

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.012

基于根伸长的典型叶类蔬菜 Se 生态风险

张忠恩¹, 李湘凌^{1,2}, 赵燕¹, 吴安云¹, 卢新哲^{3,4}, 魏迎春^{3,4}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 3. 自然资源部平原区农用地生态评价与修复工程技术创新中心, 浙江 杭州 311203; 4. 浙江省地质调查院, 浙江 杭州 311203)

摘要:为探究硒(Se)对叶类蔬菜的毒性效应,文章通过水培实验,以 18 种典型叶类蔬菜萌发期的相对根伸长(relative root elongation, RRE)作为评测终点,采用 Log-logistic、Hormesis 模型确定典型叶类蔬菜的 EC_{20} 、 EC_{50} , 基于 Burr-III 模型分析 18 种蔬菜 Se 敏感性差异并计算最大环境有害浓度(hazardous concentration for 5% of species, HC_5)。结果表明:部分蔬菜无 Se 兴奋效应,部分蔬菜具有 Se 兴奋效应,兴奋效应质量浓度范围为 0.1~5.0 mg/L, Se 对蔬菜 RRE 的兴奋效应和毒害性与蔬菜种类密切相关;品种大白菜中白(DBCZ)、生菜孔雀菜(SCKQ)和空心菜竹叶(KXCZ)表现出较强的 Se 耐性,而品种茼蒿板叶(THBY)、茼蒿圆叶(THYY)和苋菜圆叶(XCYY)表现出较强的敏感性。不同蔬菜的 Se 毒性阈值差异明显, EC_{20} 和 EC_{50} 范围分别为 0.48~10.59 mg/L 和 1.88~19.60 mg/L;兴奋效应显著影响蔬菜的剂量-效应关系,Se 兴奋效应组的模型参数(最大与最小 RRE 差值 a 、毒害性变化速率 b 、 EC_{20} 和 EC_{50})平均值显著大于无兴奋效应组;保护 95% 蔬菜的 20% 效应毒性阈值(HC_5^{20})和 50% 效应毒性阈值(HC_5^{50})分别为 0.29、1.20 mg/L,蔬菜种类对 HC_5 影响极大,敏感性品种缺失会导致 HC_5 显著提高,耐性品种缺失会一定程度上降低 HC_5 。

关键词:硒;物种敏感性分布;毒性阈值;叶类蔬菜

中图分类号:X592

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)03-0369-08

Ecological risk of Se in typical leafy vegetables based on root elongation

ZHANG Zhongen¹, LI Xiangling^{1,2}, ZHAO Yan¹,

WU Anyun¹, LU Xinzhe^{3,4}, WEI Yingchun^{3,4}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, China; 3. Technology Innovation Center of Ecological Evaluation and Remediation of Agricultural Land in Plain Area, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 311203, China; 4. Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China)

Abstract: To explore the toxic effect of selenium(Se) on leafy vegetables, the toxicity thresholds EC_{20} and EC_{50} of 18 typical leafy vegetables were determined using Log-logistic and Hormesis models through a hydroponic experiment with their relative root elongation(RRE) during seed germination as test endpoint. Based on the Burr-III model, the sensitivity differences of the 18 vegetables to Se were analyzed and hazardous concentration for 5% of species(HC_5) was calculated. The results showed that some vegetables had no excitatory effect of Se, while some vegetables presented an excitatory effect of Se, with a concentration range of 0.1-5.0 mg/L. The excitatory effect and toxicity of Se on the RRE of vegetables were closely related to vegetable species. The cultivars DBCZ, SCKQ and KXCZ were highly Se-tolerant, while THBY, THYY and XCYY were highly Se-sensitive. The Se toxicity thresholds of different vegetables were significantly different, with EC_{20} and EC_{50} ranging from 0.48 mg/L to 10.59 mg/L and 1.88 mg/L to 19.60 mg/L, respectively. The excitatory effect signifi-

收稿日期:2022-10-31;修回日期:2022-11-28

基金项目:浙江省重点研发计划资助项目(2021C04020);浙江省自然资源厅科技资助项目(2020-45)和浙江省地勘资金资助项目(2019007)

作者简介:张忠恩(1997—),男,安徽淮南人,合肥工业大学硕士生;

李湘凌(1969—),女,四川遂宁人,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:lixianling_hfut@126.com.

cantly affected the dose-effect relationship of vegetables. The averages of model parameters, including the difference between the maximum and minimum values of $RRE(a)$, the rate of toxic change(b), EC_{20} and EC_{50} , in the excitatory effect group were significantly higher than those in the non-excitatory effect group. The 20% toxicity threshold(HC_5^{20}) and 50% toxicity threshold(HC_5^{50}) protecting 95% vegetables were 0.29 mg/L and 1.20 mg/L, respectively. Vegetable species had a great impact on HC_5 . The lack of sensitive species would lead to a significant increase in HC_5 , while the lack of tolerant species would reduce HC_5 to a certain extent.

