DOI:10.11686/cyxb2025475
http://cyxb.magtech.com.cn
欧翔，张强，操贤洪，等. 不同外源硒对镉污染土地中王草生长、营养品质及镉、硒富集的影响. 草业学报，2026，35(11)：184－200.
OU Xiang, ZHANG Qiang, CAO Xian-hong, *et al*. Effects of different exogenous selenium application on the growth, nutritional quality and enrichment of cadmium and selenium of king grass in cadmium contaminated land. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 184－200.

不同外源硒对镉污染土地中王草生长、营养品质及镉、硒富集的影响

欧翔[1]，张强[1]，操贤洪[1]，陈荣强[1]，连海[1]，黄志文[2]，康美如[1]，刘峥[1]，雷小文[1*]
（1. 赣州市畜牧水产研究所，江西 赣州 341401；2. 全南县农业农村局，江西 赣州 341899）

摘要：为研究镉污染土地种植王草的最佳外源硒施用模式。在镉含量为(0.56±0.03) mg·kg^{-1}土地中，设置对照组(CK，不施硒)，以及分别基施0.50、1.00和2.00 mg·kg^{-1}亚硒酸钠(Y_1、Y_2、Y_3)、酵母硒(J_1、J_2、J_3)、蚯蚓硒(Q_1、Q_2、Q_3)，共10个处理组种植王草，分析连续3年各处理对王草生长、营养品质及镉、硒富集的影响。结果显示：连续3年，所有施硒处理均能显著提升王草的粗脂肪含量($P<0.05$)，除Y_1、J_1组外，其余处理均能显著提升王草的鲜草产量($P<0.05$)，其中Q_2组效果最好；各外源硒处理王草镉含量和镉富集系数随施硒浓度增加呈下降趋势，且均显著低于CK组($P<0.05$)，其中Q_3组效果最好；各外源硒处理王草硒含量随施硒浓度增加呈上升趋势，且均显著高于CK组($P<0.05$)，其中Q_3组效果最好。连续3年，Q_2组王草硒富集系数在各个年份均显著高于CK和其他施硒处理组($P<0.05$)；土壤总镉含量呈下降趋势，种植第3年，Y_2、Q_1、Q_2、Q_3组均能显著降低土壤总镉含量($P<0.05$)，其中Q_2组效果最好。基施1.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒处理王草产量、营养品质和镉硒含量等指标的隶属函数均值最大，王草镉含量符合饲料卫生标准，种植第3年土壤总镉含量最低，为镉污染土壤中种植王草的最佳外源硒施用模式。

关键词：镉污染；王草；有机硒；饲草品质

Effects of different exogenous selenium application on the growth, nutritional quality and enrichment of cadmium and selenium of king grass in cadmium contaminated land

OU Xiang[1], ZHANG Qiang[1], CAO Xian-hong[1], CHEN Rong-qiang[1], LIAN Hai[1], HUANG Zhi-wen[2], KANG Mei-ru[1], LIU Zheng[1], LEI Xiao-wen[1*]
1. *Ganzhou Animal Husbandry and Fisheries Research Institute*, *Ganzhou* 341401, *China*; 2. *Agriculture and Rural Bureau of Quannan County*, *Ganzhou* 341899, *China*

Abstract: This research explored the best exogenous selenium application mode when planting king grass (*Pennisetum purpureum*×*Pennisetum americanum* 'Reyan No. 4') in cadmium contaminated land. In a soil with cadmium content of (0.56±0.03) mg·kg^{-1}, the following treatments were set up: a control group (CK, no selenium), and 0.50, 1.00 and 2.00 mg·kg^{-1} sodium selenite (Y_1, Y_2, Y_3); yeast selenium (J_1, J_2, J_3); and earthworm selenium (Q_1, Q_2, Q_3), making a total of 10 treatments. The effects of each treatment on the growth, nutritional quality and cadmium and selenium enrichment of king grass were monitored for three consecutive years. It

收稿日期：2025-11-19；改回日期：2026-01-05
基金项目：江西省高层次高技能领军人才培养工程项目(赣人社发[2022]34号)，江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-11-赣南片)和赣州市科技计划项目"南方肉牛饲料安全体系的构建与应用"(赣市科发[2023]44号)资助。
作者简介：欧翔(1993－)，男，江西赣州人，硕士。E-mail: ouxiang9393@126.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: 343224896@qq.com

was found that all selenium treatments significantly increased the crude fat content of king grass ($P<0.05$). Also, the fresh grass yield of king grass was increased ($P<0.05$) by all treatments, except for Y_1 and J_1, with the Q_2 group having the highest fresh yield. The cadmium content and cadmium enrichment coefficient of king grass in each exogenous selenium treatment decreased with increase in selenium concentration, and were significantly lower ($P<0.05$) than the Cd concentration in the CK treatment group ($P<0.05$), with the Q_3 group having the lowest Cd concentration. Meanwhile, compared with CK, king grass selenium content was increased by selenium application, with the Q_3 treatment having the highest selenium levels. In all three years, the selenium enrichment coefficient of the Q_2 group was significantly higher than that of CK group and other selenium treatments ($P<0.05$). During the experiment, the soil total cadmium content showed a downward trend, and was lowest in the third year. By the third year Y_2, Q_1, Q_2 and Q_3 groups had significantly reduced ($P<0.05$) the soil total cadmium content, with the Q_2 group having the strongest effect. The mean value of membership function of yield, nutritional quality and cadmium and selenium content of king grass across the three years was highest in the Q_2 treatment (1.00 mg·kg^{-1} earthworm selenium). The cadmium content of king grass met feed safety standards. Hence, this treatment was identified as the best exogenous selenium application mode for planting king grass in cadmium contaminated soil.

Key words: cadmium pollution; king grass; organic selenium; forage quality

近年来我国南方地区畜牧产业发展迅速,粗饲料需求日益旺盛,然而该地区多丘陵,可耕作土地资源稀缺,加之防止耕地“非粮化”政策限制了基本农田种植非粮作物,牧草种植用地紧缺,导致南方本地饲草供应不足。利用边际土地种植牧草是缓解南方地区饲草短缺瓶颈的重要途径之一[1],镉(cadmium, Cd)是我国土壤重金属污染超标率最高的元素之一,点位超标率高达7%[2],尤其在我国南部、西部地区尤为严重,土壤镉含量分别达0.51和0.33 mg·kg^{-1},超过国家土壤环境质量标准(在pH≤5.5的土壤中,镉含量应≤0.3 mg·kg^{-1})[3-4]。采用镉污染土地种植作物,易导致作物吸收并富集镉元素,从而危害作物生长与人类健康[5]。而将镉污染土壤用于高效、安全种植牧草,不仅可丰富牧草种植用地来源,促进南方牛羊产业发展,还能为镉污染土地的利用提供新的方式和思路,促进土地资源高效利用与可持续发展。

王草(*Pennisetum purpureum*×*Pennisetum americanum*)属禾本科狼尾草属多年生草本植物,具有生长快、产量高、土壤适应范围广等特性,是南方地区种植面积最广的牧草之一[6-7]。但王草能富集土壤中镉元素[8],其在镉污染土地种植,镉含量易超出饲料卫生标准(总镉限量低于1.00 mg·kg^{-1})[9]。相关研究表明,硒(selenium, Se)与镉具有一定的拮抗作用[10],一方面,土壤中硒离子能与镉离子发生热力学反应,形成Se-Cd络合物,从而减少植物对镉的吸收[11],另一方面,硒能使同为禾本科的水稻(*Oryza sativa*)根系木质素合成相关基因过表达,提高细胞壁机械强度,促使细胞壁变厚,从而阻隔细胞对镉的吸收[12]。因此,在镉污染土地施用硒肥抑制王草富集镉元素具有可行性。

硒源一般分为无机硒和有机硒。无机硒主要包括亚硒酸钠、硒酸盐等,其普遍具有生物毒性,在镉污染土地中施用浓度过高时会抑制植物生长[13]。与无机硒相比,有机硒具有更低的毒性和更高的生物利用度[14]。近年相关研究也表明,不同形态硒在植物中的吸收转运效率及其拮抗镉毒机制存在本质差异。有机硒可通过氨基酸转运系统或水通道蛋白被高效吸收,并表现出比无机硒更高的向地上部转运的能力[15-16]。在拮抗镉毒方面,无机硒(亚硒酸钠)可通过下调根系镉吸收通道基因的表达来减少镉的进入,而有机硒(硒代蛋氨酸)对镉吸收通道的影响较小,其作用更侧重于增强植物体内谷胱甘肽合成等内部解毒途径,促进镉以谷胱甘肽螯合的形式向液泡隔离[17]。目前,市场上常见的有机硒源主要为酵母硒。它是酵母菌在含亚硒酸钠的培养基中培养、分离、干燥后制得的一种有机硒[18],有研究表明酵母硒促进作物生长、改善品质、促进硒富集的效果均优于无机硒[19-20]。硒在生物体内多与氨基酸结合参与蛋白质构成,动物对硒的转化效率一般高于植物和真菌[21]。蚯蚓(*Eisenia fetida*)可通过摄食将无机硒转化为有机硒,本课题组通过在蚯蚓中添加亚硒酸钠,利用蚯蚓自身的水解酶酶解后制成蚯蚓

