

饲用高粱品种种子萌发期耐盐碱指标筛选及耐盐碱性综合评价

张庆昕¹, 张玉霞^{1*}, 陈卫东¹, 孙明雪¹, 郭园¹, 丛百明², 杜晓艳¹

(1. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古通辽 028043; 2. 内蒙古自治区通辽市畜牧兽医科学研究所, 内蒙古通辽 028000)

摘要 为了评价不同饲用高粱品种萌发期耐盐碱指标, 筛选适宜西辽河平原盐碱地区种植的饲用高粱品种, 采用 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃ 按 1:9:9:1 摩尔比混合, 处理浓度为 100 mmol/L, 混合盐碱模拟盐碱处理, 以不加盐碱的蒸馏水为对照, 测定发芽指标和根芽长度。采用相关性分析、主成分分析以及隶属函数分析法相结合的方法。结果表明, 通过主成分分析, 将盐碱处理下饲用高粱萌发期的 7 个单项指标转换成 3 个彼此独立综合指标, 代表了试验材料 92.320% 的信息; 根据耐盐综合评价值 D 值得出试验所选 11 个饲用高粱品种的耐盐碱性, 由高到低排序依次为 BJ0602、BJ0603、桑根草、牧乐、美国巨人、2180、N5212274、N52K1009、1230、SU9002、1220, 发芽率 (GR)、根长 (RL) 和活力指数 (VI) 是饲用高粱萌发期耐盐碱性评价指标。

关键词 饲用高粱; 萌发期; 耐盐碱; 综合评价

中图分类号 S 548 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)01-0040-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.011



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Selection of Salt and Alkali Tolerance Indexes and Comprehensive Evaluation of Salt and Alkali Tolerance of Feed Sorghum Varieties during Seed Germination

ZHANG Qing-xin, ZHANG Yu-xia, CHEN Wei-dong et al (College of Agronomy, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028043)

Abstract In order to evaluate the saline-alkali tolerance index of different forage sorghum varieties during germination, forage sorghum varieties suitable for planting in saline-alkali areas of Xiliaohe Plain were screened. NaCl, Na₂SO₄, NaHCO₃ and Na₂CO₃ were mixed according to the molar ratio of 1:9:9:1, and the treatment concentration was 100 mmol/L. Mixed saline-alkali simulated saline-alkali treatment was used. The germination index and root bud length were measured with distilled water without saline-alkali as control. We adopted the methods of correlation analysis, correlation analysis, principal component analysis and membership function analysis. The results showed that through principal component analysis, 7 single indexes of forage sorghum germination period under saline-alkali treatment were converted into 3 independent comprehensive indexes, representing 92.320% of the information of test materials. According to the comprehensive evaluation value D of salt tolerance, the order of salt tolerance and alkalinity of 11 forage sorghum varieties was BJ0602 > BJ0603 > Mulberry root grass > Mele > American giant > 2180 > N5212274 > N52K1009 > 1230 > SU9002 > 1220. Germination rate (GR), root length (RL) and vigor index (VI) were the evaluation indexes of salt and alkaline tolerance of forage sorghum.

Key words Forage sorghum; Germination period; Salt and alkali tolerance; Comprehensive evaluation

土壤盐碱化是限制植物生长与生产的重要因素^[1]。目前, 全球盐碱地面积为 9.544 亿 hm², 我国盐碱地总面积约为 9.913 万 hm², 约占我国国土面积的 10.33%^[2]。随着社会的发展, 盐碱地问题对我国农业经济的影响日益严重^[3-4]。关于牧草耐盐碱性品种的筛选, 已从苜蓿^[5-6]、无芒雀麦^[7]、羊草^[8]、燕麦^[9]等牧草筛选出耐盐碱性较强的品种。但是鲜见对于饲用高粱耐盐碱性品种筛选的报道。饲用高粱是生物学产量较大的作物之一, 其光合效率高、生长速度快、短期内可形成较大的生物量^[10]。目前, 饲用高粱在畜牧业中存在很大的潜力^[11], 已被作为高产饲料在畜牧业中备受关注^[12-13]。鉴于此, 笔者根据西辽河平原盐碱地的盐碱组成特点, 在种子萌发期对引进饲用高粱品种进行筛选, 为选育适合西辽河平原盐碱地的饲用高粱品种提供理论参考, 为耐盐碱基因的挖掘提供前提。

