

孟楠, 安平, 王萌, 等. 基于典型污灌区土壤筛选耐盐、Cd 低吸收小麦品种[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 409–414.

MENG Nan, AN Ping, WANG Meng, et al. Screening low-Cd wheat cultivars characterized with high salinity tolerance for typical sewage irrigation soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 409–414.

基于典型污灌区土壤筛选耐盐、Cd 低吸收小麦品种

孟楠¹, 安平², 王萌¹, 陈莉³, 郑涵¹, 陈世宝^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 2. 南京中船绿洲环保有限公司, 南京 210039; 3. 北京市农林科学院植物保护环境保护研究所, 北京 100097)

摘要: 为了在污灌区重金属污染农田筛选同时具有耐盐与重金属低吸收特点的作物品种, 采集了污灌区 Cd 污染农田土壤, 添加 0.4% NaCl 平衡 14 d 后, 利用盆栽实验测定不同小麦的耐盐指数与 Cd 富集系数, 结合物种敏感性分布(SSD)模型对耐盐、Cd 低吸收小麦品种进行筛选。研究结果表明: 盐分胁迫对 10 种小麦的生长抑制程度具有明显差异, 其中, 中麦 415 与中优 206 受抑制程度最为明显, 耐盐指数分别为 0.542 和 0.591, 而中优 9507 与中麦 996 植株生长正常; 不同小麦耐盐指数大小依次为中优 9507 ≈ 中麦 996 > 轮选 1690 > 轮选 987 > 中麦 1062 > 中麦 175 > 中麦 14 > 中麦 816 > 中优 206 > 中麦 415。不同小麦茎叶与根对 Cd 的富集系数间存在较大差异; 不同小麦茎叶对 Cd 富集系数为 0.338(中麦 996)~0.970(中优 206), 小麦根对 Cd 富集系数范围为 3.01(中麦 1062)~5.71(中麦 14)。基于茎叶 Cd 富集系数(1/BCF)的 SSD 顺序为中麦 996 > 轮选 1690 > 中麦 415 > 中麦 1062 > 中麦 175 > 中优 9507 > 中麦 816 > 中麦 14 > 轮选 987 > 中优 206。基于 Cd 富集系数(1/BCF)与耐盐指数的物种敏感性分布频次, 筛选出了同时具有耐盐胁迫与 Cd 低吸收特点的小麦品种分别为中麦 996 与轮选 1690。研究结果可为盐分胁迫条件下 Cd 污染土壤的安全利用提供参考依据。

关键词: 镉; 污染土壤; 盐分胁迫; 物种敏感性分布; 小麦

中图分类号: S512.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)03-0409-06 doi:10.11654/jaes.2017-1237

Screening low-Cd wheat cultivars characterized with high salinity tolerance for typical sewage irrigation soils

MENG Nan¹, AN Ping², WANG Meng¹, CHEN Li³, ZHENG Han¹, CHEN Shi-bao^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. CSSC Nanjing Lvzhou Environment Protection Co., Ltd, Nanjing 210039, China; 3. Institute of Plant Protection and Environment Protection, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: High salinity and heavy metal pollution are the main limiting factors of improving grain yield which can affect the grain quality of sewage irrigation field soils. Screening low-metal-uptake crop cultivars characterized with high salt tolerance can be important to safe cultivation in irrigation field soils polluted with heavy metals. In this study, a sewage irrigation field soil polluted by Cd was collected, the soil was artificially salinized with 0.4% NaCl (m/m) solution and incubated for 14 d before use, and then pot experiments were conducted to screen low-Cd-uptake wheat cultivars characterized with high salinity tolerance using the species sensitivity distribution model (SSD). The results indicated that significant difference ($P < 0.05$) was observed for the growth inhibition from salt stress among the 10 wheat cultivars, with obvious growth inhibition observed for the wheat cultivars Zhongmai415 and Zhongyou206. The measured salt tolerance index (STI) values for Zhongmai415 and Zhongyou206 were 0.542 and 0.591, respectively; However, no growth inhibition was observed for Zhongmai996 and Zhongyou9507. The measured salt tolerance index values for the wheat cultivars followed the order: Zhongyou9507 ≈ Zhongmai996 > Lunxuan1690 > Lunxuan987 > Zhongmai1062 > Zhongmai175 > Zhongmai14 > Zhongmai816 > Zhongyou206 > Zhongmai415. Significant differences in bioconcentration factors (BCFs) of Cd by shoots and roots were also observed between wheat cultivars. The BCFs of Cd by shoots ranged from 0.338 (Zhongmai996) to 0.970 (Zhongyou206). In terms of roots, the BCFs of Cd by roots ranged from 3.01 (Zhongmai1062) to 5.71 (Zhongmai14). The distribution frequency based on the BCFs of shoots among wheat cultivars followed the order:

