

不同水稻品种对钒的积累及化学形态

侯明, 郭零, 何剑亮

(广西矿冶与环境科学实验中心 桂林理工大学化学与生物工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:通过盆栽试验,研究了钒(V)胁迫下不同品种水稻植株中钒的积累和化学形态。结果表明,不同品种水稻各器官中V的分布为根>茎>叶>子实,两种水稻品种吸收的V主要富集在根部。水稻生长期新优188水稻各器官中V的浓度均低于十优838水稻,如在V处理浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,在分蘖期、扬花期、灌浆期和成熟期,新优188水稻植株根中V含量分别为 73.10 、 92.56 、 57.46 、 $57.81\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,茎叶中为 8.79 、 4.52 、 2.13 、 $2.56\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;十优838水稻植株根中的V含量为 59.14 、 94.93 、 88.59 、 $89.70\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,茎叶中为 4.64 、 3.66 、 2.29 、 $3.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。推断十优838水稻较新优188水稻有较强的V吸收能力。两种水稻品种中,根部V主要以活性较低的盐酸提取态(F_{HCl})和醋酸提取态(F_{HAc})为主,茎和叶中V主要以盐酸提取态(F_{HCl})和水提取态(F_{w})为主,认为V在水稻根部多以难溶于水的重金属磷酸盐或草酸盐而被固定,限制了水稻中V转移到茎和叶,从而避免了高浓度V对植物光合作用及其他生理过程的干扰。

关键词:水稻;钒;积累;化学形态

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)09-1738-07 doi:10.11654/jaes.2013.09.005

Accumulation and Chemical Forms of Vanadium in Different Rice Cultivars

HOU Ming, GUO Ling, HE Jian-liang

(Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Accumulation and chemical forms of vanadium in two rice cultivars were investigated by pot experiment. It suggested that the V distribution levels in organs of two rice cultivars was in sequence as follows: root>stem>leaf>seed (rice grain). V was accumulated mainly in roots. V concentrations in organs of the 188 species were lower than that in the 838 species. During stages of stooling, flowering, pustulation and maturation, V concentrations in root of the 188 species were $73.10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $92.56\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $57.46\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $57.81\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively, in stem and leaf were $8.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $4.52\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $2.13\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $2.56\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively, when V stress level was $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Meanwhile V concentrations in root of the 838 species were $59.14\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $94.93\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $88.59\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $89.70\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively, and in stem and leaf were $4.64\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $3.66\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $2.29\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and $3.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively. It indicates that the 838 species has stronger V accumulation ability. V speciation in roots of the 2 rice cultivars were mainly in the chemical forms of HCl extractable(F_{HCl}) and HAc extractable(F_{HAc}), but they were in the chemical forms of HCl extractable(F_{HCl}) and water extractable(F_{w}) in stems and leaves. It suggests that most V uptake into root was combined as phosphate or oxalate, which restricts its transportation from root to stem and leaf, and prevents V damaging to plant photosynthesis and other physiological process.

Keywords: rice; vanadium; accumulation; chemical forms

钒(V)是人和动物所必需的微量元素,可维持心血管系统正常工作,抑制胆固醇合成,具有良好的降糖

作用,但人体对V的积累达到一定浓度,也可损害其呼吸系统、神经系统和肠胃系统,引起造血系统的改变^[1-2]。V过量时可抑制植物生长,出现矮化、失绿等症状^[3],可减少植物对钙、磷酸盐等营养元素的吸收^[4]。V还能在植物中积累,如水稻^[5]和小白菜^[6]受到过量V影响会使其富集于根部,且V的积累量随土壤中V含量增加而增加。

水稻是人们生活中不可缺少的主食品,如果土壤

收稿日期:2013-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41161076)、广西自然科学基金项目(2011GXNSFA018045)、广西环境工程与保护评价重点实验室研究基金项目(桂科能0701k013)和广西矿业与环境科学实验中心项目(KH2013YB013)