1 材料与方法

1.1 试验材料 试验所用饲用高粱品种美国巨人、牧乐、SU9002、桑根草、2180、N52K1009、1230、BJ0602、N5212274、

BJ0603、1220, 均来源于北京正道生态有限公司。

1.2 试验设计 饲用高粱试验耐盐碱筛选采用室内盆栽试验方法^[14]。首先在规格相同的花盆上套塑料袋, 每个花盆装相同重量的土壤, 均取自科尔沁砂性土壤, 选择大小均匀一致、饱满无残缺、品质优良的 11 种饲用高粱品种的种子, 分别用 0.1% HgCl₂ 消毒 10 min, 用蒸馏水冲洗干净, 盐碱处理为 NaCl:Na₂SO₄:NaHCO₃:Na₂CO₃ 按 1:9:9:1 摩尔比混合^[15], 处理浓度为 100 mmol/L, 以蒸馏水处理为对照, 共设 22 个处理, 3 次重复, 每个花盆播种 50 粒种子, 每盆加 500 g 砂土和蛭石按照 2:1 的混合培养基质和 200 mL 相应浓度的混合盐碱溶液, 覆土厚度 3 cm。将花盆放置于通风、光照良好的环境中, 每天记录发芽数, 发芽试验结束后, 每个重复取 5 株测定胚根、胚芽长度。

1.3 测定项目与方法 种子发芽指标测定参照《国际种子检验规程》^[16], 发芽率 = 发芽种子数 / 供试种子数 × 100%; 发芽势 = 发芽达到高峰期时发芽种子数 / 供试种子数 × 100%; 发芽指数 $GI = \sum G_t / D_t$, G_t : 在时间为 t 天的发芽个数, D_t : 至 t 天的发芽天数^[17]; 活力指数: $VI = GI \times S$, GI 为发芽指数, S 为根长或芽长; 根芽比 = 根长 / 种苗长度。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 单项指标耐盐碱系数。 单项指标耐盐碱系数 = 不同浓度处理下的平均测定值 / 对照测定值。

基金项目 内蒙古自治区科技储备项目(2018MDCB03); 内蒙古自治区“双一流”建设一带一路作物学项目(NMDGJ0018)。

作者简介 张庆昕(1990—), 内蒙古通辽人, 中级实验师, 硕士, 从事木草栽培研究。* 通信作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事木草栽培研究。

收稿日期 2021-04-16

1.4.2 各综合指标的隶属函数值。该公式为

$$u(x) = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \times 100\%, x = 1, 2, \dots, n, u(x) \in [0, 1] \quad (1)$$

式中, $u(x)$ 为第 x 个主成分耐盐碱系数的隶属函数值; x 为第 x 个主成分的耐盐碱系数; x_{\max} 为第 x 个主成分的耐盐碱系数最大值; x_{\min} 为第 x 个主成分的耐盐碱系数最小值。

$$W_x = V_x / m \quad (2)$$

式中, W_x 为第 x 个主成分耐盐碱系数的权重; V_x 为第 x 个主成分耐盐碱系数的贡献率; m 为各个主成分耐盐系数的权重之和。

$$D = \sum_{x=1}^n [u(x) \times W_x], x = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, D 为加权隶属函数值, 即综合评价值。

采用 Excel 2010 计算各指标值的平均数及耐盐碱系数, 采用 DPS 进行相关性分析、主成分分析以及聚类分析。对耐盐碱系数进行主成分分析, 得到 3 个主成分及贡献率。将 3 个主成分的耐盐碱系数进行隶属函数分析, 得到加权函数值

