

Cd 胁迫对不同品种紫花苜蓿生长及 Cd 累积的影响

贾乐¹, 杨姝^{1,2}, 祖艳群^{1*}, 湛方栋¹, 李元¹

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201; 2. 云南农业大学理学院, 云南昆明 650201)

摘要 [目的] 筛选耐 Cd 品种且 Cd 高累积的苜蓿品种。[方法] 通过盆栽试验, 研究 Cd 胁迫下 20 个紫花苜蓿品种生物量、株高及植株体内 Cd 含量和 Cd 累积量的差异。[结果] 20 个紫花苜蓿品种生长对 Cd 的响应存在显著差异, Cd 胁迫下, 品种德钦的株高最高, 为 35.71 cm, 最低的品种是草原 1 号, 为 17.56 cm; Cd 胁迫下生物量最高的品种是金黄后, 为 3.52 g/株, 最低的品种是草原 1 号, 为 1.07 g/株; 不同品种对 Cd 的累积能力存在显著差异, Cd 累积量最高的品种是中苜 1 号, 为 33.576 mg/kg, Cd 累积量最低的品种是陕北, 为 3.620 mg/kg。[结论] 通过株高、生物量和 Cd 累积量分析得出, 对 Cd 耐性较高的品种有 3 个, Cd 高累积的品种有 3 个; 综合分析, 最终筛选出甘农 1 号为耐 Cd 品种且 Cd 高累积品种。

关键词 紫花苜蓿; Cd 累积; 品种筛选

中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)22-0061-04

Effect of Cd Stress on Growth and Cd Accumulation of Different Alfalfa Varieties

JIA Le¹, YANG Shu^{1,2}, ZU Yan-qun¹ et al (1. School of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201; 2. School of Science, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201)

Abstract [Objective] The aim was to screen out some varieties with resistance to Cd and high accumulation of Cd. [Method] Through pot experiment, the biomass, plant height and the difference of Cd content in plant and the Cd accumulation of 20 alfalfa varieties under Cd stress were studied. [Result] The 20 varieties of alfalfa growth response to Cd was significantly different. Under Cd stress, the plant height of Deqin was the highest, with 35.71 cm, and the grassland No.1 was the lowest, with 17.56 cm; under Cd stress, the biomass of golden was the highest, with 3.52 g/plant, and that of the prairie No.1 was the lowest, with 1.07 g/plant. Different varieties showed significant differences in accumulation ability of Cd; Zhongmu No.1 had the highest accumulation of Cd, with 33.576 mg/kg, and Shanbei had the lowest Cd accumulation, with 3.620 mg/kg. [Conclusion] Through analysis on plant height, biomass and Cd accumulation, it is found that three varieties have high tolerance to Cd, and three varieties have high accumulation of Cd; comprehensive analysis, Gannong No.1 shows high resistance to Cd and high accumulation ability of Cd.

Key words Alfalfa; Cd accumulation; Cultivar selection

由于人口的急剧增加、工农业的快速发展和大量农药化肥的使用等原因, 重金属污染越来越严重, 且重金属污染也在世界范围内引起广泛关注^[1]。紫花苜蓿的生长对 Cd 的响应存在“低促高抑”现象^[2-3], 当 Cd 浓度超过一定浓度后, 其种子发芽^[4-5]、生物量^[6]、植株形态^[7]等均会受到不同程度的抑制。然而, 不同品种之间的响应存在较大的差异。研究表明, 玉米作为粮食, 不同玉米品种对重金属的吸收存在明显差异, 通过种植重金属低累积的品种, 以生产出安全食品^[8-10]。黄瓜是世界性蔬菜, 栽培面积广, 鉴于不同黄瓜品种可能具有不同的磷累积能力, 可筛选出降磷能力较强的品种, 为降低高磷土壤磷素风险提供参考^[11-12]。目前对紫花苜蓿的品种筛选已有较多研究, 主要从生产性能、抗旱性、抗病性、产量及持久性等^[13-16]方面对不同苜蓿品种特性进行比较。大量研究表明, 弱秋眠性苜蓿品种具有较强的耐酸性土壤的能力, 同时还具有抗热性强、产量高、冬季生长活跃等优点^[17-19]。紫花苜蓿是一种对重金属耐受性较强的植物^[20-21], 已经被广泛证明是一种很有应用前景的土壤重金属修复植物, 它对镍、铜、镉、锌都有较好的富集作用^[22]。目前相关工作集中在特定品种对 Cd 的响应特征, 而对不同品种的 Cd 响应差异筛选的研究较少。笔者以不同品种的苜蓿的