Key words: selenium(Se); species sensitivity distribution; toxicity thresholds; leafy vegetables

0 引 言

硒(Se)是人类必需的微量营养元素,能有效提高人体的免疫力^[1]。目前,我国有 72%的地区处于缺硒和低硒状态,膳食是人体摄入 Se 最为有效和安全的途径,富硒蔬菜等农产品尤其是天然富硒农产品是未来健康补硒首选^[2-3]。因此,充分利用富硒土壤资源,大力发展富硒蔬菜等特色农业,助力乡村振兴成为地方工作的关注热点。

蔬菜生长过程中,一定质量浓度范围内的 Se 可增强蔬菜抗氧化能力和抗逆性^[4-5],提高作物的营养品质^[6];当超出该质量浓度范围,Se 可降低植物体内抗氧化活性、引起氧化应激、抑制光合作用以及过多的硒代半胱氨酸会代替半胱氨酸参与蛋白质的合成^[7-10],对蔬菜的生长产生毒害作用,降低其产量和品质,影响富硒蔬菜产业的发展。不同蔬菜对 Se 的敏感性不同,Se 适宜质量浓度范围存在较大差异,而现有研究大多关注硒对特定作物的毒性效应,缺乏 Se 对典型叶类蔬菜毒害性的系统研究。因此加强蔬菜的 Se 毒性效应的系统性研究、确定蔬菜的 Se 生态风险阈值(毒性阈值)对富硒蔬菜生产具有积极意义。

物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD)考虑了生物多样性和生态系统的完整性,具有高置信度,被美国、欧盟等多个国家和地区确立为制定生态风险阈值的方法^[11]。该方法是基于研究对象对同一污染物敏感性的差异,以多个有代表性物种的急性或慢性毒性数据为基础,基于 Log-logistic、Burr-III 和 Log-normal 等不同统计分布函数拟合并评估环境浓度下污染物对生态系统的风险,从而获得保护 95%的物种不受影响情况下所允许的最大环境有害浓度(hazardous concentration for 5% of species, HC_5)^[12-13]。其中, Burr-III 分布函数因具有灵活性、拟合特性好等优点,在污染物生态风险阈值建

立与评价中应用较为普遍。

本文通过培养皿滤纸法^[14]选择 18 种叶类蔬菜作为研究对象,以蔬菜种子萌发期根伸长为表征终点^[15-17],开展蔬菜的 Se 毒性剂量效应研究,运用 SSD 推导出基于保护 95%叶类蔬菜品种的毒性阈值,对富硒蔬菜的实际生产具有一定的指导意义。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试试剂:亚硒酸钠(Na_2SeO_3)。

供试蔬菜:大白菜中白(DBCZ),大白菜青麻叶(DBCQ),菜心广东四九(CXGD),菜心青野尖叶(CXQY),空心菜柳叶(KXCL),空心菜竹叶(KXCZ),茼蒿圆叶(THYY),茼蒿板叶(THBY),苋菜圆叶(XCYY),苋菜柳叶(XCLY),油麦菜绿叶(YMCL),油麦菜红叶(YMCH),油菜苏州青(YCSZ),油菜抗热(YCKR),生菜孔雀菜(SCKQ),生菜抗病(SCKB),奶油高产(NYGC),奶油速生(NYSS)。其中:DBCZ、DBCQ、CXGD、CXQY、YCSZ、YCKR、NYGC 和 NYSS 均为十字花科;YMCL、YMCH、SCKQ、SCKB、THYY 和 THBY 为菊科;KXCL 和 KXCZ 为旋花科;XCYY 和 XCLY 为苋科。种子购于上海农乐种植有限公司等多家种子公司。

1.2 实验方法

本文使用培养皿滤纸法^[14]来评价 Se 对不同蔬菜发芽的影响,研究 Se 作用下 18 种蔬菜萌发的根伸长。设置实验添加的 Se 质量浓度分别为 0、0.1、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0、40.0、60.0 mg/L,每个质量浓度设置 3 个重复。先用去离子水洗净种子,将种子于体积分数为 3%的 H_2O_2 中浸泡 30 min 消毒并打破休眠,再洗净种子并浮选处理;把 30 粒饱满种子均匀播种在培养皿中,加入 Se 溶液,将盖好的培养皿置于 RGX-350ES 人工气候培养箱(河北博汇仪器有限公司)

中培养 7 d^[15,18-19],培养条件为无光照、温度 26 ℃、相对湿度 75%,测定根长度并计算不同 Se 质量浓度下的平均根伸长,以对照组(不添加 Se)的根伸长为基准,计算相对根伸长(relative root elongation,RRE)。

1.3 低剂量刺激效应曲线模型

当低质量浓度 Se 对植物产生刺激效应时,相关模型不能很好地拟合实验数据,因此采用 Hormesis 模型^[20]进行毒性效应拟合,拟合方程为:

$$Y = \frac{a + dX}{1 + \left[\frac{k}{100 - k} + b \frac{100}{a(100 - k)} \right] \exp\left(b \ln \frac{X}{c}\right)} \quad (1)$$

其中:Y 为各个处理水平的蔬菜 RRE;a 为拟合最大与最小 RRE 的差值;b 为曲线在 EC₅₀ 处的斜率;d 为低剂量时的 RRE 增加速率;k 为效应比例;c 为 EC₂₀ 或 EC₅₀,即当效应比例分别为 20% 和 50% 时对应的 Se 质量浓度;X 为 Se 质量浓度。