收稿日期: 2017-09-11 录用日期: 2017-12-05

作者简介: 孟楠(1994—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 从事重金属污染土壤修复研究。E-mail: 1476010949@qq.com

* 通信作者: 陈世宝 E-mail: chenshibao@caas.cn

基金项目: 国家支撑计划课题(2015BAD05B03); 国家重点研发计划项目(2016YFD0800707, 2017YFD0800900)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD05B03); The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2016YFD0800707, 2017YFD0800900)

Zhongmai996> Lunxuan1690> Zhongmai415> Zhongmai1062> Zhongmai175> Zhongyou9507> Zhongmai816> Zhongmai14> Lunxuan987> Zhongyou206. By combing the distribution frequency of bioconcentration factors (1/BCF) and salt tolerance index, Zhongmai996 and Lunxuan1690 were screened as the wheat cultivars characterized with low Cd accumulation and high salt tolerance. These results are of importance for safe utilization of sewage irrigation field soil polluted by Cd.

Keywords: cadmium; polluted soils; salinity stress; species sensitive distribution(SSD); wheat cultivars

由于我国北方资源性缺水和南方水质性缺水,污水常被用于农业灌溉,由污灌引起的农田重金属污染已成为我国农田重金属的主要污染源之一^[1]。目前,我国 140 万 hm^2 的污灌农田中,有 30% 的农田土壤受不同程度的重金属污染,尤其是辽宁、河北、天津等北方旱作地区及湘江流域等南方水旱轮作区^[2-4]。目前,重金属超标农田引起的农产品质量安全已引起广泛关注,继“镉米”之后,“镉麦”问题再次成为环境领域关注的焦点问题之一。朱桂芬等^[5]对河南新乡市庄顶污灌区土壤及小麦籽粒中 Cd 含量进行监测,发现小麦籽粒 Cd 污染严重,平均含量为 $2.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过《国家食品卫生标准》(GB 2762—2012) 25.5 倍;熊孜等^[6]对黄淮海区域小麦籽粒 Cd 调查发现,河南济源污灌区小麦籽粒 Cd 含量范围为 $0.119 \sim 0.151 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.132 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,籽粒 Cd 超标率为 100%。本课题组对河北某污灌区小麦-玉米轮作区小麦籽粒中 Cd 检测结果表明(数据未发表),该污灌区小麦籽粒 Cd 含量点位超标率达到 75%,最高超标 12.6 倍。可见污灌区 Cd 污染土壤引起的农产品安全问题已经凸显,加强污灌区 Cd 污染土壤修复与风险控制研究对 Cd 污染土壤的安全利用具有重要意义。除了重金属超标外,污灌土壤一般具有盐基饱和度较高带来的盐渍化、土壤呈碱性等特点^[1]。目前,针对小麦对土壤中 Cd 吸收、转运机制及其影响因子的研究已有大量的报道,而针对在盐分胁迫条件下,Cd 污染土壤中不同小麦对 Cd 的吸收、转运差异及基于富集系数与耐盐指数的物种敏感性差异研究鲜见报道。在重金属超标农田的修复技术研究中,重金属低吸收作物品种的筛选、选育与田间应用技术是当前我国农田重金属污染修复研究的前沿之一。

本研究针对污灌区土壤常具有高盐基饱和度、盐分胁迫的特点,采集了河北某典型污灌区农田土壤,在外源添加 0.4% NaCl 后平衡 14 d,制备成中度盐分胁迫土壤基础上^[7-8],结合最新的物种敏感性分布(Species sensitive distribution, SSD)模型,以不同小麦对 Cd 富集系数与耐盐指数的物种敏感性频次差异,筛选出耐盐、Cd 低吸收的小麦品种,为该地区 Cd 超