生长特性和镉累积量为指标, 进行了分类比较, 以期筛选出耐 Cd 品种且 Cd 高累积的苜蓿品种, 为 Cd 污染土壤的修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料 供试土壤采自云南农业大学农场, 红壤土, pH 7.31, 有机质 30.18 g/kg, 全氮 2.68 g/kg, 碱解氮 56.73 mg/kg, 全磷 14.21 g/kg, 速效磷 82.83 mg/kg, 全钾 16.06 g/kg, 速效钾 521.76 mg/kg, 总 Cd 含量 0.98 mg/kg。供试紫花苜蓿种子购于蝶恋花种业有限公司, 品种名称及来源见表 1。

1.2 试验设计 于 2016 年 6 月在大棚内进行盆栽试验。盆栽试验设 2 个处理: 外源 Cd 添加量分别为 0, 50 mg/kg, 每个处理设 4 个重复; 试验用盆为圆形塑料花盆, 底部有圆孔(高度为 40 cm, 口内径为 35 cm), 每盆装 7 kg 土壤; 在土壤中拌入研成粉末状的 CdCl₂, 拌匀。用去离子水调节土壤含水量至最大持水量的 60% 左右, 平衡 14 d。挑选子粒饱满的苜蓿种子, 使用 10% H₂O₂ 消毒 30 min, 再用蒸馏水冲洗多次后晾干, 每盆 10 粒, 均匀撒播于盆内, 待出苗至 10 cm 左右时, 每盆留 5 株, 其余间去。生长期常规培育, 生长约 120 d 后收获, 测定相关指标, 包括形态指标(株高、生物量)以及 Cd 含量。

1.3 取样与 Cd 含量分析 在苜蓿成熟期进行采样, 每盆取长势比较均匀的植株样品。将样品用清水洗净后晾干, 放入 80 ℃烘箱中 12 h, 在干燥器中冷却至室温后用天平测定干重(精确到 0.01 g)为生物量(g/株)。在 105 ℃烘箱中杀青 30 min, 再调至 80 ℃烘 24 h 至样品完全烘干, 粉碎, 过 100 目

基金项目 环境保护部土壤污染综合治理重大专项(YNBY2016-002); NSFC-云南联合基金项目(U1202236); 云南省农田无公害生产科技创新团队项目(2017HC015)。

作者简介 贾乐(1992—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤重金属污染。* 通讯作者, 教授, 博士, 从事重金属污染生态与恢复生态研究。