D , 据此可对不同高粱品种进行耐盐碱等级评定。

2 结果与分析

2.1 各单项指标的耐盐系数

根据耐盐碱系数公式计算饲用高粱种质材料各单项指标的耐盐碱系数。由表 1 可知, 在盐碱胁迫下, 各饲用高粱品种发芽率 (GR)、发芽势 (GP)、根芽比 (RBR)、活力指数 (VI) 4 个指标与对照相比较均有所下降 ($\omega < 1$), 饲用高粱 N5212274 品种在活力指数 (GI) 指标中有所增加, 饲用高粱 1230 与 BJ0602 品种在根长 (RL) 指标中以及 BJ0602 品种在芽长 (SL) 指标中均有所增加 ($\omega > 1$), 但不同基因型饲用高粱各指标的变化幅度各不相同, 饲用高粱品种 2180 在 GI 指标中数值最低, 但在其他指标中均不是最低。饲用高粱品种牧乐在 GP 指标中数值最高, 但在其他指标中均不是最高。因此利用单一指标评价耐盐碱性强弱可能会得到不同, 甚至相反的结果。为了弥补单一指标评价的不足之处, 该研究运用了多种分析方法进行完善。

表 1 各单项指标的耐盐碱系数 ω 值

Table 1 Saline tolerance coefficient ω for each index

品种名称 Variety name	发芽率 Germination rate (GR)	发芽势 Germination potential (GP)	发芽指数 Germination index (GI)	根长 Root length (RL)	芽长 Shoot length (SL)	根芽比 Root-bud ratio (RBR)	活力指数 Vital index (VI)
美国巨人 American giant	0.817	0.857	0.854	0.979	0.947	0.965	0.836
牧乐	0.910	0.983	0.951	0.973	0.858	0.923	0.925
SU9002	0.638	0.493	0.566	0.848	0.591	0.739	0.480
桑根草 Sanggencao	0.934	0.750	0.850	0.940	0.870	0.912	0.799
2180	0.816	0.550	0.525	0.919	0.872	0.898	0.482
N52K1009	0.787	0.800	0.758	0.788	0.769	0.780	0.598
1230	0.693	0.638	0.716	1.020	0.647	0.837	0.727
BJ0602	0.976	0.685	0.888	1.065	1.162	0.902	0.946
N5212274	0.855	0.929	1.074	0.718	0.865	0.770	0.772
BJ0603	0.968	0.708	0.937	0.891	0.816	0.858	0.835
1220	0.677	0.563	0.756	0.700	0.615	0.664	0.529

2.2 相关性分析

由表 2 可知, GR 与 GI、RBR、SL 与 RBR, VI 与 GP、SL、RBR 均呈显著正相关 ($P < 0.05$); GI 与 GP、VI, GR 与 SL、VI, RBR 与 RL 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 表明

测定的 7 项指标之间具有一定的影响, 不同指标之间影响不同, 因此必须进一步将各指标综合起来, 对饲用高粱的抗盐碱能力进行评价。

表 2 耐盐碱系数间的相关关系

Table 2 Correlational relationship among saline-alkali tolerance coefficients

指标 Index	GR	GP	GI	RL	SL	RBR	VI
GR	1						
GP	0.528	1					
GI	0.641*	0.809**	1				
RL	0.394	0.047	-0.043	1			
SL	0.815**	0.430	0.453	0.519	1		
RBR	0.652*	0.412	0.197	0.812**	0.705*	1	
VI	0.772**	0.692*	0.799**	0.559	0.684**	0.639*	1

注: * 表示在 0.05 水平差异显著; ** 表示在 0.01 水平差异极显著

Note: * indicated significant differences at 0.05 level; ** indicated extremely significant differences at 0.01 level

2.3 供试高粱种质材料耐盐系数的主成分分析

采用 DPS 软件 (Data Processing System, 中国) 对种质材料进行主成分分析, 得出前 3 个成分可以代表绝大多数信息, 其中第 1 主

成分的贡献率是 62.488%, 第 2 主成分的贡献率是 22.624%, 第 3 主成分的贡献率是 7.208%, 三者累计贡献率达 92.320% (表 3), 可以作为 3 个新的综合指标对饲用高粱