硒，其有机硒占总硒比例高于90%[22]。前人研究发现，蚯蚓硒的生物可利用率达95%[23]，更容易被植物吸收利用，其富含多种氨基酸、腐殖酸、活性酶(如超氧化物歧化酶、蚓激酶)等，在植物抗逆性、抗氧化、促生长等方面存在一定促进作用[24-25]。并且相较于亚硒酸钠和酵母硒，蚯蚓硒的制备工艺相对简单、成本较低，无机硒残留低，对环境的污染风险小，因此在农业生产中蚯蚓硒更具推广潜力。目前，国内外关于施硒浓度对禾本科植物影响的研究相对较多。徐境懋等[26]发现基施无机硒2.50 mg·kg^{-1}对降低水稻镉含量效果最好，基施无机硒0.50 mg·kg^{-1}对提升水稻地上部生物量效果最好。陈钟佃等[27]基施1.00 mg·kg^{-1}亚硒酸钠显著促进了杂交狼尾草(*P. glaucum*×*P. purpureum*)的生长。但是针对外源硒及施硒浓度对镉污染土地种植王草的影响鲜有相关报道。因此，本研究拟采用亚硒酸钠、酵母硒、蚯蚓硒为硒源，探究不同外源硒及不同施硒浓度(0.5～2.0 mg·kg^{-1}，以Se元素计)对镉污染土壤中王草产量、品质及镉、硒富集的影响。旨在解决镉污染土壤种植王草易导致其镉含量高、生长受限的技术难题，寻找一种既能高效利用镉污染土地，也能安全生产王草的种植模式，为镉污染土地高效安全利用及高品质牛羊粗饲料的生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省赣州市全南县某镉污染地。全南县属中亚热带季风型气候，境内气候温和，年均降水量1709.5 mm，年均气温18.6 ℃，无霜期296 d，平均日照时数1554.3 h。试验地土壤为红壤，镉含量为(0.56±0.03) mg·kg^{-1}，高于风险筛选值(0.4 mg·kg^{-1})，且低于风险管制值(2.0 mg·kg^{-1})[4]，属轻度镉污染土地，即农用地土壤中污染物含量在该范围内，可能存在食用农产品不符合质量安全标准等土壤污染风险，原则上应当采取安全利用措施。试验地基本理化性质见表1。

表1 试验地土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil from experimental field

项目 Items	含量 Content
pH	6.17±0.13
总镉 Total cadmium (mg·kg^{-1})	0.56±0.03
有效镉 Available cadmium (mg·kg^{-1})	0.25±0.02
总硒 Total selenium (mg·kg^{-1})	0.21±0.02
全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1})	1.42±0.07
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen (mg·kg^{-1})	118.53±5.86
全磷 Total phosphorus (g·kg^{-1})	0.85±0.05
速效磷 Available phosphorus (mg·kg^{-1})	78.13±4.08
全钾 Total kalium (g·kg^{-1})	21.04±0.95
速效钾 Available kalium (mg·kg^{-1})	83.56±3.93
有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	30.02±1.35

1.2 试验材料

选用热研4号王草(*P. purpureum*×*P. americanum* 'Reyan No. 4', king grass)，购于沭阳树元园艺有限公司。亚硒酸钠购于国药集团化学试剂有限公司，总硒含量约为450 g·kg^{-1}。酵母硒购于安琪酵母股份有限公司，总硒含量约为2.00 g·kg^{-1}。蚯蚓硒参考刘珍妮等[22]的方法制备，其总硒含量约为4.00 g·kg^{-1}，氮、磷、钾含量分别约为15.50 g·kg^{-1}、2.25 g·kg^{-1}、1.80 g·kg^{-1}，pH 6.5～7.0。

1.3 试验设计

采用田间随机区组试验设计，根据总硒含量计算施用量，设置对照组(CK，不施硒处理)、基施0.50 mg·kg^{-1}亚硒酸钠(Y_1)、1.00 mg·kg^{-1}亚硒酸钠(Y_2)、2.00 mg·kg^{-1}亚硒酸钠(Y_3)、0.50 mg·kg^{-1}酵母硒(J_1)、1.00 mg·kg^{-1}酵母硒(J_2)、2.00 mg·kg^{-1}酵母硒(J_3)、0.50 mg·kg^{-1}蚯蚓硒(Q_1)、1.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒(Q_2)、2.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒(Q_3)共10个处理，组间缓冲带1.5 m，每个处理重复3次，共计30个小区，每个小区25 m^2(5 m×5 m)。2022年3月施硒、翻耕土地，按行株距0.8 m×0.5 m种植王草，进行相同的田间管理(包括施硒总量、人工除杂草、土壤排水等)，不额外施用其他肥料，第1年刈割3茬，第2、3年刈割4茬。同时本研究通过预试验(种植1年，刈割3茬)发现，施硒后各茬间植物镉硒含量和土壤镉含量存在递减趋势，即一次施用后续年份连续刈割使用可能不存在植株镉含量上升的风险，因此本试验所有施硒处理仅设置为种植前，之后不追施。

1.4 样品采集

2022年2月，采用5点采样法[28]采集试验地0～20 cm的土壤样品，自然风干、混匀、磨碎，过0.15 mm筛用于

测定土壤全氮、全磷、全钾含量，过 1.00 mm 筛用于测定土壤速效钾含量，过 2.00 mm 筛用于测定土壤 pH、有机质、有效磷、碱解氮含量。每年王草种植最后一茬刈割后，采用 5 点采样法[28]采集各小区 0～20 cm 的土壤样品，自然风干、混匀、磨碎、过 0.15 mm 筛用于测定土壤总镉、总硒含量。

王草种植的每一茬，在各小区去边行后，随机选取 6 株植株测定株高，随机选取 3 株植株留茬 15 cm 全株刈割，将王草鲜样品 105 ℃杀青 15 min，65 ℃烘至恒重，粉碎后用于测定王草总镉、总硒及营养品质。各小区去边行后留茬 15 cm 全株刈割，采用公式(1)推算鲜草产量。

$$\text{鲜草产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=\frac{\text{样方鲜草总重}(\text{kg})}{\text{样方数}}\times 10000 \tag{1}$$

1.5　测定指标及方法

土壤成分测定：参考 DB35/T1142－2020 测定土壤总镉、总硒含量[29]；参考 GB/T 23739－2009 测定有效镉含量[30]；参考 LY/T 1228－2015 测定全氮、碱解氮含量[31]；参考 LY/T 1232－2015 测定全磷含量[32]；参考 NY/T 1121.7－2014 测定速效磷(以 P 计)含量[33]；参考 LY/T 1234－2015 测定全钾含量[34]；参考 NY/T 889－2004 测定速效钾(以 K 计)含量[35]；参考 NY/T 1121.6－2006 测定有机质含量[36]；参考 NY/T 1121.2－2006 测定 pH[37]。

王草成分测定：参考 GB/T 6432－2018 测定粗蛋白质(crude protein，CP)含量[38]；参考 GB/T 6433－2006 测定粗脂肪(ether extract，EE)含量[39]；参考 NY/T 1459－2022 测定酸性洗涤纤维(acid detergent fiber，ADF)含量[40]；参考 GB/T 20806－2022 测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber，NDF)含量[41]；参考 GB/T 6438－2007 测定粗灰分(crude ash，Ash)含量[42]；参考 GB/T 13082－2021 测定总镉含量[43]；参考 GB/T 13883－2023 测定总硒含量[44]。

1.6　数据统计分析

利用 Microsoft Excel 2013 进行数据统计分析，SPSS 24.0 软件进行单因素、双因素方差分析及显著性检验，结果以平均值±标准差[mean±standard deviation (SD)]表示，$P<0.05$ 表示差异显著。通过 Microsoft Excel 2013 绘制柱状图。

镉、硒富集系数采用公式(2)计算。

$$EF=C_p/C_s \tag{2}$$

式中：EF 为元素富集系数，C_p 为该元素在植物地上部分的含量，C_s 为该元素在土壤中的含量。

采用模糊数学隶属函数法对各施硒处理的王草种植效果进行综合评价，各指标拥有相同的权重。其中株高、鲜草产量、粗蛋白、粗脂肪、王草总硒含量与王草种植效果呈正相关，用公式(3)表示。参考饲草的相对饲用价值(relative feed value，RFV)中，酸性洗涤纤维与可消化干物质负相关，中性洗涤纤维与干物质采食量负相关，两者含量越低，饲料适口性和消化率越高，同时参考我国将粗灰分作为苜蓿(*Medicago sativa*)干草分级的限制性指标，因此本研究中酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、粗灰分、王草总镉含量与王草种植效果呈负相关，用公式(4)表示。在求得各指标隶属函数值后，通过公式(5)求得各处理的隶属函数值，数值越大，表明综合种植效果越好。

$$U(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \tag{3}$$

$$U(X_i)=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \tag{4}$$

$$U=\frac{\sum U(X_i)}{n} \tag{5}$$

式中：$U(X_i)$ 表示测定指标的隶属函数值，U 表示处理组隶属函数值，X_i 表示该项指标的测定值，$X_{\max}$ 表示该项指标的最大值，$X_{\min}$ 表示该项指标的最小值，n 表示指标数。

2　结果与分析

2.1　不同外源硒对镉胁迫下王草株高、产量、营养品质的影响

如表 2 所示，不同处理组间王草株高、产量、粗脂肪含量差异均极显著($P<0.001$)。施硒处理不同年份间王草株高、产量、粗蛋白含量差异均极显著($P<0.001$)。在不同处理组和不同年份交互作用下，王草产量差异极显

著($P<0.01$)。酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、粗灰分在不同处理间、不同年份间,以及两者交互作用下均不显著($P>0.05$)。

表2 不同外源硒对镉污染土壤中王草株高、产量、营养品质的双因素方差分析

Table 2 Two-way analysis of variance of different exogenous selenium on the plant height, yield, and nutritional quality of king grass under cadmium stress

项目 Items	处理组 Treatment group		年份 Year		处理组×年份 Treatment group×year	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
株高 Plant height	8.56	<0.001	42.99	<0.001	1.29	0.227
鲜草产量 Fresh grass yield	93.79	<0.001	628.12	<0.001	2.68	<0.01
粗蛋白 Crude protein	1.65	0.121	9.87	<0.001	0.20	1.000
粗脂肪 Ether extract	61.76	<0.001	2.80	0.069	0.81	0.678
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	0.07	1.000	0.80	0.455	0.06	1.000
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	0.32	0.965	0.17	0.847	0.05	1.000
粗灰分 Crude ash	1.88	0.073	2.12	0.129	0.34	0.994

如表3和图1所示,所有处理组的王草株高、产量,连续3年均呈上升趋势,其中CK、Y_1、J_1、J_3组株高第3年显著高于第1年,产量则表现为各组连续3年均显著提升。Q_2组3年平均株高、产量均最高并显著高于CK组,其余处理同等硒使用量下均无显著差异。

表3 不同外源硒对王草株高、产量的影响

Table 3 Effects of different exogenous selenium on the plant height and yield of king grass