收稿日期 2018-04-03

筛,待测 Cd 含量。经过 HNO₃-HCl 混酸体系消煮植株样品后,使用火焰原子吸收分光光度计测定 Cd 含量。

1.4 数据处理 所有数据的平均值、标准差均采用 Excel 2007 软件计算,数据的方差分析和相关性分析采用 SPSS 17.0软件。

性状变化率=(处理值-对照值)/对照值×100%

综合响应指数=株高变化率+生物量变化率

Cd 累积量=Cd 含量×生物量

表 1 供试紫花苜蓿品种及来源
Table 1 The tested alfalfa varieties and sources

序号 No.	品种名称 Varieties name	来源 Origin germplasm	序号 No.	品种名称 Varieties name	来源 Origin germplasm
1	河西	地方品种,由武威、张掖、酒泉 3 个地区长期种植的地方品种类型整理而来	11	维多利亚	
2	巨人 201+Z	引进品种,美国	12	三得利	引进品种,法国
3	甘农 1 号	黄花苜蓿和紫花苜蓿杂交育成,母本以内蒙古呼伦贝尔野生黄花苜蓿为主	13	陇中苜蓿	地方品种,主要分布在甘肃定西、平凉、静宁、兰州、临夏州等地区
4	阿勒泰杂花	地方品种,母本以新疆阿勒泰市野生黄花苜蓿为主	14	苜蓿王	引进品种,美国
5	中苜 1 号	中国农业科学院畜牧研究所选育	15	WL525HQ	冬季不休眠品种,近红外辐射育种技术选育
6	阿尔冈金	引进品种,北美	16	陕北	地方品种,主要分布在陕北地区
7	图牧 1 号	地方品种,母本以内蒙古图牧地区逸生黄花苜蓿为主	17	新疆大叶	地方品种,主要分布在陕北地区
8	新牧 2 号	新疆农业大学草业工程学院选育	18	草原 1 号	地方品种,主要分布在呼伦贝尔、昭乌达、哲里木、锡林郭勒和乌兰察布等高寒牧区
9	驯鹿	引进品种,由加拿大 Brett-Young Seeds 公司选育而成	19	游客	引进品种,美国
10	金黄后	引进品种,美国	20	德钦	地方品种,主要分布在云南省迪庆藏族自治州德钦县

2 结果与分析

2.1 Cd 对不同品种紫花苜蓿生长特征的影响 Cd 胁迫对 20 个紫花苜蓿品种株高、生物量均有影响(表 2)。不同品种紫花苜蓿在 Cd 胁迫下与对照相比,株高呈下降趋势的为河西、中苜 1 号、阿尔冈金、驯鹿、苜蓿王、陕北和草原 1 号。Cd 胁迫下株高增加的有阿勒泰杂花、图牧 1 号、新牧 2 号、金黄后和德钦。Cd 胁迫下紫花苜蓿的株高变化率在-35.30%~

44.48%,株高变化率最高为陇中苜蓿,最低为草原 1 号。不同品种紫花苜蓿在 Cd 胁迫下与对照相比,生物量呈上升趋势的为巨人 201+Z、甘农 1 号、中苜 1 号、金黄后和游客。Cd 胁迫下生物量增加的有阿尔冈金和金黄后。Cd 胁迫下紫花苜蓿的生物量变化率在-56.02%~22.80%,生物量变化率最高为巨人 201+Z,最低为驯鹿。

表 2 Cd 胁迫下不同品种苜蓿株高和生物量及变化
Table 2 Contents and changes of plant height and biomass of different varieties of alfalfa under Cd stress

序号 No.	品种 Varieties	株高 Plant height//cm			生物量 Biomass//g/株			综合响应指数 Integrated response index//%
		0 mg/kg Cd	50 mg/kg Cd	变化率 Rate of change//%	0 mg/kg Cd	50 mg/kg Cd	变化率 Rate of change//%	
1	河西	27.23±0.87 bc	21.16±1.25 ab	-22.30	2.83±0.29 ab	2.70±0.46 abcd	-4.59	-26.89
2	巨人 201+Z	22.15±1.63 abc	25.68±1.43 bc	15.95	2.50±0.30 ab	3.07±0.57 bcd	22.80	38.75
3	甘农 1 号	21.07±4.69 abc	24.93±1.45 bc	18.35	2.29±0.10 ab	2.48±0.27 abcd	8.30	26.75
4	阿勒泰杂花	29.11±2.55 bc	30.77±2.84 bc	5.73	1.83±0.49 a	1.80±0.28 abcd	-1.64	4.09
5	中苜 1 号	25.23±2.70 abc	24.57±1.02 bc	-2.62	2.43±0.41 ab	2.48±0.50 abcd	2.06	-0.56
6	阿尔冈金	29.17±0.38 bc	26.03±2.40 bc	-10.74	3.77±0.55 b	3.70±0.10 d	-1.86	-12.60
7	图牧 1 号	26.50±3.06 abc	31.15±1.18 bc	17.56	2.38±0.81 ab	2.12±0.11 abc	-10.92	6.64
8	新牧 2 号	28.63±1.22 bc	30.73±3.25 bc	7.33	3.79±0.08 b	2.89±0.12 bcd	-23.75	-16.42
9	驯鹿	29.03±5.25 abc	23.67±3.30 ab	-18.48	3.57±0.67 ab	1.57±0.15 abcd	-56.02	-74.50
10	金黄后	26.56±2.98 abc	31.79±2.59 cd	19.70	3.31±0.38 ab	3.52±0.33 cd	6.34	26.04
11	维多利亚	23.07±6.31 ab	29.21±2.03 bc	26.65	3.60±0.36 b	2.03±0.21 abcd	-43.61	-16.96
12	三得利	20.57±2.50 ab	20.33±3.86 ab	-1.13	2.83±0.75 ab	2.81±0.28 bcd	-0.71	-1.84
13	陇中苜蓿	17.40±0.60 a	25.14±1.56 bc	44.48	2.87±0.23 ab	2.23±0.24 abc	-22.30	22.18
14	苜蓿王	29.31±1.84 c	22.66±2.89 bc	-22.68	3.00±0.26 ab	2.70±0.56 abcd	-10.00	-30.68
15	WL525HQ	20.07±1.68 ab	22.58±1.94 bc	12.52	3.13±0.34 ab	2.45±0.45 abcd	-21.73	-9.21
16	陕北	27.03±3.48 bc	23.94±4.38 bc	-11.44	2.50±0.20 ab	2.33±0.90 abcd	-6.80	-18.24
17	新疆大叶	22.78±1.56 abc	23.08±1.08 bc	1.32	2.83±0.38 ab	2.35±0.61 abcd	-16.96	-15.64
18	草原 1 号	27.14±5.53 bc	17.56±0.86 a	-35.30	2.27±0.51 ab	1.07±0.15 a	-52.86	-88.16
19	游客	18.13±0.12 ab	21.30±0.89 ab	17.46	1.90±0.10 a	1.99±0.54 ab	4.74	22.20
20	德钦	31.11±4.21 c	35.71±7.57 d	14.78	2.71±0.10 ab	2.19±0.50 abc	-19.19	-4.41