1.4 剂量效应曲线模型

不同蔬菜品种 Se 毒性的剂量-效应曲线采用 Log-logistic 分布模型进行拟合^[21],拟合方程为:

$$Y_1 = \frac{a}{1 + \exp\left(b \ln \frac{X}{c_1}\right)} \quad (2)$$

其中:Y₁ 为不同处理水平的蔬菜 RRE;c₁ 为 EC₅₀。

1.5 物种敏感性分布曲线拟合

基于剂量-效应关系曲线计算得到 EC₂₀ 和

EC₅₀,通过 BurrIzo 2.0 软件,利用 Burr-III 分布函数得到蔬菜 Se 物种敏感性分布曲线,计算出保护 95% 蔬菜品种的 Se 毒性阈值 HC₅。Burr-III 方程^[22-24]为:

$$F(X) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{B}{X}\right)^C\right]^K} \quad (3)$$

其中:B 为比例参数,使分布模型更加灵活;C 为形状参数;K 为位置参数。

1.6 数据处理与分析

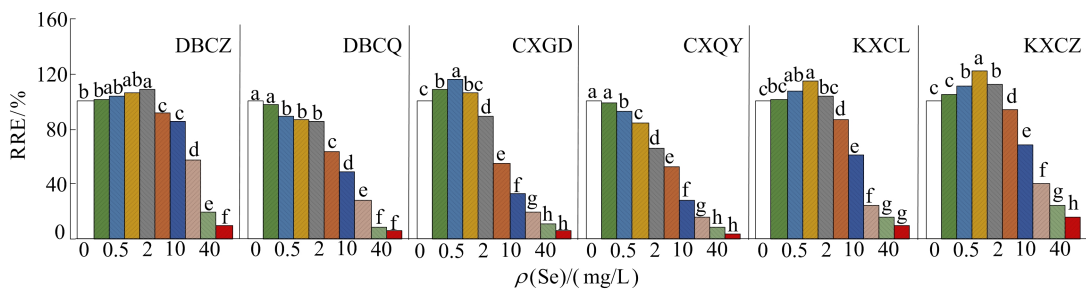
采用 Excel 2016 和 SPSS 21.0 进行数据处理,单因素方差分析及多重比较,利用 BurrIzo 2.0 软件进行模型参数估计,Origin 2018 进行曲线拟合以及曲线绘制。

2 结果与分析

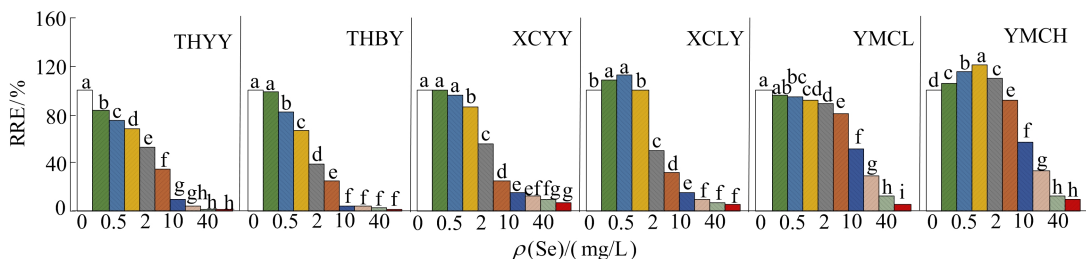
2.1 Se 质量浓度对 RRE 的影响

随着 Se 质量浓度的增加,DBCZ、CXGD、KXCL、KXCZ、XCLY、YMCH、YCSZ、SCKQ、SCKB 和 NYGC 的 RRE 呈现先上升后下降的规律,当 Se 的质量浓度为 0.1~2.0 mg/L 时,蔬菜的 RRE 最大(108.9%~148.1%);当 Se 的质量浓度增加到 60.0 mg/L 时,RRE 均显著下降至 1.47%~13.62%。DBCQ、CXQY、THYY、THBY、XCYY、YMCL 和 YCKR 的 RRE 均随着 Se 质量浓度增加而降低,相关曲线如图 1 所示。