作者简介:侯明(1957—),女,博士,教授,研究方向为环境分析化学。E-mail:glhou@glut.edu.cn

受到重金属污染,会使水稻作物吸收并过量累积,不仅影响其生长发育,导致产量降低,而且会严重影响到水稻品质,进而可通过食物链威胁人体健康,土壤重金属污染引起稻米超标已屡见报道^[7-9]。迄今为止,有关重金属在土壤-作物-膳食系统中的迁移过程是环境污染以及人类健康风险研究的重点和热点问题之一^[10]。许多学者从重金属对水稻生长发育的影响^[11-12]、水稻对不同重金属的吸收、累积、运输特性^[13-19]等方面进行了较为广泛的研究,近年来,有学者进行了水稻子实中 As 和 Se^[20]、水稻植株中 As、Cd、Pb、Cu 和 Zn 等^[21-25]的形态研究。这对于充分了解重金属在植物体内的迁移转化机理,阐明其生理作用特征等具有重要意义。为了进一步探明不同重金属在不同生态型水稻中积累和迁移转化的差异,采用盆栽试验,研究了 V 胁迫下两种品种水稻植株对 V 的吸收积累和水稻体内 V 的化学形态分布特征,旨在掌握 V 在水稻体内的迁移转化规律,探讨 V 的生物毒性和水稻耐性机制,为筛选优质 V 低积累水稻品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻(*Oryza sativa* L.)种子为新优 188(国审稻 2007028)和十优 838(桂审稻 2006012)。新优 188 属籼型三系杂交水稻,在南方稻区作双季晚稻种植,全生育期平均 112.4 d,株型集散适中,长势繁茂,群体结构好,根系发达,分蘖力和抗逆性较强,茎秆粗壮韧性强。剑叶长 32.2 cm、宽 1.9 cm;冠叶挺直,夹角小;熟期转色佳。每 666.7 m² 有效穗数 19.4 万穗,株高 101.0 cm,穗长 24.0 cm,每穗总粒数 127.9 粒,结实率 82.3%,千粒重 25.8 g。十优 838 属感温型三系杂交水稻,桂中北早稻种植,全生育期约 125 d,群体生长整齐,株型适中,叶色青绿,剑叶挺直,穗粒协调,后期转色好。每 666.7 m² 有效穗数 18.0 万穗,株高 114.9 cm,穗长 24.9 cm,每穗总粒数 147.3 粒,结实率 72.9%,千粒重 26.6 g。

盆栽试验使用桂林市花园村菜地的土壤,其基本性质见表 1。土壤经风干,除去石块和垃圾,过 3.2 mm 筛,备用。土壤施以 N、P 和 K 肥的试剂和所选用的 V (NH_4VO_3)均为分析纯试剂。

1.2 试验设计和处理

盆栽试验在桂林理工大学塑料大棚进行。取风干过筛土壤,每个塑料盆(33 cm×29 cm×11 cm)装土 4

表 1 土壤理化性质

Table 1. Physical and chemical properties of the soil

pH	有机质/ g·kg ⁻¹	阳离子交换 量(CEC)/ cmol·kg ⁻¹ ±	氮/ g·kg ⁻¹	磷/ g·kg ⁻¹	钾/ g·kg ⁻¹	钒/ mg·kg ⁻¹
5.74	11.24	7.43	1.08	0.93	16.4	94.97

kg(以干土计),每千克土壤施 $\text{N}[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 0.2 g、 $\text{P}_2\text{O}_5(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 0.2 g、 $\text{K}_2\text{O}(\text{K}_2\text{SO}_4)$ 0.1 g 作底肥,以粉末形式与土壤混匀。试验设置为 3 种处理,分别加入 V 量(以 NH_4VO_3 形式加入)0、50、100 mg·kg⁻¹,每种处理 4 个重复,充分混匀陈化平衡 1 周。挑选籽粒饱满的水稻种子,用纯水浸泡 6 h,再用三氯异氰尿酸稀溶液(1.5 g·L⁻¹)浸泡 2 h,用纯水清洗数次,置于盆中催芽后转移到秧盘中育苗。秧龄 30 d 时进行移栽,返青后每盆定为 7 株秧苗,按大田栽培管理要求进行灌水和追肥。

1.3 试验方法

1.3.1 水稻植株体内 V 的化学形态分离

分别在水稻幼苗期、分蘖期、扬花期、灌浆期、成熟期取样测定。水稻样品分根、茎、叶、花和子实收获后,用自来水洗净后再用纯水洗净,105℃杀青 20 min,60℃鼓风烘干后,用植物粉碎机粉碎过 20 目(0.90 mm)筛,装入样品袋,于干燥器中保存备用。取 3.000 0 g 样品,采用连续浸提法对各生长期中 V 添加量为 100 mg·kg⁻¹ 的盆栽水稻进行形态分析。以幼苗期为空白对照。