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著
Note: Different lowercase letters at the same column indicated significant differences at 0.05 level among treatments

综合响应指数最大品种为巨人 201+Z,达 38.75%;最小品种为草原 1 号,为 -88.16%。对 20 个品种紫花苜蓿综合响应指数进行排序,其中巨人 201+Z、甘农 1 号、金黄后为综和响应指数最高的一类;阿勒泰杂花、图牧 1 号、中苜 1 号、三得利和德钦等为综合响应指数较高的一类;草原 1 号和驯鹿为综合响应指数最低的一类;其余品种综合响应指数居中。综和响应指数最高的巨人 201+Z、甘农 1 号、金黄后可作

为耐 Cd 品种。

2.2 Cd 对不同品种紫花苜蓿体内 Cd 含量及累积的影响 Cd胁迫下 20 个紫花苜蓿品种体内 Cd 含量和 Cd 累积量差异显著,且与对照相比均有显著上升(表 3)。在 Cd 胁迫下,各品种 Cd 含量为 2.30~19.95 mg/kg,平均含量为 9.65 mg/kg。Cd 含量最高的品种甘农 1 号是含量最低的品种陕北的 8.67 倍。

表 3 Cd 胁迫下不同品种紫花苜蓿 Cd 含量和累积量

Table 3 Cd content and accumulation of different varieties of alfalfa under Cd stress

