长,因而沙蓬不适宜用油田再生水进行灌溉。

利用隶属函数来评价水中污染物对植物的毒性和植物对外来胁迫的耐受性并采用剂量-效应曲线对植物的毒性效应进行量化,进一步确定了盐地碱蓬对油田再生水更具有耐受性,这可能是由于盐地碱蓬本身为一种盐生植物,对高浓度的盐离子具有

一定的耐性^[39]。10% ~ 100% 浓度的再生水对沙蓬种子的根系生长具有很强的抑制作用。一定的高浓度范围内再生水处理对其余植物种子根生长具有明显的抑制毒性;而低浓度范围表现为促进作用,在用油田再生水进行灌溉时需要考虑植被物种和再生水混合比例。因而,油田再生水应用于荒漠植被修复、绿化以及牧业生产等领域具有广大的潜力,今后应在探寻最优的油田再生水适配比例以及开展与传统施肥生态效应的比较研究,为干旱区油田再生水资源化利用提供新的解决方案,而且也为国家建立再生水资源环境利用相关标准提供参考依据。

参考文献 (References):

- [1] 王新芳. 沙生植物在西北地区的发展对策[J]. 乡村科技, 2022, 13(11): 115-117
Wang X F. Development countermeasures of psammophytes in northwest China [J]. Rural Science and Technology, 2022, 13(11): 115-117 (in Chinese)
- [2] Parsons L R, Sheikh B, Holden R, et al. Reclaimed water as an alternative water source for crop irrigation [J]. Hort Science, 2010, 45(11): 1626-1629
- [3] 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 等. 再生水农业灌溉利用现状及影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(6): 130-136
Zheng J T, Ma T, Liu J F, et al. Reclaimed water irrigation: A review [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(6): 130-136 (in Chinese)
- [4] 朱敏, 隋燕. 再生水灌溉对5种常见草坪草种子萌发的影响及作用机理[J]. 种子, 2021, 40(6): 76-82, 89
Zhu M, Sui Y. Effects of reclaimed water irrigation on seed germination of five common turfgrass varieties and its mechanism [J]. Seed, 2021, 40(6): 76-82, 89 (in Chinese)
- [5] 杨俊, 谭远友, 曾庆福. 城市生活污水深度处理及绿化回用研究[J]. 武汉科技学院学报, 2003, 16(5): 21-25
Yang J, Tan Y Y, Zeng Q F. Advanced treatment of domestic wastewater and reusing on virecence [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2003, 16(5): 21-25 (in Chinese)
- [6] 郭道宇, 熊薇, 宫辉力, 等. 冷季型草坪草对再生水灌溉响应及适宜性评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 357-361
Guo X Y, Xiong W, Gong H L, et al. Effects of reclaimed water irrigation on characteristics of physiology in three cool-season grasses and their feasibility [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(S2): 357-361 (in Chinese)
- [7] Zalacin D, Bienes R, Sastre-Merlin A, et al. Influence of reclaimed water irrigation in soil physical properties of urban parks: A case study in Madrid (Spain) [J]. Catena, 2019, 180: 333-340
- [8] 王颖博. 再生水分质灌溉对草坪草生长的影响[J]. 内蒙古水利, 2018(10): 35-36
Wang Y B. Effect of reclaimed water irrigation on turfgrass growth [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2018 (10): 35-36 (in Chinese)
- [9] 罗小燕, 李欣勇, 张瑜, 等. 8种山蚂蝗种子萌发期耐盐耐旱性差异分析[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1329-1336
Luo X Y, Li X Y, Zhang Y, et al. Difference analysis of salt and drought tolerance of eight *Desmodium* species seeds during germination [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1329-1336 (in Chinese)
- [10] Siddiqui Z H, Abbas Z K. Assessment of phytotoxicity of treated water of Tabuk wastewater plant by different technologies on seed germination of chick pea (*Cicer arietinum*) [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2021, 84(10-11): 2968-2979
- [11] da Costa Marques M R, de Souza P S, Rigo M M, et al. Effects of untreated and treated oilfield-produced water on seed germination, seedling development, and biomass production of sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(20): 15985-15993
- [12] 李响. 玉米加工污水灌溉对油菜生长的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 43-44
Li X. Irrigation effect of corn processing wastewater on growth of rape (*Brassica napus* L.) [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 43-44 (in Chinese)
- [13] 郑世英, 余晓帅, 王景平, 等. 污水灌溉对小麦种子萌发及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 94-95
Zheng S Y, Yu X S, Wang J P, et al. Effects of sewage irrigation on wheat seed germination and photosynthetic characteristics [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39 (5): 94-95 (in Chinese)
- [14] 雷琼, 李辉. 城市二级污水灌溉对3种草坪草生理特性及土壤性状的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(11): 2545-2551
Lei Q, Li H. Effect of irrigation with secondary urban sewage on physiological characteristics of three turf grass and soil characters [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(11): 2545-2551 (in Chinese)
- [15] 吴哈萨. 矿井水对冷季型草坪草和土壤理化性质的影响研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021: 30-31
Wu H S. Effects of mine water on physicochemical prop-