种质材料耐盐碱性进行评价。通过这3个主要成分,再根据每个成分的贡献率评价每个饲用高粱的抗盐碱能力更加具

有说服力,既消除单一指标的局限性,又考虑每个指标的贡献率问题。

表3 供试高粱种质萌发期耐盐碱系数的主成分分析

Table 3 Principal component analysis on salt tolerance indexes at germination period of sorghum

主成分 Principal component	各指标特征向量 Feature vectors of each index						特征值 Characteristic value	贡献率 Contribution rate//%	累计贡献率 Cumulative contribution rate//%	
	GR	GP	GI	RL	SL	RBR				VI
1	0.425	-0.027	-0.515	-0.044	-0.655	0.349	0.042	4.374	62.488	62.488
2	0.342	-0.423	0.432	0.555	0.101	0.446	0.023	1.584	22.624	85.112
3	0.342	-0.530	0.043	-0.327	0.035	-0.437	0.550	0.505	7.208	92.320

2.4 供试高粱种质材料权重、隶属函数值及D值分析 由表4可知,同一指标下,BJ0602材料的隶属函数值最大,为1.000,说明该材料耐盐性最强;SU9002材料隶属函数值在 $u(1)$ 与 $u(3)$ 指标中最小,表明其耐盐性表现较弱。根据公式(2)和各综合指标贡献率的大小计算权重 W_x ,3个综合指标的权重分别为0.677、0.245、0.078。运用公式(3)计算出饲用高粱耐盐碱性综合评价值D值,并根据D值对各品种耐盐性进行强弱排序,结果为BJ0602>BJ0603>桑根草>牧乐>美国巨人>2180>N5212274>N52K1009>1230>SU9002>1220,其中BJ0602的D值最大,说明其耐盐碱能力最强,而1220的D值最小,说明其耐盐碱能力最差。

表4 不同材料隶属函数值、权重、D值及排序

Table 4 The membership function value, weight, D value and ranking of different materials

品种名称 Variety name	隶属函数值 Subordinative function value			D值 D value	排序 Rank
	$u(1)$	$u(2)$	$u(3)$		
美国巨人 American giant	0.530	0.764	0.764	0.605	5
牧乐	0.805	0.748	0.955	0.803	4
SU9002	0.000	0.405	0.000	0.099	10
桑根草 Sanggencao	0.876	0.658	0.685	0.807	3
2180	0.527	0.600	0.004	0.504	6
N52K1009	0.441	0.241	0.253	0.377	8
1230	0.163	0.877	0.530	0.366	9
BJ0602	1.000	1.000	1.000	1.000	1
N5212274	0.642	0.049	0.627	0.496	7
BJ0603	0.976	0.523	0.762	0.849	2
1220	0.115	0.000	0.105	0.086	11
权重 Weight	0.677	0.245	0.078		

3 结论与讨论

作物的耐盐碱性受环境因子、遗传因素等多重制约。前人的大量试验表明,植物不同生长阶段耐盐碱能力存在差异^[18]。植物耐盐碱性在各个生长发育时期表现出的耐盐碱能力存在显著差异,部分植物品种整个生长发育阶段的耐盐碱性强弱变化微小,但有些植物在不同生长发育时期存在着明显变化。因此,明确适合植物某个生长发育时期的耐盐碱能力强弱筛选方法至关重要。对于高粱的耐盐碱性研究报道较多,但有关评价种子萌发期高粱耐盐碱性强弱的研究较少。