序号 No.	品种 Varieties	植株 Cd 含量 Cd content of plant//mg/kg		植株 Cd 累积量 Cd accumulation of plant//μg/株	
		0 mg/kg Cd	50 mg/kg Cd	0 mg/kg Cd	50 mg/kg Cd
1	河西	0.192±0.078 b	6.476±1.699 c	0.397±0.163 bc	10.245±1.189 c
2	巨人 201+Z	0.094±0.009 d	4.895±0.989 d	0.159±0.035 cd	9.989±1.196 c
3	甘农 1 号	0.157±0.028 c	19.951±3.332 a	0.255±0.038 c	29.294±2.578 a
4	阿勒泰杂花	0.063±0.033 e	15.372±2.220 b	0.073±0.029 e	19.027±1.620 b
5	中苜 1 号	0.352±0.040 a	18.785±0.472 a	0.529±0.068 a	33.576±3.675 a
6	阿尔冈金	0.069±0.007 d	5.880±1.127 c	0.155±0.008 d	13.173±1.411 c
7	图牧 1 号	0.208±0.009 b	7.210±1.559 c	0.339±0.071 b	11.156±1.297 c
8	新牧 2 号	0.223±0.029 b	6.189±1.003 cd	0.467±0.027 b	13.730±1.975 c
9	驯鹿	0.217±0.022 b	3.382±0.116 d	0.515±0.098 a	4.560±0.757 d
10	金黄后	0.083±0.028 d	4.537±1.231 d	0.211±0.075 cd	9.531±1.868 cd
11	维多利亚	0.218±0.039 b	4.604±1.066 cd	0.547±0.116 a	6.376±0.679 d
12	三得利	0.353±0.085 a	4.205±1.190 c	0.663±0.028 a	7.223±1.162 d
13	陇中苜蓿	0.058±0.016 e	4.916±0.501 cd	0.108±0.039 d	6.543±1.139 d
14	苜蓿王	0.071±0.017 de	5.002±1.295 c	0.130±0.036 d	6.355±0.436 cd
15	WL525HQ	0.251±0.128 b	2.826±0.605 de	0.466±0.185 a	5.002±0.719 de
16	陕北	0.034±0.006 e	2.304±0.200 de	0.059±0.015 e	3.615±1.775 e
17	新疆大叶	0.185±0.054 c	3.046±0.347 de	0.275±0.065 a	4.528±0.992 e
18	草原 1 号	0.054±0.014 e	8.170±0.918 c	0.104±0.011 de	6.152±1.299 c
19	游客	0.141±0.016 c	4.595±0.464 ed	0.228±0.018 c	7.003±1.675 c
20	德钦	0.145±0.003 c	4.670±0.396 ed	0.232±0.052 c	8.181±0.537 c

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著
Note: Different lowercase letters at the same column indicated significant differences at 0.05 level among treatments

在 Cd 胁迫下,各品种 Cd 累积量为 3.615~33.576 μg/株,平均含量为 10.760 μg/株。Cd 累积最高的品种中苜 1 号是含量最低的品种陕北的 9.28 倍。

对 20 个品种紫花苜蓿品种 Cd 累积量进行排序,其中甘农 1 号、阿泰勒杂花和中苜 1 号等为 Cd 累积最高的一类;草原 1 号为含量较高的一类;其他品种 Cd 含量较低。为了修复土壤中重金属 Cd 的累积,选择甘农 1 号、阿泰勒杂花和草原 1 号作为紫花苜蓿高累积 Cd 的品种。

3 讨论

Cd 污染对植物的生长发育和细胞的新陈代谢具有重要影响^[23-25]。该试验中,对照组的株高和生物量无明显差异,且对其生长影响较小,但在 Cd 胁迫下与对照相比株高和生物量大部分均呈下降趋势,小部分呈上升趋势。Cd 胁迫下巨人 201+Z、甘农 1 号、金黄后综和响应指数较高,表明巨人 201+Z、甘农 1 号、金黄后在 Cd 胁迫下能够正常生长,生物量无明显下降,可作为耐 Cd 品种。也有研究表明,镉处理浓度为 5 mg/kg 时,紫花苜蓿的株高、主根长、生物量和叶绿素含量与对照相比均有所提高,但差异不显著,随着处理浓度增

加,上述指标呈显著降低趋势^[26]。Cd 浓度较低时对株高和生物量等生理指标的影响不明显,表明紫花苜蓿对 Cd 具有一定的耐性。另外,紫花苜蓿在高浓度 Cd 处理中受毒害明显,说明紫花苜蓿耐 Cd 的有限性。同样也有较多研究表明 Cd 对植物生长的影响均与上述结论一致,如水稻^[27]、棉花^[28]和番茄^[29]等植物在 Cd 浓度较高时,产量和植株总生物量下降,只有少数品种产量和生物量有所上升。

Cd 的累积浓度随 Cd 浓度增加而增加,且地下部 Cd 累积浓度大于地上部。不同品种紫花苜蓿吸收和累积 Cd 的能力存在较大差异。该试验中,在 Cd 胁迫下不同紫花苜蓿品种间的 Cd 累积量有显著差异,品种中苜 1 号累积量 Cd 高达 33.576 mg/kg,品种陕北 Cd 累积量仅 3.620 mg/kg。通过对比 20 个紫花苜蓿品种体内 Cd 含量发现,甘农 1 号、阿泰勒杂花和草原 1 号品种为 Cd 累积量最高。也有研究表明,品种新疆大叶在 Cd 处理浓度为 100 mg/kg 时,其地上部和地下部的 Cd 含量分别为 16.01 和 84.21 mg/kg^[30];品种 Col 在处理浓度为 50 mg/L 时,其地上部和地下部的 Cd 含量分别为 1 920 和 12 360 mg/kg(DW),与前者差异显著^[31]。与该试