图 1 中,不同小写字母代表 Se 处理间的 RRE 有显著差异(P<0.05)。



(a) 大白菜、菜心和空心菜



(b) 茼蒿、莧菜和油麦菜

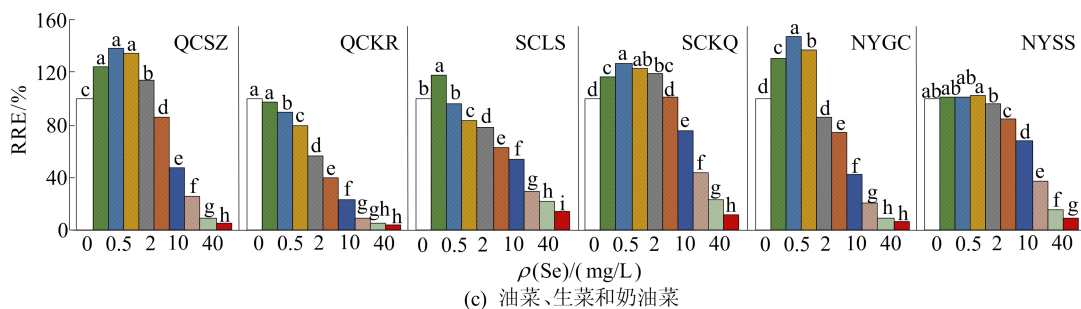


图 1 不同质量浓度 Se 处理下蔬菜的 RRE

2.2 Se 根伸长毒性的剂量-效应关系

Se 根伸长毒性的剂量-效应曲线如图 2 所示, YMCH、YCSZ、SCKQ、SCKB、NYGC、KXCL、KXCZ、DBCZ、CXGD 和 XCLY 的 Se 兴奋效应较大,其中:NYGC 的 RRE 最大为 148.1% (对应效应质量浓度为 0.5 mg/L); YMCL、NYSS、XCLY 和 XCYY 的 Se 兴奋效应较低 (RRE 值低于 105%); THYY、THBY、DBCQ、CXQY 和 YCKR 则无 Se 兴奋效应, RRE 随着 Se 质量浓度

的增大而不断减小。

基于剂量-效应关系拟合曲线, 得到不同品种蔬菜的 Se 效应比例质量浓度 EC_{20} 和 EC_{50} 。其中, DBCZ 的 EC_{20} (10.59 mg/L) 和 EC_{50} (19.60 mg/L) 最大, THYY 的 EC_{20} (0.48 mg/L) 和 EC_{50} (2.59 mg/L) 最小, 最大 EC_{20} /最小 EC_{20} 和最大 EC_{50} /最小 EC_{50} 分别为 22.1 和 7.6。由此可见, 不同品种蔬菜的效应比例质量浓度存在明显差异。

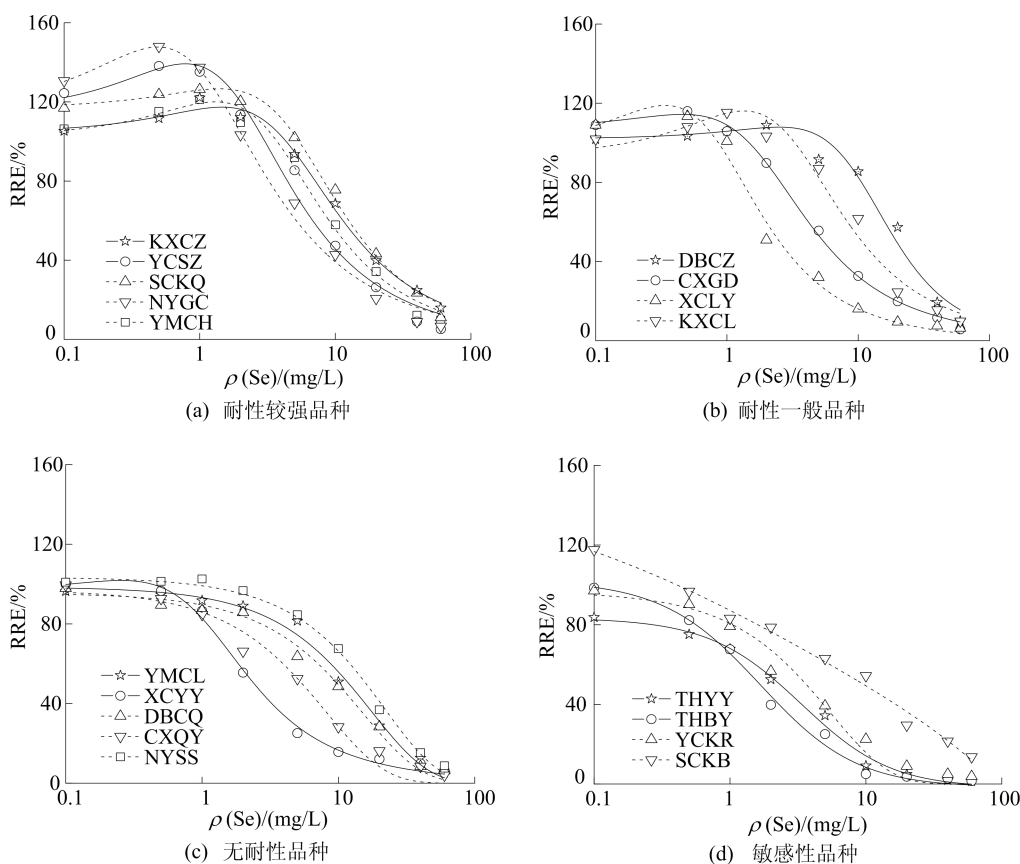


图 2 叶类蔬菜的 Se 剂量-效应曲线

2.3 物种敏感性分布及 HC_5 值预测

基于 EC_{20} 和 EC_{50} 得到 Se 的拟合 SSD 曲线如图 3 所示, DBCZ、SCKQ 和 KXCZ 表现较强的

Se 耐性, THYY、THBY 和 XCYY 对 Se 较为敏感。基于 EC_{20} 的 SSD 分布曲线中不同蔬菜对 Se 胁迫的敏感性顺序从大到小依次为: THYY、