标污灌农田的安全利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与小麦

供试土壤采集于河北省保定某典型污灌区农田表层(0~20 cm)褐土。该地区污水类型主要为城市工业和生活混合污水,为 V 类及 V 类以下水质,水体污染物主要为 BOD_5 、COD、氯化物、氯离子、悬浮物、硫化物,此外还有镉、汞、铬、砷等重金属。灌溉区轮作方式为小麦-玉米轮作。将采集的土壤风干后,过 2 mm 筛后进行基础理化性质测定^[9],结果显示,土壤 pH 值(1:2.5,水提)为 8.19,有机质 1.12%,土壤中阳离子交换量(CEC)为 $16.7 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤中 Cd 含量为 $1.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,按照我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中二级标准值^[10],Cd 单项污染指数 $P_i=2.2$,为 Cd 中度污染土壤。为了模拟土壤盐分胁迫条件,参照文献[7]方法,以外源添加 NaCl 溶液的形式对部分土壤进行盐处理,处理水平为 0.40% ($m_{\text{盐}}/m_{\text{土}}$),充分搅拌均匀后,在 70% 最大田间持水量(70% MWHC)水平老化平衡 14 d 后进行实验。

供试小麦为我国北方主栽冬小麦品种,分别为轮选 1690、中麦 415、中麦 175、轮选 987、中麦 816、中麦 1062、中麦 14、中麦 996、中优 206、中优 9507,共计 10 个品种,小麦品种购自北京和保定的种子公司。

1.2 实验处理

实验采用室内盆栽方法。选取不同小麦种子,经 5% 次氯酸钠溶液浸泡 15 min 后,用蒸馏水清洗,移入铺有灭菌滤纸的培养皿中浸泡,在 32 °C 无光照下放置 36~48 h,待胚根长至约 2 mm,移至已备好的种植盆中。每盆装土 1.0 kg,每盆 10 粒种子,7 d 后每盆留 3 株苗,共设 20 个处理,每个处理 3 次重复,置于控温温室培养 49 d 后收获,冲洗干净,将植株分为根、茎叶,烘干至恒重待测。

1.3 土壤盐分胁迫特征测定

为了对污灌区土壤的盐分胁迫特征进行测定,本实验测定了污灌区土壤及盐处理后土壤溶液的离子组成等特征。土壤溶液的提取按照文献[11]方法进行:

称取不同处理土壤 20 g 于垫有玻璃棉的过滤针筒中,向土壤中添加蒸馏水至 100% 的最大田间持水量后,将装有不同处理土壤的针筒,放入底部有 PVC 圆圈的 50 mL 离心管中,平衡 24 h 后,于 $4500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,将滤液通过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜后,放置冰箱中待测。溶液中离子组成利用离子色谱仪进行测定^[12]。

1.4 土壤与植物 Cd 含量测定

土壤样品 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 消化,作物样 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消化,土壤与小麦植株消解液中 Cd 含量利用 ICP-MS 测定^[13]。

1.5 数据的处理

物种敏感性分布 (Species sensitivity distribution, SSD) 模型是一种基于不同物种对污染物敏感性的差异,以急性或慢性毒理数据为基础,构建统计分布的生态风险评价模型^[14]。SSD 的基本假设是一组生物的敏感性能被一个分布所描述,如正态分布、Logistic 分布等,而可获得的毒理数据被认为是来自于这个分布的样本^[15]。本文中基于小麦 Cd 富集系数与生物量的敏感性分布模型,采用 Burr-III 型分布函数进行拟合,Burr-III 是一种灵活的分布函数,对物种敏感性数据拟合特性较好。澳大利亚联邦科学和工业研究组织提供了该方法的说明以及相关的计算软件 BurrlizO (CSIRO, 2008)。

Burr-III 型函数的参数方程为:

$$F(x) = \frac{1}{[1 + (\frac{b}{x})^c]^k}$$

式中: $F(x)$ 为不同小麦累积频次, x 为土壤中 Cd 的浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; b 、 c 、 k 为函数的 3 个参数。

文中测定的数据采用新复极差法 (Duncan 法) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$), 应用 Excel 2007、SPSS