项目 Items	年份 Year	CK	Y_1	Y_2	Y_3	J_1	J_2	J_3	Q_1	Q_2	Q_3
株高 Plant height (cm)	2022	189.99± 8.95Bd	180.81± 11.01Bd	208.61± 7.92Abc	211.22± 11.97Abc	183.57± 8.65Bd	214.88± 11.37Aabc	196.70± 10.12Bcd	218.46± 10.01Aab	232.90± 13.28Aa	224.47± 8.10Aab
	2023	214.44± 13.39Ab	217.81± 13.60Ab	223.02± 10.22Aab	223.02± 8.12Aab	226.33± 12.91Aab	233.82± 10.19Aab	232.52± 12.01ABab	226.57± 11.99Aab	243.73± 11.56Aa	233.96± 11.09Aab
	2024	222.82± 10.57Ab	219.76± 13.72Ab	225.77± 11.95Ab	228.53± 12.95Ab	228.95± 13.06Ab	238.87± 12.64Aab	233.35± 12.35Aab	228.40± 8.62Ab	253.53± 11.94Aa	234.16± 12.39Aab
产量 Yield ($t \cdot hm^{-2}$)	2022	117.87± 6.47Ce	125.04± 6.86Ce	145.29± 8.01Cd	145.24± 7.36Cd	145.95± 7.39Cd	209.04± 12.52Cb	188.97± 9.45Cc	205.94± 11.31Cbc	266.20± 14.67Ca	201.65± 9.12Cbc
	2023	187.10± 10.24Bf	198.00± 9.80Bf	249.97± 14.26Bcde	242.33± 14.24Bde	229.90± 13.16Be	295.93± 19.40Bb	270.27± 13.25Bc	247.20± 11.73Bcde	339.79± 19.98Ba	252.76± 12.76Bcd
	2024	246.31± 10.74Af	244.91± 10.68Af	305.72± 12.69Acd	287.99± 15.97Ade	267.28± 15.15Aef	339.25± 21.82Ab	316.80± 14.92Abc	282.83± 14.96Ade	381.77± 19.28Aa	294.79± 16.18Acde

注:同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一处理不同年份间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters within the same line indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level, different capital letters indicate significant differences among different years within the same treatment at the 0.05 level, the same below.

各处理组株高为180.81~253.53 cm,第1年除Y_1、J_1、J_3组外其他施硒处理组显著高于CK组($P<0.05$),其中Q_2组最高且较同期CK组提升了22.59%;第2、3年Q_2组分别较同期CK组显著提升了13.66%、13.78%($P<0.05$),其他施硒处理组与CK组相比无显著差异($P>0.05$)。连续3年,除Y_1组和2024年的J_1组外,所有施硒处理组的王草产量在各个年份均显著高于CK组($P<0.05$),其中Q_2组连续3年均最高,分别较同期CK组提升了

125.84%、81.61%、55.00%。在 0.50 mg·kg^{-1}施硒浓度下，王草产量连续 3 年均表现为蚯蚓硒组显著高于亚硒酸钠组（$P<0.05$）；在 1.00 mg·kg^{-1}施硒浓度下，王草产量连续 3 年均表现为蚯蚓硒组显著高于酵母硒和亚硒酸钠组（$P<0.05$）；在 2.00 mg·kg^{-1}施硒浓度下，王草产量在不同外源硒处理间无显著差异（$P>0.05$）。在不同施硒浓度的蚯蚓硒组中，王草产量连续 3 年均表现为 Q_2 组显著高于 Q_1、Q_3 组（$P<0.05$）。

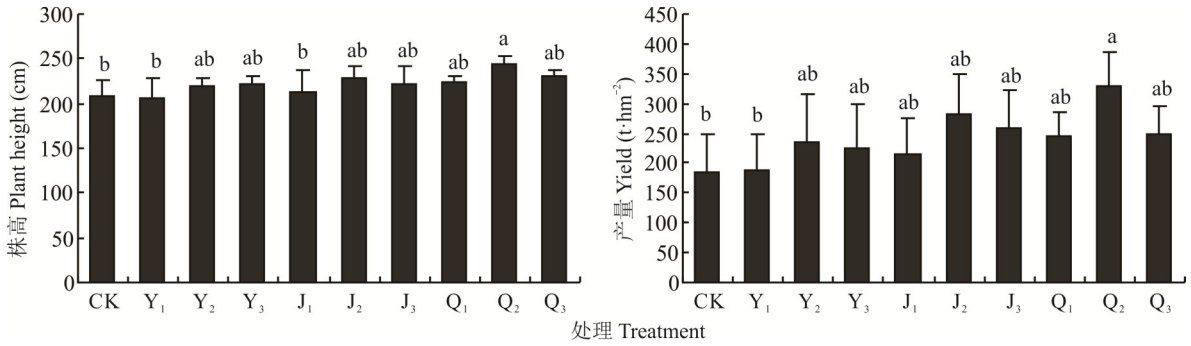


图 1　不同外源硒对王草 3 年平均株高、产量的影响

Fig. 1　Effects of different exogenous selenium on the average plant height and yield of king grass in 3 years

不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$），下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level, the same below.

如表 4 所示，所有施硒处理组连续 3 年及 3 年平均的粗脂肪含量在各个年份均显著高于 CK 组（$P<0.05$），其中 Q_2 组连续 3 年均显著高于 CK 和其他施硒处理组（$P<0.05$），且分别较同期 CK 组提升了 167.76%、178.48%、119.38%。在 0.50 和 1.00 mg·kg^{-1}两个施硒浓度下，王草粗脂肪含量连续 3 年均表现为蚯蚓硒组显著高于酵母硒和亚硒酸钠组（$P<0.05$）；在 2.00 mg·kg^{-1}施硒浓度下，王草粗脂肪含量 2023、2024 年均表现为蚯蚓硒组显著高于酵母硒组和亚硒酸钠组（$P<0.05$）。连续 3 年，各处理组的粗蛋白、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、粗灰分指标，与 CK 组相比均无显著差异（$P>0.05$）。

2.2　不同外源硒对王草和土壤镉含量的影响

如表 5 所示，不同处理组间王草总镉、土壤总镉、土壤有效镉含量和王草镉富集系数差异均极显著（$P<0.01$）。施硒处理不同年份间王草总镉、土壤总镉、土壤有效镉含量和王草镉富集系数差异均极显著（$P<0.01$）。在不同处理组和不同年份交互作用下，王草总镉含量差异显著（$P<0.05$）。

如表 6 和图 2 所示，连续 3 年，各外源硒处理下王草镉含量、镉富集系数随施硒浓度增加呈下降趋势，且均显著低于 CK 组，其中 CK、Y_1、Y_2、Y_3、J_1、J_2、Q_1 组王草镉含量第 3 年均显著低于第 1 年（$P<0.05$），而镉富集系数除 J_3、Q_2 组第 3 年显著高于第 1 年外（$P<0.05$），其余年份间均无显著差异（$P>0.05$）。3 年平均上看，蚯蚓硒组同等施硒浓度下王草镉含量均显著低于亚硒酸钠组，并在 1.0、2.0 mg·kg^{-1}浓度上显著低于酵母硒组（$P<0.05$）。同时蚯蚓硒组同等施硒浓度下镉富集系数均显著低于酵母硒和亚硒酸钠组，酵母硒组均显著低于亚硒酸钠组（$P<0.05$）。

Q_3 组王草总镉含量连续 3 年均显著低于 CK 和其他施硒处理组（$P<0.05$），其较同期 CK 组分别降低了 80.56%、78.79%、77.42%。连续 3 年，Q_2、Q_3 组王草镉富集系数在各个年份均显著低于 CK 和其他施硒处理组（$P<0.05$），其中 Q_3 组王草镉富集系数最低，较同期 CK 组分别降低了 79.29%、76.98%、75.71%。

如表 7 和图 3 所示，连续 3 年，各处理土壤镉含量及土壤有效镉含量均呈下降趋势且后者随施硒浓度增加而下降，土壤镉和有效镉含量第 3 年均显著低于第 1 年（$P<0.05$）。

2022 年所有施硒处理组土壤总镉含量与 CK 组相比无显著差异（$P>0.05$），2023 年 Q_2 组土壤总镉含量显著低于 CK 组（$P<0.05$），2024 年 J_2、Q_1、Q_2、Q_3 组土壤总镉含量显著低于 CK 组（$P<0.05$），其中 Q_2 组 2023 和 2024 年

表4 不同外源硒对王草营养品质的影响

Table 4 Effects of different exogenous selenium on the nutritional quality of king grass (%)