THBY、YCKR、XCYY、XCLY、CXQY、SCKB、CXGD、DBCQ、NYGC、YMCL、YCSZ、KXCL、YMCH、NYSS、KXCZ、SCKQ、DBCZ。

而在基于 EC₅₀ 的 SSD 分布曲线中的敏感

性排序略有差异,表现为 YMCL、DBCQ、SCKB 和 YCKR 在 SSD 分布曲线中分布频次百分位值升高,其余蔬菜的敏感性分布频次顺序基本一致。

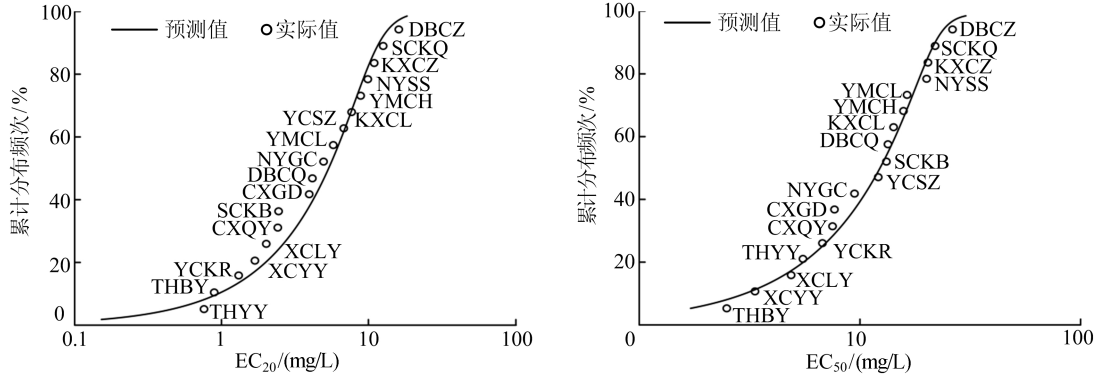


图 3 不同蔬菜品种基于 EC₂₀ 和 EC₅₀ 蔬菜的 Se 物种敏感性分布频次曲线

Se 处理下蔬菜相对根伸长的不同比例效应质量浓度 EC₂₀ 和 EC₅₀ 见表 1 所列。

基于 EC₂₀ 和 EC₅₀, 使用 Burr-III 分布函数计算得到毒性阈值 HC₅²⁰ 和 HC₅⁵⁰, 见表 2 所列。

表 1 Se 处理下蔬菜相对根伸长的不同比例效应质量浓度 EC₂₀ 和 EC₅₀

蔬菜品种	EC ₂₀ /(mg/L)	EC ₅₀ /(mg/L)	蔬菜品种	EC ₂₀ /(mg/L)	EC ₅₀ /(mg/L)
DBCZ	10.59(5.03~24.64)	19.60(8.24~40.86)	DBCQ	2.71(1.99~3.68)	9.84(8.14~11.72)
SCKQ	8.23(4.69~11.87)	16.01(12.59~19.46)	CXGD	2.59(0.70~3.63)	5.54(5.30~11.87)
KXCZ	7.11(5.69~13.62)	14.87(9.34~23.66)	SCKB	1.60(1.16~3.58)	9.63(6.63~12.57)
NYSS	6.46(3.57~9.32)	14.40(12.38~17.59)	CXQY	1.58(0.95~2.57)	5.42(3.92~7.11)
YMCH	5.79(2.41~12.82)	11.49(4.07~24.48)	XCLY	1.32(0.93~2.03)	2.52(1.84~4.16)
KXCL	5.04(1.16~7.30)	10.23(2.76~10.58)	XCYY	1.08(0.83~1.34)	2.41(2.01~2.89)
YCSZ	4.44(0.43~15.24)	8.81(2.20~47.65)	YCKR	0.86(0.61~1.79)	3.05(2.54~3.69)
YMCL	3.74(3.07~4.45)	11.93(10.45~13.76)	THBY	0.59(0.43~0.75)	1.88(1.72~2.03)
NYGC	3.24(1.76~4.58)	6.85(5.65~8.62)	THYY	0.48(0.17~0.77)	2.59(2.29~2.88)

注:括号中数字表示 95% 置信区间。

表 2 基于 Burr-III 分布模型拟合的保护 95% 蔬菜品种 Se 的毒性阈值(HC₅)

比例效应质量浓度	HC ₅ /(mg/L)	95%置信区间	R ²
EC ₂₀	0.29	0.16~1.10	0.91
EC ₅₀	1.20	0.88~3.40	0.93

由表 2 可知,基于保护 95% 品种蔬菜的 20% 抑制质量浓度值(HC₅²⁰)为 0.29 mg/L, 50% 抑制质量浓度值(HC₅⁵⁰)为 1.20 mg/L。

3 讨 论

3.1 不同蔬菜的兴奋效应差异性分析

低质量浓度 Se 对 10 种蔬菜 DBCZ、YCSZ、CXGD、NYGC、YMCH、SCKQ、SCKB、XCLY、KXCZ 和 KXCL 的根伸长具有一定兴奋效应,但不同蔬菜根伸长的 Se 兴奋效应差异较大。菊科蔬菜 SCKB 在 Se 质量浓度为 0.1 mg/L 附近出