22.0 和 Origin 9.0 进行数据分析和作图。

2 结果与讨论

2.1 土壤溶液的离子组成

经过 0.4% NaCl 处理后土壤溶液中离子组成的测定结果 (表 1) 表明, 土壤溶液中自由 Na^+ 和 Cl^- 的含量显著增加, 其中溶液自由 Na^+ 浓度增加了 896%, Cl^- 浓度增加了 379%, 溶液中自由 Ca^{2+} 浓度也增加了 105.1%。在盐分胁迫处理中, 土壤溶液的电导率也显著增加, 由 $47.1\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 增加到 $267.2\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。从土壤溶液离子组成与 pH 值来看, 土壤盐基离子组成中 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 等离子含量相对较高, 具备了盐渍化土壤所具有的盐分胁迫与碱性的特征^[16]。

2.2 不同小麦耐盐指数

在同一盐分胁迫条件下, 不同品种小麦受盐胁迫的抑制程度不同, 其中中麦 415 与中优 206 表现为生长缓慢, 植株矮小, 叶片发黄失绿, 而中麦 996 与中优 9507 生长表现正常。在作物耐盐反应研究中, 作物的生长指标通常被作为盐胁迫下作物的耐盐指数^[7]。本研究中, 将不同小麦的耐盐指数 (STI) 定义为: $\text{STI} = \text{盐化处理土壤中小麦生物量 (g)} / \text{对照土壤中小麦生物量 (g)}$ 。不同小麦的地上部分生物量及耐盐指数测定结果见表 2。不同小麦基于茎叶生物量的耐盐指数大小依次为中优 9507 $\approx$ 中麦 996 $>$ 轮选 1690 $>$ 轮选 987 $>$ 中麦 1062 $>$ 中麦 175 $>$ 中麦 14 $>$ 中麦 816 $>$ 中优 206 $>$ 中麦 415。研究表明, 地上部、根系生物量等指标可作为作物苗期耐盐鉴定指标^[7]。研究表明, 土壤中的盐分, 可以导致土壤溶液渗透压增加, 造成小麦根系吸水困难, 致使植物生理性干旱, 甚至会导致植物死亡^[17-19]。另外, 植物吸收过多的盐分, 一方面导致气孔

表 1 土壤溶液性质与离子含量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 1 Basic properties and anions/cations contents of the soil solution ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

土壤	pH 值	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	NO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Br^-	F^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
处理前	8.19 $\pm$ 0.23	47.1 $\pm$ 2.5	36.9 $\pm$ 4.1	146.8 $\pm$ 11.2	37.4 $\pm$ 0.7	3.55 $\pm$ 0.2	5.82 $\pm$ 0.6	12.7 $\pm$ 1.3	3.17 $\pm$ 0.2	13.7 $\pm$ 0.8	24.0 $\pm$ 1.3
处理后	8.14 $\pm$ 0.17	267.2 $\pm$ 9.3	52.7 $\pm$ 6.5	139.4 $\pm$ 21.0	179.2 $\pm$ 6.8	2.17 $\pm$ 0.5	6.32 $\pm$ 0.8	126.5 $\pm$ 7.5	5.89 $\pm$ 0.6	28.1 $\pm$ 1.4	31.6 $\pm$ 2.5

注: 表中数据为 3 次测定的平均值 $\pm$ 标准误差。

表 2 不同小麦茎叶生物量及耐盐指数

Table 2 Shoot biomass and salt tolerance index (STI) of different wheat cultivars

小麦	轮选 1690	中麦 415	中麦 175	轮选 987	中麦 816	中麦 1062	中麦 14	中麦 996	中优 206	中优 9507
茎叶生物量/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}\text{DW}$	0.692b	0.461f	0.585cd	0.693b	0.555d	0.609e	0.519e	0.726a	0.494ef	0.731a
耐盐指数	0.953a	0.542e	0.707bc	0.811b	0.655d	0.764b	0.680cd	1.001a	0.591e	1.012a