项目 Items	年份 Year	CK	Y_1	Y_2	Y_3	J_1	J_2	J_3	Q_1	Q_2	Q_3
粗蛋白 Crude protein	2022	6.08± 0.32Aa	6.14± 0.31Aa	6.35± 0.31Aa	6.21± 0.29Aa	6.21± 0.28Aa	6.33± 0.37Aa	6.28± 0.33Aa	6.36± 0.33Aa	6.58± 0.30Aa	6.43± 0.34Aa
	2023	6.28± 0.29Aa	6.56± 0.41Aa	6.75± 0.34Aa	6.44± 0.30Aa	6.53± 0.34Aa	6.70± 0.27Aa	6.49± 0.28Aa	6.78± 0.31Aa	6.90± 0.34Aa	6.62± 0.29Aa
	2024	6.41± 0.40Aa	6.62± 0.30Aa	6.53± 0.34Aa	6.48± 0.29Aa	6.63± 0.31Aa	6.63± 0.34Aa	6.79± 0.32Aa	6.76± 0.32Aa	6.80± 0.35Aa	6.65± 0.29Aa
	平均 Average	6.26± 0.17a	6.44± 0.26a	6.54± 0.20a	6.38± 0.15a	6.46± 0.22a	6.55± 0.20a	6.52± 0.26a	6.63± 0.24a	6.76± 0.16a	6.57± 0.12a
粗脂肪 Ether extract	2022	2.45± 0.15Ae	3.40± 0.18Ad	4.18± 0.15Acd	3.53± 0.20Acd	3.64± 0.30Acd	4.43± 0.26Ac	3.79± 0.19Acd	5.65± 0.23Ab	6.56± 0.34Aa	4.43± 0.24Ac
	2023	2.23± 0.08Ae	3.73± 0.20Ad	4.29± 0.15Acd	3.51± 0.10Ad	3.49± 0.13Ad	4.19± 0.30Acd	3.77± 0.11Ad	5.34± 0.22Ab	6.21± 0.38Aa	4.83± 0.21Abc
	2024	2.89± 0.09Af	3.72± 0.11Ae	4.34± 0.14Acde	3.90± 0.19Ade	3.95± 0.17Ade	4.64± 0.19Acd	4.18± 0.22Acde	4.93± 0.21Abc	6.34± 0.28Aa	5.54± 0.22Ab
	平均 Average	2.52± 0.34e	3.62± 0.19d	4.27± 0.08c	3.65± 0.22d	3.69± 0.24d	4.42± 0.22c	3.91± 0.23cd	5.31± 0.36b	6.37± 0.18a	4.93± 0.56b
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	2022	38.21± 2.23Aa	38.45± 2.04Aa	37.94± 1.80Aa	37.89± 1.87Aa	38.03± 1.92Aa	37.72± 1.99Aa	38.31± 1.76Aa	37.82± 1.73Aa	38.37± 1.81Aa	38.00± 2.12Aa
	2023	38.36± 1.76Aa	38.64± 1.99Aa	38.21± 1.75Aa	37.93± 1.66Aa	38.03± 1.66Aa	38.58± 1.82Aa	38.65± 2.05Aa	38.20± 1.95Aa	38.36± 2.40Aa	38.64± 1.82Aa
	2024	37.71± 1.99Aa	37.62± 1.72Aa	38.16± 1.66Aa	37.41± 2.08Aa	37.84± 1.73Aa	38.03± 1.66Aa	37.38± 1.98Aa	37.57± 1.35Aa	38.15± 1.80Aa	37.61± 1.90Aa
	平均 Average	38.09± 0.34a	38.24± 0.54a	38.10± 0.14a	37.74± 0.29a	37.97± 0.11a	38.11± 0.43a	38.11± 0.66a	37.86± 0.32a	38.29± 0.12a	38.08± 0.52a
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	2022	61.65± 2.83Aa	60.59± 3.38Aa	61.26± 2.21Aa	62.09± 2.92Aa	62.53± 3.48Aa	62.07± 2.70Aa	61.27± 3.60Aa	61.18± 3.24Aa	61.47± 3.84Aa	62.63± 2.87Aa
	2023	61.67± 2.58Aa	61.09± 3.57Aa	61.83± 3.18Aa	61.26± 2.55Aa	62.32± 2.86Aa	62.68± 2.26Aa	61.83± 3.27Aa	61.72± 2.83Aa	61.12± 3.15Aa	62.96± 2.75Aa
	2024	61.49± 2.82Aa	60.35± 2.76Aa	61.14± 3.07Aa	61.56± 2.90Aa	61.05± 3.14Aa	62.29± 2.71Aa	61.72± 3.44Aa	60.59± 2.53Aa	61.56± 2.32Aa	62.31± 3.30Aa
	平均 Average	61.60± 0.10a	60.68± 0.38a	61.42± 0.37a	61.64± 0.41a	61.97± 0.80a	62.35± 0.31a	61.61± 0.30a	61.16± 0.57a	61.38± 0.23a	62.63± 0.33a
粗灰分 Crude ash	2022	9.74± 0.51Aa	9.94± 0.66Aa	9.63± 0.51Aa	9.34± 0.39Aa	9.65± 0.49Aa	10.09± 0.38Aa	9.83± 0.45Aa	9.28± 0.44Aa	9.81± 0.45Aa	9.49± 0.45Aa
	2023	9.57± 0.44Aa	9.77± 0.41Aa	9.38± 0.48Aa	9.30± 0.35Aa	9.68± 0.51Aa	9.89± 0.46Aa	9.55± 0.35Aa	9.07± 0.41Aa	9.46± 0.39Aa	9.55± 0.50Aa
	2024	9.87± 0.45Aa	9.88± 0.37Aa	9.49± 0.38Aa	9.69± 0.46Aa	9.99± 0.47Aa	9.84± 0.45Aa	10.18± 0.52Aa	9.48± 0.59Aa	9.40± 0.55Aa	9.86± 0.52Aa
	平均 Average	9.73± 0.15a	9.86± 0.08a	9.50± 0.12a	9.44± 0.21a	9.78± 0.19a	9.94± 0.13a	9.85± 0.31a	9.28± 0.21a	9.56± 0.22a	9.63± 0.20a

均最低，分别较同期CK组降低了8.51%、17.78%。连续3年，各外源硒处理土壤有效镉含量除2022年J_1组外，均显著低于CK组($P<0.05$)，其中Q_3组土壤有效镉含量连续3年均为最低，较同期CK组分别降低了22.73%、30.00%、36.84%，且在第3年显著低于同等施硒浓度下的酵母硒组和亚硒酸钠组。

表 5　不同外源硒对王草和土壤镉含量的双因素方差分析

Table 5　Two-way analysis of variance of different exogenous selenium on the cadmium content of king grass and soil

项目 Items	处理组 Treatment group		年份 Year		处理组×年份 Treatment group×year	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
王草总镉 King grass total cadmium content	486.30	＜0.001	52.52	＜0.001	2.12	0.016
土壤总镉 Soil total cadmium content	3.63	＜0.010	123.86	＜0.001	0.31	0.996
土壤有效镉 Available cadmium content in soil	51.61	＜0.001	205.54	＜0.001	0.43	0.976
镉富集系数 Cadmium enrichment coefficient	615.24	＜0.001	6.05	＜0.010	1.29	0.229

表 6　不同外源硒对王草总镉含量及镉富集系数的影响

Table 6　Effects of different exogenous selenium on the total cadmium (Cd) content and Cd enrichment coefficients of king grass

项目 Items	年份 Year	CK	Y_1	Y_2	Y_3	J_1	J_2	J_3	Q_1	Q_2	Q_3
王草镉含量 King grass cadmium content ($mg \cdot kg^{-1}$)	2022	0.72± 0.04Aa	0.48± 0.02Ab	0.44± 0.03Ac	0.40± 0.02Ad	0.38± 0.02Ad	0.31± 0.02Ae	0.27± 0.01Ae	0.30± 0.02Ae	0.21± 0.01Af	0.14± 0.01Ag
	2023	0.66± 0.04ABa	0.41± 0.03Bb	0.38± 0.02Bbc	0.37± 0.02ABcd	0.33± 0.02Bd	0.29± 0.02ABe	0.26± 0.01Ae	0.28± 0.01ABe	0.20± 0.02Af	0.14± 0.01Ag
	2024	0.62± 0.03Ba	0.38± 0.03Bb	0.35± 0.02Bbc	0.34± 0.02Bc	0.30± 0.02Bd	0.27± 0.01Bde	0.26± 0.01Ae	0.26± 0.01Be	0.19± 0.01Af	0.14± 0.01Ag
镉富集系数 Cadmium enrichment coefficient	2022	1.40± 0.06Aa	0.93± 0.04Ab	0.86± 0.03Ab	0.78± 0.01Ac	0.74± 0.06Ac	0.62± 0.04Ad	0.54± 0.04Be	0.59± 0.01Ade	0.44± 0.04Bf	0.29± 0.01Ag
	2023	1.39± 0.04Aa	0.89± 0.05Ab	0.84± 0.01Abc	0.81± 0.06Ac	0.73± 0.02Ad	0.65± 0.04Ae	0.59± 0.02ABf	0.62± 0.03Aef	0.46± 0.04ABg	0.32± 0.01Ah
	2024	1.40± 0.01Aa	0.89± 0.06Ab	0.86± 0.02Abc	0.81± 0.02Ac	0.72± 0.02Ad	0.69± 0.04Ade	0.63± 0.03Af	0.66± 0.05Aef	0.51± 0.01Ag	0.34± 0.01Ah

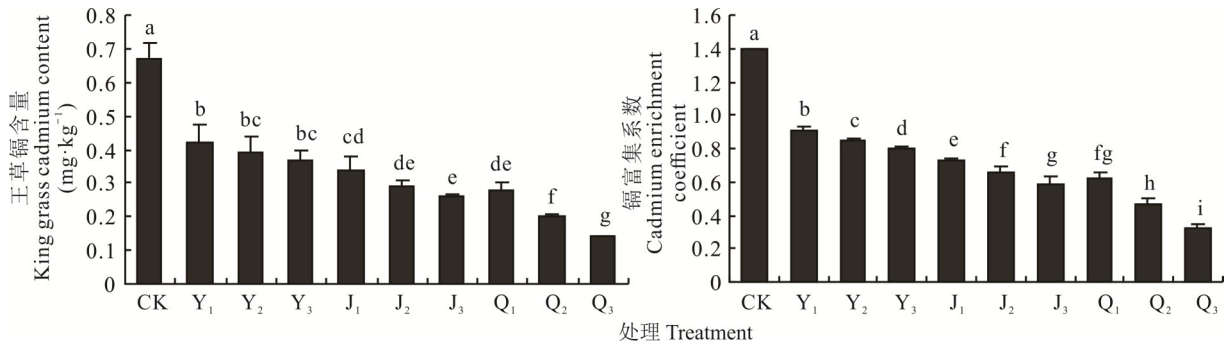


图 2　不同外源硒对王草 3 年平均总镉含量及镉富集系数的影响

Fig. 2　Effects of different exogenous selenium on the average total cadmium (Cd) content and Cd enrichment coefficients of king grass in 3 years

2.3　不同外源硒对王草和土壤硒含量的影响

如表 8 所示，不同处理组间、不同年份间及二者的交互作用下，王草总硒、土壤总硒含量、王草硒富集系数差异均极显著（$P<0.001$）。

如表 9 和图 4 所示，连续 3 年，各外源硒处理下王草和土壤硒含量均随施硒浓度增加呈上升趋势，且均显著高于 CK 组，但第 3 年均显著低于第 1 年（$P<0.05$）。从 3 年平均上看，3 种硒源相同浓度下王草和土壤硒含量无显著差异（$P>0.05$）。各处理中，Q_3 组王草硒含量连续 3 年均最高，分别较同期 CK 组提升了 1169.23%、958.33%、925.00%，Y_3 组土壤硒含量连续 3 年均最高，分别较同期 CK 组提升了 1033.33%、1050.00%、1290.67%。