现 RRE 峰值; 苋科 XCLY 在 Se 质量浓度为 0.5 mg/L 附近出现 RRE 峰值; 菊科蔬菜(YMCH、SCKQ)和旋花科蔬菜(KXCZ、KXCL)在 Se 质量浓度为 2.0 mg/L 附近出现 RRE 峰值; 十字花科蔬菜(DBCZ、YCSZ、CXGD、NYGC)在 Se 质量浓度为 0.5~2.0 mg/L 范围内出现 RRE 峰值。菊科蔬菜 SCKB 的兴奋效应质量浓度最小、范围最窄,十字花科蔬菜 DBCZ 的兴奋效应质量浓度最大,范围最宽。

文献[25]研究发现,芥菜地下部根长和根粗随外源 Se 质量比的增加呈先增大而后减小的趋

势,且在 Se 质量比为 10 mg/kg 时芥菜的根长和根粗均达到最大值。文献[26]研究发现,Se 质量浓度为 2.5 mg/L 时绿豆芽生物量达到最大,之后随着 Se 质量浓度的升高,生物量呈显著下降趋势。文献[7]研究发现,小白菜矮抗青的最佳 Se 质量浓度为 0.5 mg/L,随着 Se 质量浓度的增加产量降低。文献[27]采用土培方式发现瓢儿白、大白菜和青菜的生物量分别在 Se 质量比为 0.5、1.0、2.5 mg/kg 时生物量最高。可见,基于根伸长、生物量等不同表征终点的结果均表明,不同蔬菜的 Se 兴奋效应差异明显。

3.2 不同蔬菜的 Se 剂量-效应及敏感性分析

不同蔬菜剂量-效应拟合模型参数的差异较大,尤其是兴奋效应对主要参数有显著性影响,见表 3 所列。由表 3 可知:一般具有兴奋效应蔬菜

的 a 值(最大与最小 RRE 差值)大,最大 a 值为 122.22%(SCKB);无兴奋效应蔬菜的 a 值相对较小,最小 a 值为 82.61%(THYY)。显著检验表明,兴奋效应组 a 平均值(107.43%)和无兴奋效应组 a 平均值(99.36%)具有显著性差异($P < 0.001$)。

大多数存在兴奋效应蔬菜的 b 值(EC_{50} 对应曲线斜率)较大,而无兴奋效应蔬菜的 b 值较小,二组 b 平均值具有显著性差异($P = 0.066 < 0.100$),表明高质量浓度 Se 条件下,有 Se 兴奋效应蔬菜的 Se 毒害性增幅大于无兴奋效应蔬菜。其中,具有 Se 兴奋效应的 SCKB 却显著小于其他品种,这可能与其兴奋效应 RRE 峰值对应质量浓度较低(0.1 mg/L),且 RRE 在实验质量浓度范围内的减小速率较为均匀有关。

表 3 剂量-效应拟合曲线参数

科	品种	$a/\%$	b	c		d	存在兴奋效应
				$EC_{50}/(\text{mg/L})$	$EC_{20}/(\text{mg/L})$		
十字花科	DBCZ	102.00	1.89	19.60	10.59	5.00	是
菊科	SCKQ	120.12	1.71	16.01	8.23	5.79	是
旋花科	KXCZ	104.70	1.65	14.87	7.11	22.06	是
十字花科	NYSS	101.57	1.65	14.82			否
菊科	YMCL	95.06	1.68	11.93			否
菊科	YMCH	102.62	1.71	11.49	5.79	32.00	是
旋花科	KXCL	93.79	1.71	10.23	5.04	40.00	是
十字花科	DBCQ	93.85	1.33	9.84			否
菊科	SCKB	122.22	0.68	9.63			否
十字花科	YCSZ	115.67	1.67	8.81	4.44	75.00	是
十字花科	NYGC	120.79	1.65	6.85	3.24	121.99	是
十字花科	CXGD	107.70	1.62	5.54	2.59	30.74	是
十字花科	CXQY	100.97	1.07	4.43			否
十字花科	YCKR	100.53	1.10	3.05			否
菊科	THYY	82.61	1.37	2.59			否
苋科	XCLY	96.90	1.78	2.52	1.32	148.18	是
苋科	XCYY	95.76	1.31	2.41			否
菊科	THBY	101.67	1.26	1.88			否

兴奋效应组和无兴奋效应组的 EC_{20} 平均值分别为 5.00、2.19 mg/L,存在显著差异($P = 0.032 < 0.050$),其 EC_{50} 的平均值分别为 10.66、6.73 mg/L,两组 EC_{50} 的平均值差异性显著($P = 0.104$,基本接近 0.100)。该研究中蔬菜的 EC_{20} 最大值是最小值的 20 余倍, EC_{50} 最大值与最小值相差超过 7 倍。文献[15]基于 RRE 发现 11 种白菜的 Cd 中 EC_{20} 和 EC_{50} 也有类似规律,其最大值与最小值的比值分别为 12.4、5.0。效应比例越低,品种间比例效应质量浓度差别越大。可见,受体、毒性效应比例及兴奋效应都会影响 Se,且兴奋效应能有效减小低质量浓度 Se 的毒害。