注: 表中数据为 3 次测定的平均值; 同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

导度降低,作物的光合作用减少;另一方面作物吸收过多的 Na^+ 、 Cl^- 等,不仅会导致叶片过早脱落,还会导致营养元素失衡^[19-21]。在盐分胁迫下,植物受到最直接的伤害就是胞间大量的 Na^+ 带来的离子毒性,而这种离子毒性直接影响植物叶片的光合作用,从而影响植物的生长;另外,植物吸收过量的 Na^+ 后,也会引起细胞渗透压的加大和氧化酶活性增加,最终导致 DNA 损伤^[22]。虽然由于品种间的差异可能导致小麦生物量的不同,但盐胁迫下植株生长状况及生物量大小,可作为辅助指标综合判断不同小麦品种的耐盐胁迫能力。

2.3 小麦对 Cd 的富集与转运系数

本文中不同小麦茎叶与根对 Cd 的富集系数(Bioconcentration factor, BCF)定义为作物茎叶/根中 Cd 的浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与土壤中 Cd 浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的比值。从图 1 可以看出,10 种不同小麦茎叶与根对 Cd 的富集系数间存在较大差异,其中小麦茎叶对 Cd 富集系数为 0.338~0.970,不同小麦茎叶 Cd 富集系数大小顺序为:中优 206>轮选 987>中麦 14>中麦 816>中优 9507≈中麦 175≈中麦 1062>中麦 415>轮选 1690>中麦 996;小麦根对 Cd 富集系数范围为 3.01~5.71,不同小麦根部 Cd 富集系数大小顺序为:中麦 14>轮选 987>中优 9507>中麦 175>轮选 1690>中麦 996>中麦 415>中麦 816≈中麦 1062>中优 206。富集系数反映了植株不同部位积累土壤中 Cd 的能力,而根-茎叶转运系数(Transfer factor, TF)则反映了 Cd 从植物体根部向地上部(茎叶)的迁移能力。本文中根-茎叶转运系数(TF_{r-s})定义为茎叶中 Cd 的浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与根中 Cd 的浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的比值。

对不同小麦根-茎叶 Cd 的转运系数测定结果(图 2)表明,10 种不同小麦根-茎叶 Cd 转运系数范围在 0.092~0.334 之间;最小转运系数为中麦 996,最大转运系数为中优 206。

2.4 不同小麦基于富集系数与耐盐指数的 SSD 分布曲线

物种敏感性分布模型是基于统计学外推法原理,描述单一或复合污染对一系列物种的毒性大小,包括某一类生物序列、一部分选定物种的组合或自然群落等。SSD 模型可以从污染物环境浓度出发,根据不同物种对于污染物敏感性的差异,计算潜在影响比例(Potential affected fraction, PAF),用以表征生态系统或者不同类别生物的生态风险;亦可以反向应用于确定一定比例保护物种条件下的污染物浓度。目前 SSD

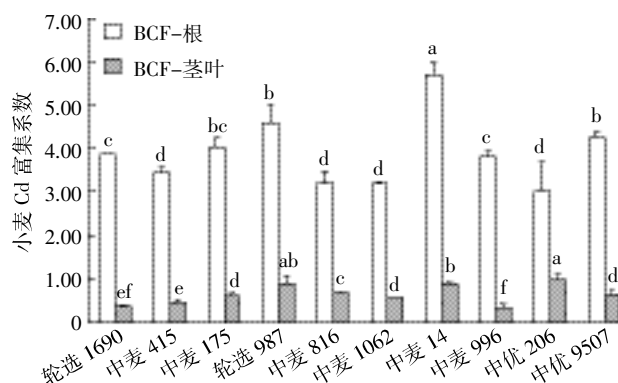


图 1 不同小麦品种茎叶与根对 Cd 的富集系数
Figure 1 Cd bio-concentration factors of shoots and roots for different wheat cultivars

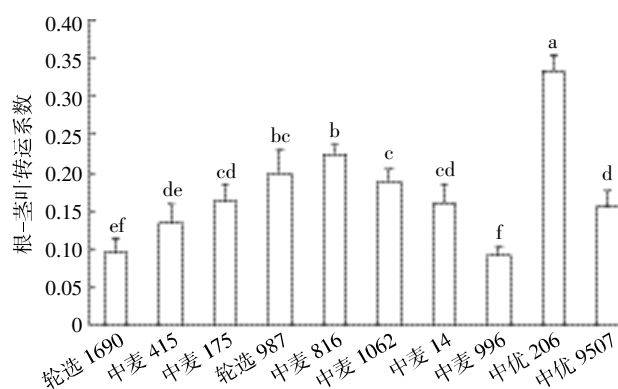


图 2 不同小麦根-茎叶 Cd 转运系数
Figure 2 Cd transfer factors of root to shoot for different wheat cultivars