植物在盐碱地区的生长过程中,发育会受到严重的抑制,抑制作用的强弱主要由盐碱地的盐碱浓度与植物本身的

耐盐碱能力决定。因此,研究盐碱胁迫对植物的生长发育以及筛选出适合盐碱地生长的植物具有重要的意义^[19]。在植物生长的整个时期,种子的萌发期是对盐碱胁迫反应较为敏感的阶段,植物耐盐碱强弱是植物耐盐碱性早期鉴定的基础。盐碱胁迫抑制植物的生长发育,浓度到达一定高度时,会造成植物代谢的紊乱,导致在萌发时期种子会受到不同程度的影响^[20]。杜利霞等^[21]研究认为,盐碱胁迫最敏感的时期是在种子的萌发和幼苗的生长阶段。仅通过1或2个指标对植物种质材料的耐盐碱能力去评价具有片面性,不能够全面反映^[22]。该试验为了消除供试材料之间的差异,通过各指标的耐盐系数去评价供试饲用高粱的耐盐碱强弱,选择7项指标进行评价,并且通过相关性分析与主成分分析相结合对其耐盐碱强弱能力进行分析,将测定的7个单项指标转换成3个新的指标,经过贡献率分析得出隶属函数值 $u(x)$,将新的指标加权后,计算出供试种质资源的综合评价值(D值),可以客观地评价耐盐碱能力。

通过主成分分析,将盐胁迫处理下不同饲用高粱种质材料萌发期7个单项指标综合成3个新的综合指标,代表了92.320%的信息;通过隶属函数法分析,得到不同种质材料苗期耐盐性综合评价值(D值),评价出饲用高粱的耐盐碱强弱排序为BJ0602>BJ0603>桑根草>牧乐>美国巨人>2180>N5212274>N52K1009>1230>SU9002>1220。

参考文献

- [1] 吕乐福,池凤龙,刘庆岭,等.中天津生态城土壤盐分调查及改良对策[J].延边大学学报,2018,40(3):62-69.
- [2] 陈双庆.浅谈盐碱地生态改造原则[J].中国农村科技,2018(11):14-16.
- [3] 程龙,韩占江,石新建,等.白茎盐生草种子萌发特性及其对盐旱胁迫的响应[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):131-136.
- [4] 李婧男,刘强,贾志宽,等.盐胁迫对沙冬青幼苗生长与生理特性的影响[J].植物研究,2009,29(5):553-558.
- [5] 刘彦,丁荣荣,汪峰,等.19个苜蓿品种的耐盐碱试验研究[J].草业科学,2010,27(5):62-66.
- [6] 石杰,高宇,阴玉华,等.高寒盐碱地区紫花苜蓿引种研究[J].安徽农业科学,2012,40(17):9274-9275.
- [7] 李京蓉,马真,刘泽华,等.青海省6种高寒禾本科牧草的耐盐性[J].草业科学,2019,36(2):442-449.
- [8] 梁潇,侯向阳,王艳荣,等.羊草种质资源耐盐碱性综合评价[J].中国草地学报,2019,41(3):1-9.
- [9] 付鸾鸿,于崧,于立河,等.不同基因型燕麦萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J].作物杂志,2018(6):27-35,174.
- [10] 魏海森.饲草高粱生长及饲用效益[J].当代畜牧,2004(8):29-30.
- [11] 崔凤娟,田福东,王振国,等.饲用高粱品种品质性状的比较及评价[J].草地学报,2012,20(6):1112-1116.

(3) 地累积指数法和潜在生态风险指数法均表明 Cd 的污染最严重,且地累积指数(I_{geo})中的偏重度、重度和严重污染与潜在生态风险系数(E_r^i)中的强、很强、极强生态危害的比例分布相似。除善溪村外,Cd 对潜在生态风险指数(RI)的贡献率均在 68.5%以上,轻微、中等、强、很强生态危害的点占比分别为 11.1%、27.8%、44.4%和 16.7%。