- erties of soil and cool season turfgrass [D]. Shenyang: Liaoning University, 2021:30-31 (in Chinese)
- [16] 廖林仙, 举健, 邵孝侯, 等. 不同灌水下限再生水灌溉对土壤-小白菜的影响研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(14): 242-246
- Liao L X, Ju J, Shao X H, et al. Impact of reclaimed wastewater irrigation with different lower limitations of soil moisture on soil-cabbage system [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(14): 242-246 (in Chinese)
- [17] 宋娅丽, 陈佳钰, 王克勤, 等. Na_2CO_3 短期胁迫对3种冷季型草坪草幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2019, 39(5): 10-19
- Song Y L, Chen J Y, Wang K Q, et al. Effects of short-term Na_2CO_3 stress on growth and physiological characteristics of three cool season turfgrasses [J]. Grassland and Turf, 2019, 39(5): 10-19 (in Chinese)
- [18] 白小明, 王靖婷, 贺佳圆, 等. 8个野生早熟禾种子萌发期耐盐性研究[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 546-555
- Bai X M, Wang J T, He J Y, et al. Salt resistance of eight wild *Poa* L. varieties during seed germination stages [J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(3): 546-555 (in Chinese)
- [19] 罗洋, 刘方, 任军, 等. 改良剂对电解锰渣上4种能源草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(11): 118-128
- Luo Y, Liu F, Ren J, et al. Effects of rooting media amendments on seed germination and seedling growth of four bioenergy grass species grown on electrolytic manganese residue [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 118-128 (in Chinese)
- [20] 杜佳倩, 刘彤, 王寒月, 等. 新疆荒漠一年生植物区系组成、分布及资源类型[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 185-209
- Du J Q, Liu T, Wang H Y, et al. Floristic composition, distribution, and resource types of desert annual plants in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 185-209 (in Chinese)
- [21] Yao L R, Wang J C, Li B C, et al. Influences of heavy metals and salt on seed germination and seedling characteristics of halophyte *Halogeton glomeratus* [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 106(3): 545-556
- [22] Li P, Hua C, Zhou Q C, et al. Effects of exogenous GA3 on seed germination and seedling growth of *Salicornia europaea* L. under salt stress [J]. Agricultural Science & Technology, 2011, 12(2): 217-221
- [23] 田宏, 刘洋, 张鹤山, 等. NaCl 和 Na_2CO_3 对扁穗雀麦新品系种子萌发的胁迫[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(3): 276-279
- Tian H, Liu Y, Zhang H S, et al. Stress of NaCl and Na_2CO_3 on seed germination of *Bromus cartharticus* Vahl new strain [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2010, 36(3): 276-279 (in Chinese)
- [24] 王志泰, 马瑞, 马彦军, 等. 利用隶属函数法分析胡枝子抗旱性[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 119-123
- Wang Z T, Ma R, Ma Y J, et al. The drought resistance of 5 species of *Lespedeza* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 119-123 (in Chinese)
- [25] 王亚楠, 赵思明, 曹兵. PEG-6000 模拟干旱胁迫下10种草本植物萌发期抗旱性比较[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 983-989
- Wang Y N, Zhao S M, Cao B. Study on drought resistance of ten herbaceous plants under PEG-6000 simulated drought stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4): 983-989 (in Chinese)
- [26] 赵娜, 朱琳, 冯鸣凤. 不同 pH 条件下 Cr^{6+} 对3种藻的毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(5): 657-665
- Zhao N, Zhu L, Feng M F. The toxicological effects of Cr^{6+} on *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Microcystis aeruginosa* at different pH values [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2010, 5(5): 657-665 (in Chinese)
- [27] 符开欣, 刘新, 张新全, 等. 六份川西北短芒披碱草种质萌发期抗旱性评价[J]. 中国草地学报, 2017, 39(2): 41-47
- Fu K X, Liu X, Zhang X Q, et al. Evaluation of drought resistance of six *Elymus breviaristatus* accessions from the northwest plateau of Sichuan Province at germination stage [J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(2): 41-47 (in Chinese)
- [28] 赵红, 杨铎. 三种常见作物幼苗期耐铜性评价[J]. 农业与技术, 2021, 41(13): 20-22
- [29] 付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 等. 不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2398-2405
- Fu P N, Gong X F, Luo L Y, et al. Toxicity of chromium to root growth of barley as affected by chromium speciation and soil properties [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2398-2405 (in Chinese)
- [30] Vaithiyanathan T, Sundaramoorthy P. Analysis of sugar mill effluent and its influence on germination and growth of African marigold (*Tagetes erecta* L.) [J]. Applied Water Science, 2017, 7(8): 4715-4723
- [31] Singh R, Rathore D. Effects of fertilization with textile effluent on germination, growth and metabolites of chilli (*Capsicum annum* L) cultivars [J]. Environmental Proces-