参照许嘉琳等^[25]的化学试剂逐步提取法进行改进,对水稻植株体内不同形态 V 进行逐步提取。提取剂依次为 80%乙醇(F_E)、去离子水(F_W)、2%醋酸(F_{HAc})、0.6 mol·L⁻¹ 盐酸(F_{HCl}),最后为残留态(F_R)。具体操作如下:准确称取干样 3.000 0 g,加入 20 mL 提取剂转入 50 mL 的塑料离心管,在 25℃恒温振荡 22 h 后,5000 r·min⁻¹ 离心 10 min,倒出上清液,再加入 10 mL 的提取剂,25℃恒温振荡 1 h,5000 r·min⁻¹ 离心 10 min,倒出上清液,合并 2 次上清液。

1.3.2 样品中 V 含量的测定

水稻植株中 V 的总量采用灰化后酸消解,V 形态分析的提取液蒸发至近干后,用 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-HNO}_3$ (1:5, V/V)消煮至澄清,水定容后用石墨炉原子吸收分光光度法(GFAAS, novAA 400P, Analytik Jena AG)测定 V 含量。试验结果为 3 次重复试验的平均值。

1.3.3 数据处理

转运系数(Translocation factor, TF)用来表示植物

体对重金属从根部到地上部的有效转移程度,计算公式^[26]为:TF=地上部 V 含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)/地下部 V 含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。根系对重金属的富集系数 BCF(Bioconcentration factor, BCF)=根部 V 含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)/土壤中 V 含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)^[27]。

采用 DPS 9.50 数据处理系统和 Microsoft Excel 2003 对数据进行统计分析,结果以平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示。

2 结果与分析

2.1 V 在水稻植株不同器官的积累和分布

由表 2 可知,在不同 V 浓度胁迫下,水稻不同器官中累积的 V 浓度从大到小依次为根>茎叶>子实。V 主要在水稻植株根中大量富集,地上部很少,子实中 V 含量最低,两种水稻子实中 V 含量均低于 $0.5\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,说明水稻将重金属 V 向上运输的能力较弱。在同一生长期,随着 V 处理浓度的增大,不同品种水稻各器官累积的 V 含量均升高,其中根部增幅较大,远大于茎叶,而子实增幅较低。在水稻的整个生长期,不同水稻的各器官 V 的含量变化相似,如同一 V 浓度处理下,水稻根部 V 含量呈先升后降趋势,而水稻茎叶 V 含量呈下降趋势,在 V 处理浓度为 $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,在分蘖期、扬花期、灌浆期和成熟期,新优 188 水稻植株根中 V 含量分别为 73.10、92.56、57.46、57.81 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,茎叶中为 8.79、4.52、2.13、2.56 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;十优 838 水稻植株根中 V 含量为 59.14、94.93、

88.59、89.70 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,茎叶中为 4.64、3.66、2.29、3.24 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。可见,十优 838 对 V 的积累能力明显高于新优 188。尽管不同品种水稻对 V 的富集能力不同,但根部 V 含量均在扬花期最高,灌浆期和成熟期变化不大;茎叶 V 含量在分蘖期最高,从扬花期开始下降,到成熟期叶部 V 含量降到最低,而茎部稍有增加。在未加 V 处理的水稻幼苗期,植株吸收 V 的含量最低,且茎叶 V 含量远小于根部。

由表 3 可见,在不同 V 浓度胁迫下,水稻的根富集系数(BF)值和迁移系数(TF)值不相同。在同一生长期,随着 V 处理浓度增大,不同品种水稻生物富集系数增加,但迁移系数下降。在相同 V 浓度处理下,从幼苗到成熟期,生物富集系数先增大后降低,而迁移系数呈下降趋势,两种品种水稻的生物富集系数均在扬花期出现最大值,新优 188 最大富集系数为 1.02,十优 838 为 1.04;在 V 浓度 $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,新优 188 分蘖期的迁移系数为 0.24,到成熟期降为 0.05。结果表明,随着 V 浓度增大,水稻植株积累 V 的能力增强,由于水稻吸收富集的 V 主要存储于其根部,分布在茎叶中的较少,水稻中 V 很难从地下部向地上部迁移,迁移能力逐渐降低。

2.2 V 在水稻植株不同器官的化学结合形态

由形态分析测定结果(表 4)可知,不同品种水稻植株的各器官中 V 的化学形态分布相似。水稻根是:盐酸提取态(F_{HCl})>醋酸提取态(F_{HAc})>水提取态(F_{W})>乙醇提取态(F_{E})>残渣态(F_{R})。水稻根部 V 多以活