验结果一致,不同品种间的 Cd 累积量存在差异。

植物对镉的抗性可以分为 3 种:在有 Cd 胁迫条件下很快死亡;在有 Cd 胁迫条件下可以大量吸收环境中的镉离子,而且生长好,生物量高;在有 Cd 胁迫条件下能大量吸收环境中的镉离子,但生长受到抑制。应用到植物修复中的植物材料是第 2 种情况,即可以大量吸收镉离子又不影响其生长^[32]。该试验通过 20 个品种紫花苜蓿在 Cd 胁迫下综合响应指数和 Cd 累积量的分析,可筛选出耐 Cd 品种且 Cd 高累积的品种。在 Pb 污染的土壤中种植玉米,就要筛选出低累积 Pb 的玉米品种,且玉米籽粒中 Pb 含量不能超过《粮食及制品中重金属限量标准》(NY 861—2004)^[33]。紫花苜蓿不同于玉米,作为 Cd 污染的土壤修复植物,要筛选出高累积 Cd 的品种,且耐 Cd 品种^[34]。

4 结论

Cd 胁迫下 20 个紫花苜蓿品种的株高、生物量的变化差异显著。Cd 胁迫下株高最高的为德钦(35.71 cm),最低的是草原 1 号(17.56 cm)。Cd 胁迫下生物量最高的为金黄后(3.52 g/株),最低的是草原 1 号(1.07 g/株)。

20 个品种紫花苜蓿对 Cd 的累积能力存在显著差异。Cd 累积量最高的品种是中苜 1 号(33.576 mg/kg),Cd 累积量最低的是陕北(3.620 mg/kg)。

生物量与 Cd 累积量呈显著正相关。Cd 含量和 Cd 累积量呈显著正相关。

综合分析,最终筛选出甘农 1 号为耐 Cd 品种且 Cd 高累积品种。

参考文献

- [1] 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,等.重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J].农业环境科学学报,2013,32(3):409-417.
- [2] 白音达来,包额尔顿嘎.不同浓度硝酸镉对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J].农业科技通讯,2013(6):128-130.
- [3] 王文斌,金樑,李晶,等.不同 pH 条件下 CdCl₂ 对紫花苜蓿种子萌发的胁迫效应[J].环境科学研究,2013,26(10):1095-1102.
- [4] 张良绘,朱俊瑾,朱新萍,等.Cd²⁺ 与 NaCl 胁迫对紫花苜蓿种子萌发的影响[J].新疆农业大学学报,2015,38(1):51-55.
- [5] 尹国丽,师尚礼,寇江涛,等.Cd 胁迫对紫花苜蓿种子发芽及幼苗生理生化特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(8):1638-1644.
- [6] 李新博,谢建治,李博文,等.镉对紫花苜蓿不同生长期生物量的影响及饲用安全评价[J].草业学报,2009,18(5):266-269.
- [7] 徐苏凌,邢承华,方勇.镉胁迫对紫花苜蓿生长及植株镉含量的影响[J].广东微量元素科学,2008,15(3):23-26.
- [8] 马春,孙启忠,牛建明,等.紫花苜蓿品种的 TWINSpan 分类与筛选[J].华北农学报,2008,23(2):151-154.
- [9] 许涛,郭孟康,张自于.重金属低积累玉米品种筛选研究[J].现代农业

科技,2015(21):48-49.