不同蔬菜表现出了不同的敏感性,其中菊科

(6 种)和十字花科(8 种)既有敏感性、较敏感性品种,又有较耐受和耐受性品种,蔬菜的 Se 敏感性变化大,总体上十字花科的耐受性稍强;旋花科(2 种)表现出较强的耐性,苋科(2 种)均为 Se 敏感性蔬菜,但苋科和旋花科的品种数量少,有待进一步丰富敏感性的相关研究。文献[26]研究发现,高质量浓度 Se 环境下植物耐硒性从大到小依次为:上海青(十字花科)、快菜(十字花科)、茄子(茄科)、辣椒(茄科)、西红柿(茄科),说明上海青、快菜叶类植物的耐硒性要强于一般的蔬果,即十字花科强于茄科。文献[28]以植物根伸长为测定终点,发现不同科的植物在高质量浓度 Se 下耐性从大到小依次为:禾本科(小麦和大麦)、豆科(苜

藜)、十字花科(花椰菜和萝卜)、伞形科(欧芹)。可见,植物不同科间 Se 敏感性也存在差异。

3.3 蔬菜种类对 HC_5 影响分析

不同蔬菜品种敏感性具有一定差异,参与模型拟合的品种选择会对 HC_5 值产生一定影响,见表 4 所列。

从表 4 可以看出,耐性较强品种未参与模型拟合得到的 $HC_{5^{20}}$ 和 $HC_{5^{50}}$ 分别是全部品种参与

拟合对照组的 0.76、0.98 倍,敏感性较强品种未参与拟合得到的 $HC_{5^{20}}$ 和 $HC_{5^{50}}$ 分别是对照组的 2.45、2.08 倍。

由以上分析可知,蔬菜种类选择对 HC_5 影响极大,敏感性品种缺失会导致 HC_5 显著提高,耐性品种缺失会在一定程度上降低 HC_5 。因此,实际操作中需要使尽可能多的品种参与拟合,从而保证 HC_5 结果的适用性。

表 4 不同品种 Se 毒性阈值(HC_5)

组别	$HC_{5^{20}}/(mg/L)$	$HC_{5^{50}}/(mg/L)$	蔬菜品种	模型拟合
耐性较强品种	0.22	1.18	DBCZ,SCKQ,KXCZ	未参与
敏感性较强种	0.71	2.50	THYY,THBY,XCYY	参与
对照组	0.29	1.20	全部品种	参与

4 结 论

1) 部分蔬菜具有 Se 兴奋效应,兴奋效应质量浓度范围为 0.1~5.0 mg/L,Se 对蔬菜 RRE 的兴奋效应和毒害性与蔬菜种类密切相关。

2) 品种 DBCZ,SCKQ 和 KXCZ 表现出较强 Se 耐性,而品种 THBY,THYY 和 XCYY 表现出较强 Se 敏感性。不同蔬菜 Se 毒性阈值差异明显, EC_{20} 和 EC_{50} 范围分别为 0.48~10.59 mg/L 和 1.88~19.60 mg/L。

3) 兴奋效应显著影响蔬菜的剂量-效应关系,Se 兴奋效应组的模型参数(最大与最小 RRE 差值 a 、 EC_{50} 对应的毒害性变化速率 b 、 EC_{20} 和 EC_{50})的平均值显著大于无兴奋效应组。

4) 保护 95% 蔬菜的 20% 效应毒性阈值($HC_{5^{20}}$)和 50% 效应毒性阈值($HC_{5^{50}}$)分别为 0.29、1.20 mg/L。蔬菜种类对 HC_5 影响极大,敏感性品种缺失会导致 HC_5 显著提高,耐性品种缺失会一定程度降低 HC_5 。

[参 考 文 献]

[1] 王立平,唐德剑,沈亚美,等. 硒的营养缺乏现状及补充方式[J]. 食品工业,2020,41(1):339-343.

[2] 田欢. 典型富硒区岩石-土壤-植物中硒的赋存状态及环境行为研究[D]. 北京:中国地质大学,2017.

[3] GARY S. Selenium in the environment and human health [M]. Florida:CRC Press,2013:1-221.

[4] RIBEIRO A F,DA S,CARVALHO G K, et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2018,164:562-570.

[5] MASSIMO M,RAFFAELLA C. Effect of selenium on the responses induced by heat stress in plant cell cultures[J]. Plants,2018,7(3):64-72.

[6] LIDON F C,OLIVEIRA K,SIMES M, et al. Selenium bio-fortification of rice grains and implications on macronutrients quality[J]. Journal of Cereal Science,2018,81:22-29.

[7] 李登超,朱祝军,韩秋敏,等. 硒对菠菜小白菜生长及抗氧化活性的研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2003,21(1):5-8.

[8] GUPTA M,GUPTA S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants[J]. Frontiers in Plant Science,2017,7:2074.

[9] ZHANG M,TANG S,HUANG X, et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and it's influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice[J]. Environmental & Experimental Botany,2014,107:39-45.

[10] ROMANG M. Selenium: properties and determination[J]. Encyclopedia of Food and Health,2016,4:734-743.

[11] STRAALEN N M. Theory of ecological risk assessment based on species sensitivity distributions [M]. Florida: CRC Press,2001:61-72.

[12] HEOSE G C,BRINK P. Confirming the species-sensitivity distribution concept for endosulfan using laboratory, mesocosm, and field data[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology,2004,47(4):511-515.

[13] WHEELER J R,GRIST E,LEUNG K, et al. Species sensitivity distributions: data and model choice[J]. Marine Pollution Bulletin,2002,45(1):192-202.