- ses, 2021, 8(3): 1249-1266
- [32] Ghidaoui J S, Bargougui L, Chaieb M, et al. Study of the phytotoxic potential of olive mill wastewaters on a leguminous plant *Vicia faba* L. [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2019, 80(7): 1295-1303
- [33] Heidari H, Moradi S. Comparison of refined and non-refined wastewater effect on wheat seed germination and growth under drought [J]. Water SA, 2019, 45(4): 1
- [34] Enaime G, Baçaoui A, Yaacoubi A, et al. Phytotoxicity assessment of olive mill wastewater treated by different technologies: Effect on seed germination of maize and tomato [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(8): 8034-8045
- [35] Vaithyanathan T, Sundaramoorthy P. Analysis of sugar mill effluent and its influence on germination and growth of African marigold (*Tagetes erecta* L.) [J]. Applied Water Science, 2017, 7(8): 4715-4723
- [36] Gassama U M, Bin Puteh A, Abd-Halim M R, et al. Influence of municipal wastewater on rice seed germination, seedling performance, nutrient uptake, and chlorophyll content [J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2015, 18(1): 9-19
- [37] 闫利军, 米福贵, 郭郁频, 等. 草地早熟禾幼苗对矿井再生水灌溉的生理响应[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 1031-1037
- Yan L J, Mi F G, Guo Y P, et al. Physiologic responses of Kentucky bluegrass seedling to mine recycled water stress [J]. ActaAgrestia Sinica, 2014, 22(5): 1031-1037 (in Chinese)
- [38] 国伟强, 杜雪, 彭玉兰, 等. Cd、Pb 复合胁迫对狼尾草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2021, 40(11): 91-96
- Guo W Q, Du X, Peng Y L, et al. Effects of combined stress of Cd and Pb on seed germination and seedling growth of *Pennisetum alopecuroides* [J]. Seed, 2021, 40(11): 91-96 (in Chinese)
- [39] 王宁, 赵振勇, 张心怡, 等. 几种藜科盐生植物吸盐能力及生态学意义[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1104-1112
- Wang N, Zhao Z Y, Zhang X Y, et al. Salt absorption capacity and ecological significance of selected *Chenopodiaceae halophytes* [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(6): 1104-1112 (in Chinese) ◆