表7 不同外源硒对土壤总镉、有效镉含量的影响

Table 7 Effects of different exogenous selenium on the content of total cadmium (Cd) and available Cd in soil (mg·kg^{-1})

项目 Items	年份 Year	CK	Y_1	Y_2	Y_3	J_1	J_2	J_3	Q_1	Q_2	Q_3
土壤镉含量 Soil cadmium content	2022	0.52± 0.03Aa	0.52± 0.04Aa	0.50± 0.02Aa	0.51± 0.02Aa	0.51± 0.02Aa	0.50± 0.03Aa	0.51± 0.02Aa	0.50± 0.03Aa	0.49± 0.02Aa	0.51± 0.03Aa
	2023	0.47± 0.02ABa	0.47± 0.04ABab	0.46± 0.02Bab	0.45± 0.02Bab	0.46± 0.02Bab	0.44± 0.02Bab	0.45± 0.03Bab	0.44± 0.02Bab	0.43± 0.02Bb	0.44± 0.02Bab
	2024	0.45± 0.02Ba	0.43± 0.02Bab	0.41± 0.01Cabc	0.42± 0.02Babc	0.42± 0.02Cabc	0.40± 0.01Cbcd	0.41± 0.03Babc	0.39± 0.02Ccd	0.37± 0.02Cd	0.40± 0.01Bbcd
土壤有效镉含量 Available cadmium content in soil	2022	0.22± 0.01Aa	0.20± 0.01Abc	0.18± 0.01Ade	0.18± 0.01Acde	0.21± 0.01Aab	0.19± 0.01Acd	0.18± 0.01Acde	0.18± 0.01Acde	0.17± 0.01Ae	0.17± 0.01Ae
	2023	0.20± 0.01Ba	0.17± 0.01Bbc	0.15± 0.01Bde	0.14± 0.01Bef	0.18± 0.01Bb	0.16± 0.01Bcd	0.15± 0.01Bde	0.15± 0.01Bde	0.14± 0.01Bef	0.14± 0.01Bf
	2024	0.19± 0.01Ba	0.16± 0.01Bb	0.14± 0.01Cc	0.14± 0.01Bc	0.16± 0.01Bb	0.14± 0.01Cc	0.14± 0.01Bc	0.14± 0.01Bc	0.12± 0.01Cd	0.12± 0.01Cd

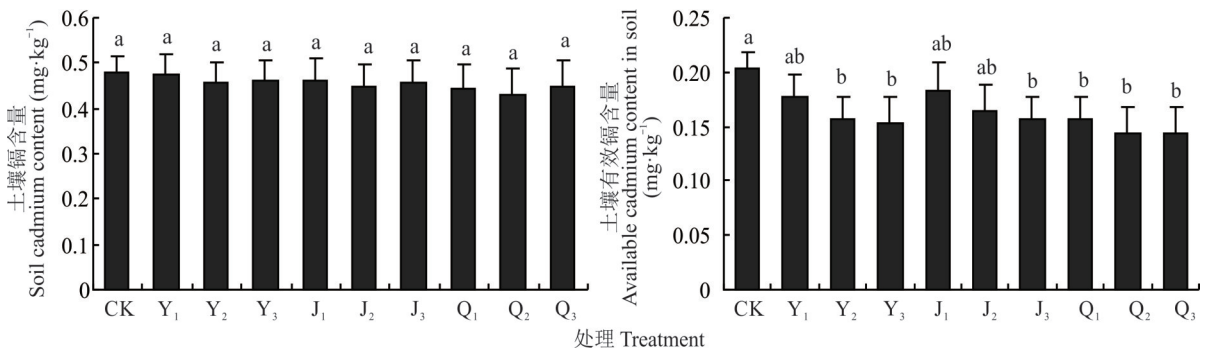


图3 不同外源硒对土壤3年平均总镉、有效镉含量的影响

Fig. 3 Effects of different exogenous selenium on the average content of total cadmium (Cd) and available Cd in soil in 3 years

表8 不同外源硒对王草和土壤硒含量的双因素方差分析

Table 8 Two-way analysis of variance of different exogenous selenium on the selenium content of king grass and soil

项目 Items	处理组 Treatment group		年份 Year		处理组×年份 Treatment group×year	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
王草总硒 King grass total selenium content (mg·kg^{-1})	831.25	<0.001	849.57	<0.001	34.19	<0.001
土壤总硒 Soil total selenium content (mg·kg^{-1})	1445.73	<0.001	269.32	<0.001	5.43	<0.001
硒富集系数 Selenium enrichment coefficient	387.41	<0.001	141.55*	<0.001	14.83	<0.001

王草硒富集系数3年平均表现为0.5、1.0 mg·kg^{-1}浓度下蚯蚓硒组显著高于酵母硒和亚硒酸钠组。连续3年，Q_2组王草硒富集系数在各个年份均显著高于CK和其他施硒处理组($P<0.05$)，较同期CK组分别提升了54.93%、49.33%、50.00%。

2.4 不同外源硒对镉污染土壤中王草种植效果的综合评价

如表10所示，隶属函数值越大，说明该处理的王草种植效果越好，综合3年王草种植效果排序为$Q_2>Q_1>Q_3>Y_3>J_3>Y_2>J_2>J_1>Y_1>CK$，$Q_2$组连续3年效果均最好，隶属函数均值达0.7778。

表 9　不同外源硒对王草总硒含量及硒富集系数的影响

Table 9　Effects of different exogenous selenium on the total selenium (Se) content and Se enrichment coefficients of king grass

项目 Items	年份 Year	CK	Y_1	Y_2	Y_3	J_1	J_2	J_3	Q_1	Q_2	Q_3
王草硒含量 King grass selenium content ($mg\cdot kg^{-1}$)	2022	0.13± 0.01Ai	0.48± 0.03Ah	0.88± 0.04Af	1.21± 0.05Ac	0.55± 0.03Ag	1.00± 0.05Ae	1.40± 0.05Ab	0.58± 0.03Ag	1.10± 0.04Ad	1.65± 0.07Aa
	2023	0.12± 0.01Ai	0.43± 0.03Ah	0.69± 0.04Bf	0.96± 0.04Bc	0.49± 0.03Bgh	0.78± 0.03Be	1.09± 0.05Bb	0.50± 0.02Bg	0.86± 0.05Bd	1.27± 0.06Ba
	2024	0.08± 0.01Bf	0.35± 0.01Be	0.52± 0.03Cd	0.69± 0.03Cb	0.33± 0.01Ce	0.56± 0.03Cd	0.78± 0.05Ca	0.38± 0.02Ce	0.62± 0.02Cc	0.82± 0.04Ca
土壤硒含量 Soil selenium content ($mg\cdot kg^{-1}$)	2022	0.18± 0.01Ad	0.65± 0.04Ac	1.05± 0.06Ab	2.04± 0.09Aa	0.64± 0.03Ac	1.03± 0.06Ab	2.02± 0.07Aa	0.62± 0.02Ac	0.99± 0.04Ab	1.99± 0.09Aa
	2023	0.16± 0.01Bf	0.58± 0.04Ae	0.87± 0.04Bc	1.84± 0.05Ba	0.56± 0.03Be	0.83± 0.04Bcd	1.80± 0.06Bab	0.52± 0.03Bd	0.77± 0.02Bd	1.74± 0.06Bb
	2024	0.12± 0.01Cg	0.49± 0.03Be	0.73± 0.03Cc	1.67± 0.06Ca	0.49± 0.03Ce	0.68± 0.04Cc	1.65± 0.08Ca	0.38± 0.02Cd	0.58± 0.02Cd	1.53± 0.07Cb
硒富集系数 Selenium enrichment coefficient	2022	0.71± 0.02Bde	0.74± 0.01Ad	0.84± 0.01Ac	0.59± 0.02Af	0.86± 0.02Ac	0.97± 0.02Ab	0.69± 0.05Ae	0.94± 0.03Bb	1.10± 0.01Aa	0.83± 0.04Ac
	2023	0.75± 0.01Ade	0.74± 0.06Ade	0.79± 0.02Bd	0.52± 0.01Bg	0.87± 0.01Ac	0.94± 0.01Bb	0.60± 0.04Bf	0.97± 0.01ABb	1.12± 0.03Aa	0.73± 0.01Be
	2024	0.72± 0.01Bd	0.72± 0.02Ad	0.72± 0.01Cd	0.42± 0.03Cg	0.68± 0.05Bd	0.82± 0.01Cc	0.48± 0.02Cf	1.00± 0.04Ab	1.08± 0.01Aa	0.53± 0.05Ce

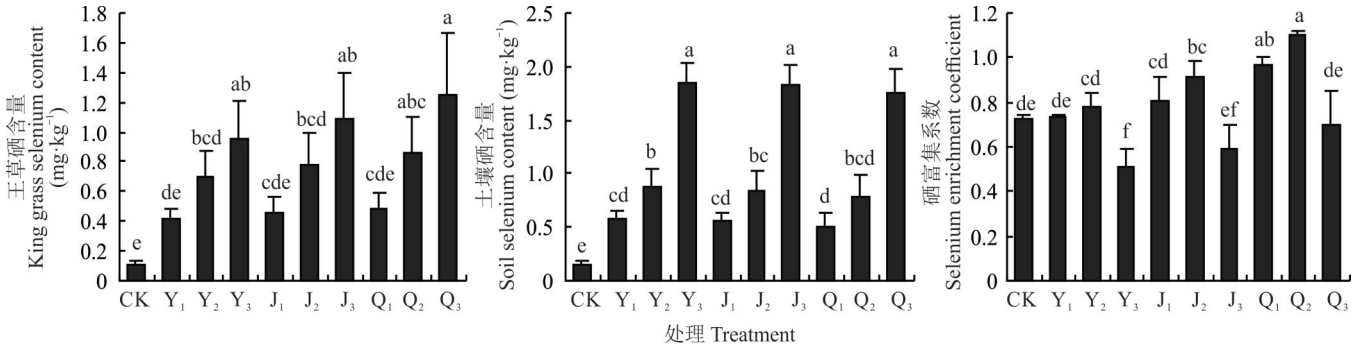


图 4　不同外源硒对王草 3 年平均总硒含量及硒富集系数的影响

Fig. 4　Effects of different exogenous selenium on the average total selenium (Se) content and Se enrichment coefficients of king grass in 3 years