- [10] 代全林,袁剑刚,方炜,等.玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异[J].植物生态学报,2005,29(6):992-999.
- [11] SHARMA N C, STARNES D L, SAHI S V. Phytoextraction of excess soil phosphorus[J]. Environmental pollution, 2007, 146(1): 120-127.
- [12] 徐雷,沈仁芳,梁林洲,等.磷高累积黄瓜品种筛选[J].江苏农业科学,2012,40(10):137-139.
- [13] 康俊梅,樊促成,杨青川.41 份紫花苜蓿抗旱鉴定试验研究[J].草地学报,2004,12(1):21-23,56.
- [14] 胡卉芳,李青丰,徐军,等.几个引进苜蓿品种在内蒙古呼和浩特地区的品比试验[J].中国草地,2003,25(6):24-26.
- [15] 王秀领,徐玉鹏,李桂荣,等.不同施肥处理对紫花苜蓿鲜草产量的影响[J].四川草原,2004(8):24-26.
- [16] 张丽君,白占雄,关文彬,等.我国苜蓿属植物栽培品种的地理分布[J].华北农学报,2005,20(S1):99-103.
- [17] 吴传星,伍钧,杨刚,等.重金属低积累玉米品种的筛选[C]//中国农业生态环境保护协会,农业部环境保护科研监测所.第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集.天津:中国农业生态环境保护协会、农业部环境保护科研监测所,2009:8.
- [18] 孙仕仙,文际坤.云南苜蓿品种筛选初报[J].云南畜牧兽医,2005(2):3-4.
- [19] 汪加魏,邓强,张正武,等.油橄榄适生区高产品种筛选研究[J].林产工业,2012,39(5):54-59.
- [20] 丁园,宗良纲.潮土重金属复合污染对紫花苜蓿的影响[J].南昌航空工业学院学报,2002,16(3):47-50.
- [21] 王新,贾永锋.紫花苜蓿对土壤重金属富集及污染修复的潜力[J].土壤通报,2009,40(4):932-935.
- [22] 陈红祥,左绍汉,李建清,等.紫花苜蓿品种筛选试验[J].养殖与饲料,2013(11):26-28.
- [23] LARSSON E H, BORMMAN J F, ASP H. Influence of UV-B radiation and Cd²⁺ on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus* [J]. Journal of experimental botany, 1998, 323(1): 1031-1039.
- [24] TERAMURA A H, SULLIVAN J H. Effects of UV-B radiation on photosynthesis and growth of terrestrial plants [J]. Photosynth Res, 1994, 39(3): 463-473.
- [25] 张琼,陈晓燕,陈梅,等.镉对绿豆幼苗生长影响的研究[J].漳州师范学院学报(自然科学版),2006,19(4):106-111.
- [26] 徐苏凌,方勇,邢承华.镉胁迫对紫花苜蓿生长及结瘤的影响[J].江西农业大学学报,2008,30(6):1049-1052.
- [27] 叶秋明,李军,黄元财,等.15 个水稻品种对镉的积累特性[J].浙江农业科学,2015,56(8):1156-1159.
- [28] 李玲,陈进红,何秋伶,等.3 个陆地棉种(系)重金属镉的积累、转运和富集特性分析[J].棉花学报,2012,24(6):535-540.
- [29] 赵首萍,张永志,张棋,等.两种基因型番茄对镉胁迫响应差异[J].植物营养与肥料科学,2015,21(5):1261-1268.
- [30] 孙宁晓,宋桂龙.紫花苜蓿对镉胁迫的生理响应及积累特性[J].草业科学,2015,32(4):581-585.
- [31] 杨姝,李元,毕玉芬,等.紫花苜蓿对 Cd 胁迫的响应及品种差异研究进展[J].农业环境科学学报,2017,36(8):1453-1461.
- [32] 宋瑜.紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)抗镉品种金属硫蛋白基因差异显示分析[D].兰州:兰州大学,2009.
- [33] 于蔚,李元,陈建军,等.铅低积累玉米品种的筛选研究[J].环境科学导刊,2014,33(5):4-9,104.
- [34] 李元,祖艳群.重金属污染生态与生态修复[M].北京:科学出版社,2016.

(上接第 54 页)

- [8] AKRATOS C S, TSIHRINTZIS V A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological engineering, 2007, 29(2): 173-191.
- [9] 王成端.低成本污水处理技术及工程实例[M].北京:化学工业出版社,2008:97-132.

- [10] 汤蕾,赵冰梅,许东,等.国外湿地研究进展[J].安徽农业科学,2008,36(1):299-301.
- [11] 谭洪涛,朱琳,王彬,等.2 种野生植物砾石基质系统净化生活污水[J].环境工程学报,2017,11(5):2785-2791.
- [12] 石雷,杨璇.人工湿地植物量及其对净化效果影响的研究[J].生态环境学报,2010,19(1):28-33.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.