法已被多个国家或机构确立为生态风险评价与推导环境中污染物基准值的主要方法^[23-25]。针对 SSD 曲线构建的累积概率分布函数,目前主要包括 Log-normal、Log-logistic、Weibull、Gamma 及 Burr-III 等^[26]。研究表明,Burr-III 是一种灵活性高的三参数分布,因此本文将不同小麦对盐分胁迫下对 Cd 的富集系数(1/BCF)及耐盐指数采用 Burr-III 分布函数进行拟合,建立不同小麦对 Cd 吸收及耐盐胁迫的敏感性分布曲线(图 3),以此筛选同时具有耐盐胁迫与 Cd 低吸收特性的小麦品种。实验结果表明,10 种不同小麦对 Cd 富集系数(1/BCF)及耐盐指数大小分布频次可以用 Burr-III 分布曲线进行较好的拟合,基于富集系数和耐盐指数的实测值与 Burr-III 拟合函数预测值计算的均方根误差(RMSE)分别为 6.33 及 7.82。从图 3 可以看出,基于富集系数(1/BCF)的 SSD 顺序依次为中麦 996>轮选 1690>中麦 415>中麦 1062>中麦 175>中优 9507>中麦 816>中麦 14>轮选 987>中优 206。

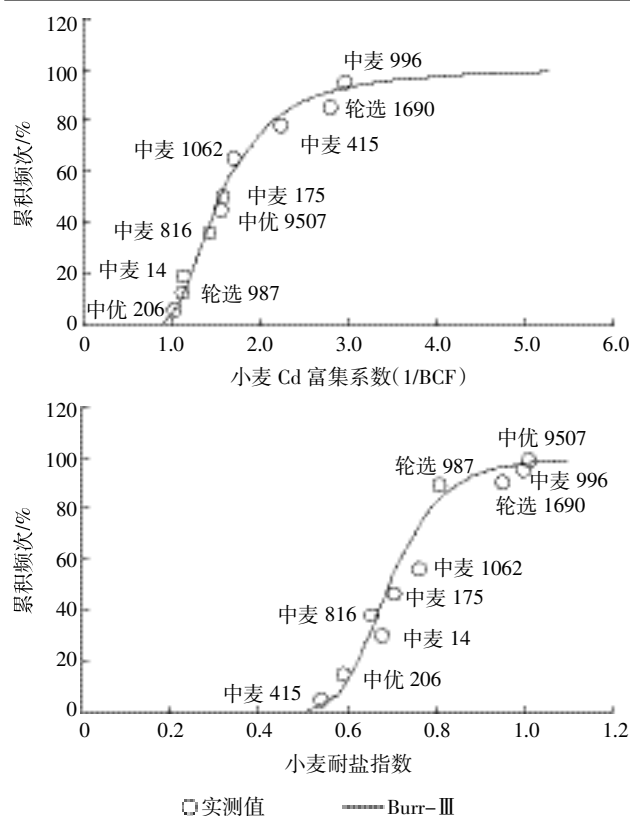


图3 基于小麦Cd富集系数(1/BCF)与耐盐指数的物种敏感性分布(SSD)曲线

Figure 3 SSD curves based on Cd bio-concentration factors and salt tolerance index for different wheat cultivars

从图3盐分胁迫下不同小麦耐盐指数的敏感性频次分布曲线可以看出,基于耐盐指数的SSD顺序依次为中优9507>中麦996>轮选1690>轮选987>中麦1062>中麦175>中麦816>中麦14>中优206>中麦415。通过比较不同小麦富集系数与耐盐指数的敏感性分布频次发现,对于少数小麦品种而言,基于小麦Cd富集系数与耐盐指数的分布频次顺序有较大差异,如轮选987品种在富集系数分布频次中位于X轴的左前方,而在耐盐指数分布频次中则位于X轴右后位置;中优9507在富集系数分布频次中位于X轴左中部位置,而在耐盐指数分布频次中,由于具有较高的耐盐指数而位于X轴最右位置;中麦415虽然具有较小的Cd富集系数,但在盐分胁迫下小麦的生长受到明显抑制,在基于耐盐指数的分布频次中处于最敏感的X轴左侧,以上结果说明,相同小麦品种基于不同的评价指标所得出的敏感性分布频次的顺序可能存在较大差异。在污灌区土壤的安全利用上,同时具备耐盐与Cd低吸收特性小麦的筛选具有重要意义。在本实验中,从小麦Cd富集系数与生物量