表 10　不同外源硒处理下王草种植效果的隶属函数值

Table 10　Subordinate function values of the planting effect of king grass under different exogenous selenium treatments

年份 Year	CK	Y_1	Y_2	Y_3	J_1	J_2	J_3	Q_1	Q_2	Q_3
2022	0.1575	0.2426	0.5013	0.4955	0.3073	0.5233	0.4708	0.6774	0.7268	0.6497
2023	0.1803	0.3039	0.5198	0.5488	0.3990	0.4340	0.4707	0.6021	0.8266	0.4868
2024	0.1547	0.4265	0.4449	0.5084	0.4171	0.4773	0.6030	0.6432	0.7801	0.5953
平均值 Average	0.1642	0.3243	0.4886	0.5176	0.3744	0.4782	0.5148	0.6409	0.7778	0.5773
排序 Rank	10	9	6	4	8	7	5	2	1	3

3 讨论

3.1 不同外源硒对镉污染土壤中王草株高、产量、营养品质的影响

土壤中镉含量过高对植物生长具有毒害作用[45],镉胁迫会诱导植物体内产生过量活性氧使膜脂发生过氧化反应,进而破坏叶绿体的双层膜结构,危害植物光合作用造成植物产量下降[46-47]。前人研究表明,硒能清除体内自由基,保护细胞膜免受氧化损伤,同时还能提升植物体内叶绿素含量,改善叶片光合速率,通过施硒可以减弱镉对植物的毒害作用,进而提高植物产量[48-49]。陈钟佃等[27]研究发现土壤中施硒可有效促进杂交狼尾草的生长。本研究通过施用不同外源硒在镉污染土地种植王草发现,除Y_1、J_1组外,连续3年其余施硒处理组的鲜草产量均显著高于CK组(未施硒),这与上述研究相似。本研究中,3种外源硒处理不同施硒浓度对王草产量的影响均表现为先升高后降低的趋势,其中1.00 mg·kg^{-1}浓度下产量最高,这与Bai等[50]的研究结论一致。可能的原因是,低浓度的硒有利于促进植物生长发育,提高产量和品质[51],而过高浓度的硒会导致植物发生氧化应激产生大量活性氧,导致植物代谢异常,进而对王草的生长发育产生一定的抑制作用[52]。3种外源硒对王草生长的促进作用表现为蚯蚓硒优于酵母硒,酵母硒优于亚硒酸钠。有研究表明,有机硒促进植物生长的效果要优于无机硒[20,53],本研究结论与其相似。需要特别指出的是,蚯蚓硒组在促进王草生长和产量方面表现尤为突出,其原因可能不仅在于硒本身的生理功能,还与其作为有机肥源带入的附加养分效应密切相关。相较于成分较为单一的酵母硒和亚硒酸钠,本研究使用的蚯蚓硒是由蚯蚓自身酶解后产生的富含有机硒的蚯蚓营养液,除了本身含有一定量的氮磷钾等植物必需的养分外,还富含18种必需氨基酸[54]、超氧化物歧化酶、蚓激酶等活性酶以及大量微量元素等[55],营养物质较为全面,这一附加效应是亚硒酸钠和酵母硒所不具备的。因此,在本试验条件下,蚯蚓硒组王草在生长初期可能获得了优于其他处理的养分环境,从而建立了更好的生长基础。

粗蛋白、粗脂肪、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、粗灰分是评价饲草营养品质的主要指标,其中粗蛋白、粗脂肪为优良指标且数值大为优,酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、粗灰分为劣性指标且数值小为优。本研究结果显示,连续3年所有施硒处理组粗脂肪含量在各个年份均显著高于CK组,说明施硒能促进镉污染土壤中王草粗脂肪的提升。保虎德等[56]发现施加亚硒酸钠的蒙古黄芪(*Astragalus membranaceus*)粗脂肪含量比CK组提升了5.98%,胡华锋等[57]发现基施适量硒肥(0.15~1.05 kg·hm^{-2})的紫花苜蓿粗脂肪含量可达1.02%~2.21%,且显著高于CK组(0.86%),本研究中施硒促进王草粗脂肪含量提升的结果与其一致,原因可能在于施硒能通过提升谷胱甘肽过氧化物酶等抗氧化酶的活性、改善光合作用的方式优化细胞内的脂质合成和存储环境[58],同时有研究发现适量的硒可以调节植物脂肪酶活力[59],因此促进了王草植株内脂肪的积累。然而施硒处理对王草粗蛋白、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维等指标无显著影响,这与朱娟娟等[60]研究发现外源硒对饲用苎麻(*Boehmeria nivea*)的粗蛋白等营养指标影响幅度较小的结论类似,可能的原因在于硒在植物体内的主要生理功能体现在提升抗氧化酶的活性,而非直接参与蛋白质或细胞壁纤维物质的合成代谢[61],同时本研究在镉污染胁迫环境下,外源硒的生理功能可能优先用于拮抗镉毒害,削弱了硒对常规营养品质的调控能力。综合来看,基施1.0 mg·kg^{-1}蚯蚓硒对王草株高、产量、营养品质的提升效果最佳。

3.2 不同外源硒对王草和土壤镉、硒含量的影响

本研究结果显示,在镉污染土地种植王草后,土壤镉含量呈下降趋势,这与曾志良等[62]在重金属污染土壤种植王草1年后土壤镉含量下降的结论一致。硒与镉存在一定拮抗作用,可通过与镉形成络合物的方式降低镉的生物可利用度,同时硒还可富集在植物体内,实现富硒效果。本研究中连续3年,各外源硒处理王草总镉含量随施硒浓度增加呈下降趋势,且均显著低于CK组,说明在0.50~2.00 mg·kg^{-1}的施硒浓度范围内,施硒浓度越高对王草总镉含量降低效果越好,且本试验施硒浓度均能有效降低镉污染土壤中王草的总镉含量,这与徐境懋等[26]基施硒肥(0.50、2.50 mg·kg^{-1})中2.50 mg·kg^{-1}浓度降低水稻镉含量效果最好的研究结果一致。本研究各外源硒处理中,1.00、2.00 mg·kg^{-1}施用浓度下蚯蚓硒抑制王草吸收镉的效果均显著优于酵母硒和亚硒酸钠。这可能是因为小分子有机硒能够直接被植物吸收利用[63],本研究中采用的蚯蚓硒是蚯蚓自身酶解形成,蚯蚓酶解产物中80%以上是分子量300以下的小分子多肽、小肽和氨基酸[54],前人研究证实蚯蚓在转化过程中能将绝大部分无机

硒转化为硒代蛋氨酸和硒代半胱氨酸等游离态小分子氨基酸[23]，这类小分子有机硒可直接通过植物根系的氨基酸或水通道蛋白转运系统被高效吸收[15]。而酵母硒主要是以硒代蛋氨酸等形式与酵母菌体蛋白及多糖紧密结合，形成大分子复合物[64]，植物根系难以直接吸收利用，可能需要经过土壤微生物或根际酶对酵母细胞壁和蛋白质逐步分解才能释放可利用的小分子硒源，这一过程存在效率延迟。同时小分子硒更容易与镉形成植物难以利用的Cd－Se络合物，本研究中虽然各处理土壤总镉含量与CK组无显著差异，但土壤有效镉含量在各处理下显著下降，其中蚯蚓硒组有效镉含量低于酵母硒组，因此本研究中同等浓度下施用蚯蚓硒对降低镉富集、提升硒富集的效果优于酵母硒。而蚯蚓硒相较于亚硒酸钠具有更高的生物利用度[14]，使得其对降低镉富集、提升硒富集的效果更好。此外，本研究中CK组和所有施硒处理组的王草总镉含量均低于1.0 mg·kg^{-1}，均符合饲料卫生标准（GB 13078－2017，植物性饲料原料镉含量低于1.0 mg·kg^{-1}）[9]。但CK组第1年王草镉含量达0.72 mg·kg^{-1}，存在超标风险，而在施用外源硒后，可将王草镉含量降到相对安全的水平，且连续3年镉含量和镉富集系数均呈持续下降的趋势，表明通过该施硒处理后的王草可作为畜禽饲料安全利用。

本研究结果显示，连续3年，各外源硒处理下王草总硒含量随施硒浓度增加呈显著上升趋势，且均显著高于CK组，施硒能促进王草对硒元素的富集，这与陈钟佃等[27]在不同施硒浓度种植杂交狼尾草提升硒含量的趋势一致，但本研究施用2.00 mg·kg^{-1}亚硒酸钠后王草硒含量为1.4 mg·kg^{-1}，低于陈钟佃等[27]在同等硒浓度下的2.48 mg·kg^{-1}。两个试验虽均采用红壤（pH≈6.0）及杂交狼尾草属材料，但本研究在镉污染土壤中进行，硒与镉形成难被植物吸收的Se－Cd络合物，从而降低了硒的有效性，此外，本试验土壤有机质含量（30.02 g·kg^{-1}）远高于陈钟佃等[27]的研究（1.70 g·kg^{-1}），有机质对硒的吸附固定可能影响其生物有效性[65]，同时尽管同为杂交狼尾草，品种差异（热研4号vs闽牧7号）也可能导致硒吸收与转运能力不同。各施硒处理中，Q_3组连续3年的王草总硒含量均最高，这与该组王草总镉含量最低的结果相对应。本研究结果显示，连续3年3种施硒处理硒富集系数均表现为先上升后下降的趋势，1.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒施用量的王草硒富集系数最高，这表明从外源硒的高效利用方面考虑，该施用量蚯蚓硒处理组对硒元素的利用效益最高，有利于降低外源硒施用成本、减少外源硒残留对环境造成的污染。

3.3　不同外源硒对镉污染土壤中王草种植效果的综合评价

粗蛋白、粗脂肪、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、粗灰分含量是衡量王草营养价值的重要指标，株高、产量、总镉、总硒含量是衡量王草生长发育情况、影响镉污染土地不同外源硒处理对王草种植效益和推广价值的重要指标，各指标具有相同的权重。本研究中不同指标排序结果并不一致，而从某单一指标评价不同外源硒对镉污染土壤中王草种植的效果具有一定的片面性，本研究采用隶属函数法对王草种植效果进行综合评价，结果更为客观准确。结果显示，Q_2组连续3年排序均为第一，平均隶属函数值达0.7778，综合来看可作为轻度镉污染土地种植王草的最佳施硒处理。