参考文献

- [1] 庄明明. 不同添加材料对生活污泥中营养成分及重金属的影响[D]. 扬州:扬州大学,2011.
- [2] 景称心,孔秋梅,冯志刚. 中国南方某油尾矿库周缘土壤重金属污染研究[J]. 中国环境科学,2020,40(1):338-349.
- [3] 余志,陈凤,张军方,等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学,2019,39(5):2086-2094.
- [4] 蔡立梅,王秋爽,罗杰,等. 湖北大冶铜绿山矿区蔬菜重金属污染特征及健康风险研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(4):873-881.
- [5] PLEDGER A,JOHNSON M,BREWIN P,et al. Characterising the geomorphological and physicochemical effects of water injection dredging on estuarine systems [J/OL]. Journal of environmental management, 2020, 261 [2020-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110259>.
- [6] 程海峰,夏方,刘杰,等. 长江口深水航道疏浚土“十三五”造地利用研究 I——疏浚土资源供需分析[J]. 水运工程,2017(12):51-56.
- [7] WANG L K,SHAO Y L,ZHAO Z L,et al. Optimized utilization studies of dredging sediment for making water treatment ceramics based on an extreme vertex design[J/OL]. Journal of water process engineering, 2020, 38 [2020-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101603>.
- [8] LIM Y C,SHIH Y J, TSAI K C, et al. Recycling dredged harbor sediment to construction materials by sintering with steel slag and waste glass: Characteristics, alkali-silica reactivity and metals stability[J/OL]. Journal of environmental management, 2020, 270 [2020-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110869>.
- [9] NORÉN A, KARL FELDT FEJDE K, STROMVALL A M, et al. Integrated assessment of management strategies for metal-contaminated dredged sediments-What are the best approaches for ports, marinas and waterways? [J/OL]. The science of the total environment, 2020, 716 [2020-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135510>.
- [10] VANDECASTEELE B, DE VOS B, TACK F M G. Heavy metal contents in surface soils along the Upper Scheldt river (Belgium) affected by historical upland disposal of dredged materials[J]. The science of the total environment, 2002, 290(1/2/3):1-14.
- [11] CHEN C F, CHEN C W, JU Y R, et al. Impact of disposal of dredged material on sediment quality in the Kaohsiung Ocean Dredged Material Disposal Site, Taiwan[J]. Chemosphere, 2018, 191:555-565.
- [12] 朱广伟,陈英旭,王凤平,等. 城市河道底泥直接园林应用的初步研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(1):47-48.
- [13] 林莉,李青云,吴敏. 河湖疏浚底泥无害化处理和资源化利用研究进展[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10):80-88.
- [14] PARK J, SON Y, NOH S, et al. The suitability evaluation of dredged soil from reservoirs as embankment material [J]. Journal of environmental management, 2016, 183:443-452.
- [15] 杨丹,范欣柯,刘燕,等. 河道疏浚底泥农业利用可行性分析[J]. 科技通报, 2017, 33(1):235-239.
- [16] 赵艳民,秦延文,曹伟,等. 洞庭湖表层沉积物重金属赋存形态及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(3):572-580.

(上接第 42 页)

- [12] 陈柔屹,唐祈林,蔡延昭,等. 刈割方式对饲草玉米 SAUMZ1 产量和饲用品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2007, 25(3):244-248.
- [13] 冯海生,李春喜,白生贵,等. 8 个甜高粱品种在西宁地区的比较试验[J]. 农业科学, 2012, 29(1):97-100.
- [14] 张玉霞,李珍,朱爱民,等. 不同饲用高粱品种苗期抗旱生理特性研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2020, 35(1):69-74.
- [15] 崔祿,张玉霞,苏日古嘎,等. 紫花苜蓿品种种子萌发期的耐盐碱能力分析[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, 29(3):310-314.
- [16] 刘玲,孟淑春. 2012 版《国际种子检验规程》修订通报[J]. 核农学报, 2012, 26(5):762-763.