[14] ASSOCIATION I. International rules for seed testing[J]. Seed Science and Technology,1959,4:23-28.

[15] 胡翔,李湘凌,张忠恩,等. 基于根伸长测试终点的小白菜 Cd 及 Se-Cd 物种敏感性分布[J]. 环境科学研究,2022,35(2):9-15.

[16] 赵淑婷,孙在金,林祥龙,等. 不同性质土壤中镉对小麦根伸长的毒性阈值及预测模型[J]. 安全与环境学报,2018,18(1):380-385.

[17] ABEDIN M J,MEHARG A A. Relative toxicity of arsenite and arsenate on germination and early seedling growth of rice[J]. Plant and Soil,2002,243(1):57-66.

- [J]. *Annals of Operations Research*, 2023, 330: 457-484.
- [7] 徐维军, 彭子衿, 张卫国, 等. 基于文本信息考虑投资者情绪的均值回归策略设计: 以东方财富股吧发帖文本和 A 股市场为例[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(3): 193-198.
- [8] 陈云, 杨晓雪. 基于新闻文本的上市公司财务困境组合预测模型[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(6): 1663-1667.
- [9] 陈艺云. 基于信息披露文本的上市公司财务困境预测: 以中文年报管理层讨论与分析为样本的研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(7): 23-34.
- [10] DONG W, LIAO S Y, ZHANG Z J. Leveraging financial social media data for corporate fraud detection[J]. *Journal of Management Information Systems*, 2018, 35(2): 461-487.
- [11] WANG X J, XIANG Z Q, XU W K, et al. The causal relationship between social media sentiment and stock return: Experimental evidence from an online message forum[J]. *Economics Letters*, 2022, 216: 110598.
- [12] ROSARIO A B, SOTGIU F, DE V K, et al. The effect of electronic word of mouth on sales: a meta-analytic review of platform, product, and metric factors [J]. *Journal of Marketing Research*, 2016, 53(3): 297-318.
- [13] ZHAO S P, XU K, WANG Z, et al. Financial distress prediction by combining sentiment tone features[J]. *Economic Modelling*, 2022, 106: 105709.
- [14] 李洁, 林永峰. 基于多时间尺度 RNN 的时序数据预测[J]. *计算机应用与软件*, 2018, 35(7): 33-37, 62.
- [15] VASHISHTH S, UPADHYAY S, TOMAR G S, et al. Attention interpretability across nlp tasks[EB/OL]. [2022-07-06]. <http://arXiv/pdf/1909.11218.pdf>.
- [16] CHEN M Y. Predicting corporate financial distress based on integration of decision tree classification and logistic regression[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(9): 11261-11272.
- [17] HUANG Y P, YEN M F. A new perspective of performance comparison among machine learning algorithms for financial distress prediction[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 83: 105663.
- [18] SUN J, JIA M Y, LI H. AdaBoost ensemble for financial distress prediction: an empirical comparison with data from Chinese listed companies[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(8): 9305-9312.
- [19] 吕喜梅, 蒋翠清, 丁勇, 等. 融合临时报告软信息的新三板企业财务困境预测研究[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(11): 140-150.
- [20] 肖毅, 熊凯伦, 张希. 基于 TEI@I 方法论的企业财务风险预警模型研究[J]. *管理评论*, 2020, 32(7): 226-235.
- [21] 梁墨, 李鸿翔, 张顺明. 基于 ST 预测的财务困境测度与股票横截面收益[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(2): 138-149.
- [22] STATHAKIS D. How many hidden layers and nodes? [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(8): 2133-2147.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 375 页)

- [18] ISTA. International rules for seed testing[M]. Bassersdorf: [s. n.], 1985: 1-152.
- [19] 陆开形, 汤飞峰, 丁沃娜. 镉胁迫对不同基因型小白菜种子萌发的影响[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2012, 25(2): 6-16.
- [20] SCHABENBERGER O, THARP B E, KELLS J J, et al. Statistical tests for hormesis and effective dosages in herbicide dose response[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(4): 713-721.
- [21] SEEFELDT S S, JENSEN J E, FUERST E P. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships[J]. *Weed Technology*, 1995, 9(2): 218-227.
- [22] 杨肖松, 刘月仙, 解小凡, 等. 基于物种敏感性分布法预测苳对白菜毒害的生态风险阈值[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2127-2134.
- [23] LI U S, LIU M, WANG X, et al. Absorption and accumulation of cadmium in different Chinese cabbage cultivars [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 26: 21-27.
- [24] SHAO Q. Estimation for hazardous concentrations based on noec toxicity data: an alternative approach[J]. *Environmentrics*, 2000, 11(5): 583-595.
- [25] 杨彬, 李婷, 张野, 等. 不同价态外源硒对芥菜生长及富硒量的影响[J]. *辣椒杂志*, 2019(3): 5-10.
- [26] 胡婷, 李文芳, 向昌国, 等. 硒对常见蔬菜种子萌发的影响及在植株中的分布[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 45-49.
- [27] 谢文文. 芸薹属主要蔬菜作物富硒比较研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [28] 毛晖, 王朝辉. 硒的价态与浓度水平对 6 种植物种子发芽和根际生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 1958-1965.

(责任编辑 吴 亮)