尽管数据显示2.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒处理（Q_3）在王草镉含量与王草硒含量两个单项指标上效果最优，但综合评价仍首推Q_2处理。这一结论源于对研究目标、生产安全性与应用经济性的综合权衡，首先，本研究核心目标是在镉污染土地上实现王草的安全生产与稳定高产。产量是评价土地利用效率与饲草供给能力的重要指标，Q_2处理连续3年产量均显著高于Q_3。其次，在技术安全性的角度，Q_2处理已能将王草镉含量稳定控制在远低于《饲料卫生标准》[9]的安全水平。同时，硒对植物生长存在“低促高抑”的效应，过高浓度的硒可能接近植物硒毒性的临界阈值，抑制生长并带来潜在的土壤残留风险。因此，从长期农用安全性与生产稳定性考量，Q_2是更优的选择。最后，从经济可行性的角度考虑，Q_3处理的硒施用量是Q_2的两倍，意味着直接投入成本倍增。然而，其带来的边际收益并未伴随产量的增长，反而导致产量下降，投入产出效益低。Q_2处理以更经济的投入，同步实现了“显著增产、安全降镉、有效富硒”的核心目标，更具推广优势。

4　结论

镉污染土壤中种植王草，所有施硒处理均能提升王草的粗脂肪含量，提高株高和鲜草产量，其中基施1.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒组提升效果最好。连续3年，各外源硒处理王草镉含量和镉富集系数随施硒浓度增加呈下降趋

势,且各组土壤总镉含量呈下降趋势,王草硒含量随施硒浓度增加呈上升趋势,其中基施2.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒组效果最好。

综合来看,基施1.00 mg·kg^{-1}蚯蚓硒组连续3年王草产量、营养品质和镉硒含量等指标的隶属函数均值最大(达0.7778),为镉污染土壤中王草种植的最佳外源硒施用模式。在该模式下,王草种植效果最好且镉含量符合饲料卫生标准,能满足牛羊的粗饲料质量要求。

参考文献 References:

[1] Cao X F, Sun B, Chen H B, *et al*. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 336-348.
曹晓风, 孙波, 陈化榜, 等. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 336-348.

[2] Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Report of national soil pollution survey. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2014.
环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 北京: 环境保护部, 2014.

[3] Zhang Y Y. Temporal and spatial distribution and risk assessment of cadmium in farmland soils in China based on bibliometrics. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
张云芸. 基于海量文献的中国农田土壤重金属镉的时空分布及风险评价. 太原: 山西大学, 2019.

[4] Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment. Soil environmental quality-risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618-2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
生态环境部南京环境科学研究所. 土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[5] Welikala D, Robinson B H, Moltchanova E, *et al*. Soil cadmium mobilisation by dissolved organic matter from soil amendments. Chemosphere, 2021, 271(5): 129536-129545.

[6] Cao Q M, Zhang Y B, Wang B, *et al*. Effects of cutting and fertilization on biomass of *Pennisetum purpureum* Rich. ×*P. americana* King grass cv. Reyan No. 4. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(10): 50-54.
曹启民, 张永北, 王博, 等. 刈割和施肥对热研4号王草生物量影响初报. 广东农业科学, 2018, 45(10): 50-54.

[7] Zhao J M, Xia B, Meng Y, *et al*. Transcriptome analysis to shed light on the molecular mechanisms of early responses to cadmium in roots and leaves of king grass (*Pennisetum americanum*×*P. purpureum*). International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(10): 2532.

[8] Zhang K L, Zhang H X, Xie C, *et al*. *Piriformospora indica* colonization enhances remediation of cadmium and chromium co-contaminated soils by king grass through plant growth promotion and rhizosphere microecological regulation. Journal of Hazardous Materials, 2024, 462(1): 132728.

[9] China Feed Industry Association. Hygienical standard for feeds: GB 13078-2017. Beijing: Standards Press of China, 2017.
中国饲料工业协会. 饲料卫生标准: GB 13078-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[10] Guo Y K, Mao K, Cao H R, *et al*. Exogenous selenium (cadmium) inhibits the absorption and transportation of cadmium (selenium) in rice. Environmental Pollution, 2021, 268(1): 115829.

[11] Zhou X B, Yang J, Kronzucker H J, *et al*. Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: a review. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 586421.

[12] Cui J H, Liu T X, Li Y D, *et al*. Selenium reduces cadmium uptake into rice suspension cells by regulating the expression of lignin synthesis and cadmium-related genes. Science of the Total Environment, 2018, 644(4): 602-610.

[13] Qin X M. Effects of selenium on cadmium uptake, transport and physiological characteristics of winter wheat. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.
秦晓明. 硒对冬小麦镉吸收、转运及生理特性的影响. 郑州: 河南农业大学, 2019.

[14] Si Z X, Liang Z Z, Qian J C, *et al*. Research progress on absorption, transportation and metabolism mechanism of selenium in plants. Crops, 2023(2): 1-9.
司振兴, 梁郅哲, 钱建财, 等. 植物对硒的吸收、转运及代谢机制研究进展. 作物杂志, 2023(2): 1-9.

[15] Wang Q, Huang S Y, Huang Q Q, *et al*. Absorption and biotransformation of selenomethionine and selenomethionine-oxide by wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). Plants, 2024, 13(3): 13030380.

[16] Li L, Liu Q H, Yin C Y. Selenium biofortification in plants and application potential of microorganisms in selenium biofortification. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(6): 756－769.
李柳, 刘庆华, 尹春英. 植物硒生物强化及微生物在其中的应用潜力. 植物生态学报, 2023, 47(6): 756－769.

[17] Di X R, Jing R, Qin X, *et al*. Transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of different forms of selenium in reducing cadmium uptake and accumulation in wheat seedlings. Chemosphere, 2023, 340: 139888－139888.

[18] Hubei Feed Industry Association. Feed additive-Yeast selenium: T/ESL 32002－2023. Animal Breeding and Feed, 2025, 24(2): 147－150.
湖北省饲料工业协会. 饲料添加剂 酵母硒: T/ESL 32002－2023. 养殖与饲料, 2025, 24(2): 147－150.

[19] Gong T Z, Zhang D J. Effect of exogenous selenium application on selenium content and fruit quality as well as its physiological mechanism in walnut. Journal of Fruit Science, 2022, 39(8): 1443－1449.
龚天芝, 张德健. 外源硒对核桃硒含量和果实品质的影响及生理作用机制. 果树学报, 2022, 39(8): 1443－1449.

[20] Ma Y R, Ye C Z, Qiu F, *et al*. The effects of exogenous selenium on selenium-cadmium absorption, yield, and quality of cherry tomato in cadmium-contaminated soil. Journal of Yichun University, 2025, 47(6): 7－12, 25.
马彦如, 叶成长, 邱凤, 等. 外源硒对镉污染土壤樱桃番茄硒镉吸收、产量和品质的影响. 宜春学院学报, 2025, 47(6): 7－12, 25.

[21] Yue S Z, Wang R P, Cao Z X, *et al*. Research progress on selenium enrichment and transformation by earthworm *Eisenia fetida* and its potential application. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(11): 156－163.
岳士忠, 王瑞萍, 曹赞霞, 等. 蚯蚓(*Eisenia fetida*)对硒的富集转化研究进展及其应用潜力. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 156－163.

[22] Liu Z N, Wu L J, Tian Y L, *et al*. Optimization of the preparation process of selenium-enriched earthworm and its application effects in Muscovy Ducks. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(16): 214－220.
刘珍妮, 吴丽娟, 田玉玲, 等. 蚯蚓硒制备工艺优化及其在番鸭中的应用效果. 江苏农业科学, 2024, 52(16): 214－220.

[23] Yue S Z, Zhang H O, Zhen H Y, *et al*. Selenium accumulation, speciation and bioaccessibility in selenium-enriched earthworm (*Eisenia fetida*). Microchemical Journal, 2019, 145(3): 1－8.

[24] Zhang J, Xing J, Li X Y, *et al*. Study on the growth and development of tomato by earthworm hydrolysate. Horticulture & Seed, 2020, 40(4): 13－14.
张见, 邢军, 李欣屹, 等. 蚯蚓水解液对番茄生长发育的研究. 园艺与种苗, 2020, 40(4): 13－14.

[25] Huang Y B, Liang L, Zhuang Q L, *et al*. Earthworm nutrient solution promotes tomato growth and improves fruit quality. Northern Horticulture, 2025(1): 44－51.
黄玉波, 梁路, 庄秋丽, 等. 蚯蚓营养液促进番茄生长并改善其果实品质. 北方园艺, 2025(1): 44－51.

[26] Xu J M, Gu M H, Wei Y Y, *et al*. Effects of nano-selenium and sodium selenite application on cadmium accumulation in rice planting in cadmium contaminated soil. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(10): 2727－2734.
徐境懋, 顾明华, 韦燕燕, 等. 纳米硒和亚硒酸盐对镉污染土壤中水稻镉积累的影响. 南方农业学报, 2021, 52(10): 2727－2734.

[27] Chen Z D, Qiu S L, Feng D Q, *et al*. Effects of selenium application on the production and selenium accumulation of hybrid *Pennisetum*. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(3): 838－847.
陈钟佃, 邱水玲, 冯德庆, 等. 土壤施硒量对杂交狼尾草生长和硒积累的影响. 草地学报, 2024, 32(3): 838－847.

[28] National Soil Quality Standardization Technical Committee. Soil quality－Guidance on sampling techniques: GB/T 36197－2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
全国土壤质量标准化技术委员会. 土壤质量 土壤采样技术指南: GB/T 36197－2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[29] Fujian Inspection and Research Institute for Product Quality. Determination of arsenic, lead, copper, zinc, cadmium, chromium, nickel, magnesium, potassium, calcium, manganese, iron, selenium, molybdenum in soil by inductively coupled plasma mass spectrometry: DB35/T 1142－2020. Fuzhou: Fujian Provincial Market Supervision and Administration Bureau, 2020.
福建省产品质量检验研究院. 土壤中砷、铅、铜、锌、镉、铬、镍、镁、钾、钙、锰、铁、硒、钼的测定 电感耦合等离子体质谱法: DB35/T 1142－2020. 福州: 福建省市场监督管理局, 2020.