两个因子综合考虑,中麦996与轮选1690不但具有较低的Cd富集系数,而且植株生长没有受到抑制,具有较好的耐盐胁迫特征。本研究结果表明,同时以富集系数与耐盐指数可以较好地作为生态风险评估的指标^[27-29],其筛选结果的逻辑性也为在污灌区土壤的修复技术应用提供了可能。

3 结论

(1)盐分胁迫对10种小麦的生长抑制程度具有明显差异;不同小麦耐盐指数范围为0.542~1.012。

(2)不同小麦茎叶与根对Cd的富集系数间存在较大差异,其中,小麦茎叶对Cd富集系数为0.338~0.970,根对Cd富集系数为3.01~5.71。

(3)基于Cd富集系数(1/BCF)与耐盐指数的物种敏感性分布频次,筛选出具有耐盐胁迫与Cd低吸收特点的小麦品种分别为中麦996与轮选1690。

参考文献:

- [1] 何俊,王学东.典型污灌区土壤中Cd的形态有效性及其影响因素[J].中国环境科学,2016,36(10):3056-3063.
HE Jun, WANG Xue-dong. The forms, bioavailability of Cd in soils of typical sewage irrigation fields in Northern China and its control factors [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10):3056-3063.
- [2] 宋志廷,赵玉杰,周其文,等.基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析[J].环境科学,2016,37(7):2756-2762.
SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, et al. Applications of geostatistical analyses and stochastic models to identify sources of soil heavy metals in Wuqing District, Tianjin, China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7):2756-2762.
- [3] 李中阳,齐学斌,樊向阳,等.不同钝化材料对污灌农田镉污染土壤修复效果研究[J].灌溉排水学报,2016,35(3):42-44.
LI Zhong-yang, QI Xue-bin, FAN Xiang-yang, et al. Remediation of cadmium polluted soils by different amendments[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(3):42-44.
- [4] 陈涛,常庆瑞,刘京,等.长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评估[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2152-2159.
CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2152-2159.
- [5] 朱桂芬,张春燕,王建玲,等.新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征研究[J].农业环境科学学报,2009,28(2):263-268.
ZHU Gui-fen, ZHANG Chun-yan, WANG Jian-ling, et al. Investigation of heavy metal pollution in soil and wheat grains in sewage-irrigated area in Sizhuangding, Xinxiang City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2):263-268.
- [6] 熊孜,赵会薇,李菊梅,等.黄淮海平原小麦吸收镉与土壤可浸提