- [17] 方小红,彭渤,宋照亮,等. 洞庭湖“四水”入湖河床沉积物重金属污染特征[J]. 地球化学, 2019, 48(4):378-394.
- [18] 盛维康,侯青叶,杨忠芳,等. 湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5):2230-2240.
- [19] ZHANG Z X, LU Y, LI H P, et al. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Ziji River, China [J]. The science of the total environment, 2018, 645:235-243.
- [20] 刘春早,黄益宗,雷鸣,等. 重金属污染评价方法(TCLP)评价资江流域土壤重金属生态风险[J]. 环境化学, 2011, 30(9):1582-1589.
- [21] 刘甜田,何滨,王亚韩,等. 改进 BCR 法在活性污泥样品重金属形态分析中的应用[J]. 分析试验室, 2007, 26(S1):17-20.
- [22] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 1969, 2:108-118.
- [23] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8):975-1001.
- [24] 丁振华,贾洪武,刘彩娥,等. 黄浦江沉积物重金属的污染及评价[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(2):64-66, 119.
- [25] 丁玮,陈新跃,南茂才. 湘江株洲段河流沉积物的重金属污染评价[J]. 广州化工, 2019, 47(7):123-126.
- [26] 乔胜英,蒋敬业,向武,等. 武汉地区湖泊沉积物重金属的分布及潜在生态效应评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3):353-357.
- [27] 王文才,唐春燕,张恒军,等. 不确定背景值下浅水湖泊沉积物重金属生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9):3982-3988.
- [28] 徐争启,倪师军,虞先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115.
- [29] 侯月卿,赵立欣,孟海波,等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11):205-215.
- [30] WANG X K, ZHENG G D, CHEN T B, et al. Effect of phosphate amendments on improving the fertilizer efficiency and reducing the mobility of heavy metals during sewage sludge composting [J]. Journal of environmental management, 2019, 235:124-132.
- [31] 曹鹏,朱恩榕. 一种改性蒙脱石材料对农田污染土中重金属 Zn 的钝化应用研究[J]. 广东化工, 2017, 44(6):61-63.
- [32] GUILLÉN M T, DELGADO J, ALBANESE S, et al. Heavy metals fractionation and multivariate statistical techniques to evaluate the environmental risk in soils of Huelva Township (SW Iberian Peninsula) [J]. Journal of geochemical exploration, 2012, 119/120:32-43.
- [33] 刘春早. 湖南省主要流域土壤重金属污染及潜在风险评价[D]. 保定:河北农业大学, 2011.
- [34] SHOMAR B H. Trace elements in major solid-pesticides used in the Gaza Strip [J]. Chemosphere, 2006, 65(5):898-905.
- [35] JØRGENSEN N, LAURSEN J, VIKSNA A, et al. Multi-elemental EDXRF mapping of polluted soil from former horticultural land [J]. Environment international, 2005, 31(1):43-52.
- [36] 曹磊,蔚阳,刘阳,等. 黑臭底泥中重金属分布特征及其潜在生态风险评价[C]//管运涛. 2019 中国环境科学学会科学技术年会议论文集(第三卷). 北京:中国环境科学学会, 2019.
- [37] 唐春江,舒畅,唐常青,等. 浅谈益阳地区农产品重金属污染的现状、来源及对策[J]. 作物研究, 2014, 28(8):905-908.
- [38] 曾拓天,田野,邓武军. 推动地方产业高质量发展“十四五”规划研究:以湖南省益阳市为例[J]. 中国工程咨询, 2019(9):98-100.
- [39] USTAÖĞLU F, ISLAM M S. Potential toxic elements in sediment of some rivers at Giresun, Northeast Turkey: A preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk [J/OL]. Ecological indicators, 2020, 113 [2020-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106237>.

- [17] 李倩,刘晓,岳明,等. 干旱和盐胁迫对华山新麦草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(2):319-324.
- [18] 于崧,张婷婷,于立河,等. 盐碱胁迫对小麦种子萌发特性的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(2):20-27.
- [19] 王佳珍,刘倩,高娅妮,等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16):5565-5577.
- [20] 闫改各,周建. 外源水杨酸对盐碱胁迫下海滨锦葵生长、Na⁺富集与转运的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2019, 47(4):10-15.
- [21] 杜利霞,董宽虎,夏方山,等. 盐胁迫对新麦草种子萌发特性和生理特性的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(6):789-794.
- [22] 贾亚雄,李向林,袁庆华,等. 披碱草属野生种质资源苗期耐盐性评价及相关生理机制研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10):2999-3007.