[30] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil quality－Analysis of available lead and cadmium contents in soils－Atomic absorption spectrometry: GB/T 23739－2009. Beijing: Standards Press of China, 2009.
中华人民共和国农业部. 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法: GB/T 23739－2009. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[31] State Forestry Administration. Nitrogen determination methods of forest soils: LY/T 1228—2015. Beijing: Standards Press of China, 2015.
国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015. 北京: 中国标准出版社, 2015.
[32] State Forestry Administration. Phosphorus determination methods of forest soils: LY/T 1232—2015. Beijing: Standards Press of China, 2015.
国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232—2015. 北京: 中国标准出版社, 2015.
[33] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing—Part 7: Method for determination of available phosphorus in soil: NY/T 1121.7—2014. Beijing: Standards Press of China, 2014.
中华人民共和国农业部. 土壤检测第7部分:土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2014. 北京: 中国标准出版社, 2014.
[34] State Forestry Administration. Potassium determination methods of forest soils: LY/T 1234—2015. Beijing: Standards Press of China, 2015.
国家林业局. 森林土壤钾的测定: LY/T 1234—2015. 北京: 中国标准出版社, 2015.
[35] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of exchangeable potassium and non-exchangeable potassium content in soil: NY/T 889—2004. Beijing: Standards Press of China, 2004.
中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889—2004. 北京: 中国标准出版社, 2004.
[36] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing—Part 6: Method for determination of soil organic matter: NY/T 1121.6—2006. Beijing: Standards Press of China, 2006.
中华人民共和国农业部. 土壤检测. 第6部分:土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
[37] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing—Part 2: Method for determination of soil pH: NY/T 1121.2—2006. Beijing: Standards Press of China, 2006.
中华人民共和国农业部. 土壤检测. 第2部分:土壤pH的测定: NY/T 1121.2—2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
[38] Feed Industry National Technical Committee. Determination of crude protein in feeds—Kjeldahl method: GB/T 6432—2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法: GB/T 6432—2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
[39] Feed Industry National Technical Committee. Determination of crude fat in feeds: GB/T 6433—2006. Beijing: Standards Press of China, 2006.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中粗脂肪的测定: GB/T 6433—2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
[40] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of acid detergent fiber (ADF) in feeds: NY/T 1459—2022. Beijing: Standards Press of China, 2022.
中华人民共和国农业农村部. 饲料中酸性洗涤纤维的测定: NY/T 1459—2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.
[41] Feed Industry National Technical Committee. Determination of neutral detergent fiber (NDF) in feeds: GB/T 20806—2022. Beijing: Standards Press of China, 2022.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定: GB/T 20806—2022. 北京: 中国标准出版社, 2022.
[42] Feed Industry National Technical Committee. Animal feeding stuffs—Determination of crude ash: GB/T 6438—2007. Beijing: Standards Press of China, 2007.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中粗灰分的测定: GB/T 6438—2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.
[43] Feed Industry National Technical Committee. Determination of cadmium in feeds: GB/T 13082—2021. Beijing: Standards Press of China, 2021.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中镉的测定: GB/T 13082—2021. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[44] Feed Industry National Technical Committee. Determination of selenium in feeds: GB/T 13883—2023. Beijing: Standards Press of China, 2023.
全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中硒的测定: GB/T 13883—2023. 北京: 中国标准出版社, 2023.
[45] Ding H N, Pan R Q, Lv H N, *et al*. Effects of foliar application of organic selenium and organic silicon on accumulation of cadmium and arsenic in rice. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(14): 215—220.
丁浩男, 潘荣庆, 吕浩能, 等. 叶面施用有机硒、有机硅对水稻累积镉、砷的影响. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 215—220.
[46] Guo F, Wu W F, Feng Y, *et al*. Interactive effects of selenium and cadmium on the growth and antioxidative enzymes in zucchini seedling. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(10): 2335—2342.
郭锋, 吴伟锋, 冯瑜, 等. 硒镉交互作用对西葫芦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响. 核农学报, 2020, 34(10): 2335—2342.
[47] Christian T, Michel H. Singlet oxygen in plants: Production, detoxification and signaling. Trends in Plant Science, 2009, 14(4):

219－228.

[48] Ebrahimi N, Stoddard F L, Hartikainen H, *et al*. Plant species and growing season weather influence the efficiency of selenium biofortification. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2019, 114: 111－124.

[49] Ganguly R, Sarkar A, Dasgupta D, *et al*. Unravelling the efficient applications of zinc and selenium for mitigation of abiotic stresses in plants. Agriculture, 2022, 12(10): 1551.

[50] Bai B Q, Wang Z, Gao L M, *et al*. Effects of selenite on the growth of alfalfa (*Medicago sativa* L. cv. Sadie 7) and related physiological mechanisms. Acta Physiologiae Plantarum, 2019, 41(6): 1－11.

[51] Rizwan M, Ali S, Zia-Ur-Rehman M, *et al*. Effects of selenium on the uptake of toxic trace elements by crop plants: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021, 51(21): 2531－2566.

[52] Bai X Q, Jia C Y, Li W S, *et al*. An investigation of foliar spraying of selenium fertilizer for selenium enrichment and cadmium reduction in alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(1): 50－60.
白旭琴, 贾春云, 李文栓, 等. 叶面喷施硒肥对紫花苜蓿富硒降镉效果的影响. 草业学报, 2024, 33(1): 50－60.

[53] Zhang Y W. Effects of different selenium types on cadmium uptake and transport in rice. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.
张祎雯. 不同类型硒对水稻吸收转运镉的影响机制. 合肥: 安徽农业大学, 2021.

[54] Li G L, Liao M, Zhang N, *et al*. The process of autolytic hydrolysis of protein by enzymatic hydrolysis in earthworm and the component characteristics of its enzymatic hydrolysates. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014, 36(6): 1373－1379.
李国雷, 廖敏, 张楠, 等. 蚯蚓蛋白水解酶自溶水解蚯蚓工艺及其产物组成特征. 江西农业大学学报, 2014, 36(6): 1373－1379.

[55] Jia J H, Liu P Y, Liu W, *et al*. Extraction technology and application of active ingredients in earthworm. Farm Products Processing, 2024(6): 103－107, 111.
贾京华, 刘蓬宇, 刘薇, 等. 蚯蚓中活性成分提取技术及应用研究. 农产品加工, 2024(6): 103－107, 111.

[56] Bao H D, Ma S J, Chen W F, *et al*. Effects of exogenous selenium combined with rhizobium treatment on growth and active components of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*. China Food Additives, 2024, 35(1): 51－59.
保虎德, 马生军, 陈文峰, 等. 外源硒结合根瘤菌处理对蒙古黄芪生长及其活性成分的影响. 中国食品添加剂, 2024, 35(1): 51－59.

[57] Hu H F, Jie X L, Guo X, *et al*. Effects of Se application as basal fertilizer on the nutrient contents and distribution rates of alfalfa at different growth stages. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(4): 871－877.
胡华锋, 介晓磊, 郭孝, 等. 基施硒肥对不同生育期紫花苜蓿营养含量及分配的影响. 草地学报, 2014, 22(4): 871－877.

[58] Chen S M, Li Z W, Zhang L X, *et al*. Research advances on the role of selenium in plants resistance to stress. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(3): 6－13.
陈思蒙, 李子玮, 张璐翔, 等. 硒在植物抵御胁迫中作用的研究进展. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 6－13.

[59] Li H X, Cai Y P, Chen H L, *et al*. Influence of selenium on peanut seedling growth and lipase activity. Journal of Shijiazhuang University, 2012, 14(6): 22－25.
李红侠, 蔡永萍, 陈红玲, 等. 不同浓度的硒对花生幼苗生长及脂肪酶活力的影响. 石家庄学院学报, 2012, 14(6): 22－25.

[60] Zhu J J, Yu C M, Chen J K, *et al*. Effects of exogenous selenium on grass yield and nutritive value of forage ramie. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(10): 144－155.
朱娟娟, 喻春明, 陈继康, 等. 外源硒对饲用苎麻草产量和营养价值的影响. 草业学报, 2019, 28(10): 144－155.

[61] Wu M L, Lu H N. Selenium improves wheat antioxidant capacity, photosynthetic capacity, and growth under cadmium stress. Photosynthetica, 2024, 62(3): 232－239.

[62] Zeng Z L, Huang Y J, Wu C B, *et al*. Screening of dominant plants for phytoremediation potential in the waste dump of the Shilu iron mining area contaminated with heavy metals. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2024, 44(5): 94－99.
曾志良, 黄钰洁, 吴春标, 等. 昌江石碌铁矿排土场边坡重金属污染土壤修复植物筛选. 热带农业科学, 2024, 44(5): 94－99.

[63] Chen J P, Liu Y X, Zeng C C, *et al*. Advance on uptake and transformation of selenium from soil to plants. Current

Biotechnology, 2017, 7(5): 421－427.
陈锦平, 刘永贤, 曾成城, 等. 植物对土壤硒的吸收转化研究进展. 生物技术进展, 2017, 7(5): 421－427.
[64] Chen S C, Chen H W, Gao X, *et al*. Research progress on the mechanism of selenium uptake and metabolism by *Saccharomyces cerevisiae* and the breeding. China Brewing, 2025, 44(9): 14－21.
陈世超, 陈红卫, 高祥, 等. 酿酒酵母吸收和转化硒的机制及菌种选育进展. 中国酿造, 2025, 44(9): 14－21.
[65] Qin H S, Jiang D H, Huang X J, *et al*. Effect of organic matter on Se (Ⅳ) sorption in acidic selenium-rich latosolic red soil in Guangxi. Soils, 2023, 55(2): 363－371.
覃惠松, 蒋代华, 黄雪娇, 等. 有机质对广西酸性富硒土中Se(Ⅳ)吸附解吸特性的影响. 土壤, 2023, 55(2): 363－371.