- 镉间关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12):2275-2284.
- XIONG Zi, ZHAO Hui-wei, LI Ju-mei, et al. The relationship between cadmium in wheat plant and cadmium extracted by EDTA and diluted acids in soil in Huanghuaihai Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12):2275-2284.
- [7] 张智猛, 慈敦伟, 丁红, 等. 花生品种耐盐性指标筛选与综合评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12):3487-3494.
- ZHANG Zhi-meng, CI Dun-wei, DING Hong, et al. Indices selection and comprehensive evaluation of salinity tolerance for peanut varieties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12):3487-3494.
- [8] 陈玉梅. 重金属低积累蔬菜种类筛选及盐胁迫下蔬菜对土壤重金属累积研究[D]. 杭州师范大学, 2016.
- CHEN Yu-mei. Selection of low accumulation of heavy metals in vegetable varieties and accumulation of heavy metals in vegetable under salt stress[D]. Hangzhou Normal University, 2016.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [10] 环境保护部. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- Ministry of Environmental Protection. GB 15618—1995. Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Standard Press, 1995.
- [11] 田昕竹, 陈世宝. 土壤溶液性质对 Zn 的形态变化及其微生物毒性的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10):2602-2609.
- TIAN Xin-zhu, CHEN Shi-bao. Influence of soil solution properties on the transformation of Zn forms and its toxicity threshold to soil microbes as determined by substrated induced nitrification[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(10):2602-2609.
- [12] 牟世芬, 刘克纳. 离子色谱方法及应用[M]. 二版. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- MOU Shi-fen, LIU Ke-na. Ion chromatography and its application[M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [13] Spark D L. Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods[M]. Madison: SSSA and ASA, 1996.
- [14] Posthuma L, Traas T P, Suter G W. General introduction to species sensitivity distributions[M]//Posthuma L, Traas T P, Suter G W. Species sensitivity distributions in ecotoxicology. Boca Raton: Lewis Publishers, 2002.
- [15] Wheeler J R, Grist E P M, Leung K M Y, et al. Species sensitivity distributions: Data and model choice[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45:192-202.
- [16] 张济世, 于波涛, 张金凤, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土壤理化性质和小麦生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3):704-711.
- ZHANG Ji-shi, YU Bo-tao, ZHANG Jin-feng, et al. Effects of different amendments on soil physical and chemical properties and wheat growth in a coastal saline soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3):704-711.
- [17] Farooq M, Hussain M, Wakeel A, et al. Salt stress in maize: Effects, resistance mechanisms, and management: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2):461-481.
- [18] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, et al. Plant cellular and molecular response to high salinity[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2000, 51:463-499.
- [19] Wang M, Xia G M. The landscape of molecular mechanisms for salt tolerance in wheat[J]. *The Crop Journal*, 2017. DOI:10.1016/j.cj.2017.09.002.
- [20] Karimi G, Ghorbanli M, Heidari H, et al. The effects of NaCl on growth, water relations, osmolytes and ion content in *Kochia prostrata*[J]. *Biologia Plantarum*, 2005, 49(2):301-304.
- [21] Turan M A, Elkarim A H A, Taban N, et al. Effect of salt stress on growth and ion distribution and accumulation in shoot and root of maize plant[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2010, 5(7):584-588.
- [22] Tabassum T, Farooq M, Ahmad R, et al. Seed priming and transgenerational drought memory improves tolerance against salt stress in bread wheat[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 118:362-369.
- [23] Fairbrother A, Wenstel R, Sappington K. Framework for metals risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68:145-227.
- [24] 王印. 基于物种敏感性分布(SSD)的生态风险评价方法及其应用研究[D]. 北京: 北京大学, 2009.
- WANG Yin. Ecological risk assessment method based on species sensitivity distribution(SSD) and its application research[D]. Beijing: Peking University, 2009.
- [25] European Commission. Final report on the ecological risk assessment of chemicals[R]. The Scientific Steering Committee, 2003.
- [26] 孔祥臻, 何伟, 秦宁, 等. 重金属对淡水生物生态风险的物种敏感性分布评估[J]. 中国环境科学, 2011, 31(9):1555-1562.
- KONG Xiang-zhen, HE Wei, QIN Ning, et al. Assessing acute ecological risks of heavy metals to freshwater organisms by species sensitivity distributions[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(9):1555-1562.
- [27] 孙聪, 陈世宝, 马义兵. 基于物种敏感性分布(Burr-III)模型预测 Cd 对水稻毒害的生态风险阈值 HC_s[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):2316-2322.
- SUN Cong, CHEN Shi-bao, MA Yi-bing, et al. Ecological hazard concentration(HC_s) of cadmium(Cd) to rice cultivars under hydroponic culture as determined with species sensitivity distribution model(Burr-III)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12):2316-2322.
- [28] 闫振广, 杨霓云, 王晓南, 等. 基于基因表达效应的物种敏感度分析初探[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5):673-679.
- YAN Zhen-guang, YANG Ni-yun, WANG Xiao-nan, et al. Preliminary analysis of species sensitivity distribution based on gene expression effect[J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 42(5):673-679.
- [29] 杜建国, 赵佳懿, 陈彬, 等. 应用物种敏感性分布评估重金属对海洋生物的生态风险[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(4):561-570.
- DU Jian-guo, ZHAO Jia-yi, CHEN Bin, et al. Assessing ecological risks of heavy metals to marine organisms by species sensitivity distributions[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(4):561-570.