表 2 两种水稻根、茎和叶中的 V 浓度

Table 2 V concentration in stems, leaves and shoots of two paddy rice cultivars

生长期 Vegetation period	V 处理浓度 V content/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	V 含量 V content/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ FW							
		根 Shoots		茎 Stems		叶 Leaves		子实 Grain	
		新优 188	十优 838	新优 188	十优 838	新优 188	十优 838	新优 188	十优 838
苗期	0	7.36 $\pm$ 0.14	9.81 $\pm$ 0.19	0.74 $\pm$ 0.05	0.87 $\pm$ 0.04	0.79 $\pm$ 0.05	0.90 $\pm$ 0.02		
分蘖期	0	10.26 $\pm$ 0.39	11.26 $\pm$ 0.25	1.86 $\pm$ 0.06	1.49 $\pm$ 0.08	1.23 $\pm$ 0.19	0.95 $\pm$ 0.07		
	50	21.09 $\pm$ 0.23	42.46 $\pm$ 0.41	2.47 $\pm$ 0.05	1.66 $\pm$ 0.08	2.45 $\pm$ 0.13	1.70 $\pm$ 0.09		
	100	73.10 $\pm$ 0.54	59.14 $\pm$ 0.25	4.45 $\pm$ 0.23	2.42 $\pm$ 0.19	4.34 $\pm$ 0.31	2.22 $\pm$ 0.21		
扬花期	0	14.45 $\pm$ 0.30	4.38 $\pm$ 0.17	1.00 $\pm$ 0.03	0.07 $\pm$ 0.01	1.37 $\pm$ 0.15	0.39 $\pm$ 0.03		
	50	24.72 $\pm$ 0.30	51.85 $\pm$ 1.51	1.14 $\pm$ 0.17	1.13 $\pm$ 0.08	1.92 $\pm$ 0.07	1.10 $\pm$ 0.12		
	100	92.56 $\pm$ 0.55	94.93 $\pm$ 2.21	1.52 $\pm$ 0.11	2.34 $\pm$ 0.18	3.00 $\pm$ 0.32	1.32 $\pm$ 0.18		
灌浆期	0	2.70 $\pm$ 0.17	3.08 $\pm$ 0.12	0.19 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.01	0.38 $\pm$ 0.03	0.44 $\pm$ 0.04		
	50	22.83 $\pm$ 0.29	52.23 $\pm$ 0.32	0.91 $\pm$ 0.02	0.46 $\pm$ 0.07	0.49 $\pm$ 0.04	0.61 $\pm$ 0.02		
	100	57.46 $\pm$ 0.41	88.59 $\pm$ 0.95	1.45 $\pm$ 0.12	1.65 $\pm$ 0.18	0.68 $\pm$ 0.05	0.64 $\pm$ 0.02		
成熟期	0	5.14 $\pm$ 0.19	3.42 $\pm$ 0.17	0.60 $\pm$ 0.07	0.12 $\pm$ 0.02	0.18 $\pm$ 0.01	0.23 $\pm$ 0.04	0.05 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.003
	50	20.63 $\pm$ 0.41	24.95 $\pm$ 0.30	0.75 $\pm$ 0.03	1.00 $\pm$ 0.10	0.37 $\pm$ 0.05	0.53 $\pm$ 0.06	0.14 $\pm$ 0.02	0.17 $\pm$ 0.02
	100	57.81 $\pm$ 0.50	89.70 $\pm$ 0.47	2.38 $\pm$ 0.09	2.50 $\pm$ 0.14	0.18 $\pm$ 0.02	0.74 $\pm$ 0.09	0.36 $\pm$ 0.02	0.38 $\pm$ 0.02

表 3 V 在水稻不同器官的富集系数和迁移系数

Table 3 Enrichment coefficient and transfer coefficient of V in different organs of two paddy rice cultivar

生长期 Vegetation period	V 处理浓度 V content/ mg·kg ⁻¹	富集系数(BF)		迁移系数(TF)	
		新优 188	十优 838	新优 188	十优 838
幼苗期 Seedling	0	0.093 5	0.121 9	0.207 5	0.180 4
分蘖期 Tillering period	0	0.140 5	0.144 3	0.301 2	0.217 1
	50	0.274 3	0.482 6	0.235 1	0.079 3
	100	0.862 3	0.671 6	0.120 2	0.078 5
扬花期 Flowering period	0	0.177 1	0.050 9	0.163 6	0.104 6
	50	0.292 5	0.569 4	0.123 9	0.043 1
	100	1.022 2	1.038 0	0.048 8	0.038 5
灌浆期 Pustulation period	0	0.034 4	0.037 6	0.212 4	0.161 1
	50	0.255 1	0.561 2	0.061 2	0.020 5
	100	0.627 4	0.957 0	0.037 0	0.025 9
成熟期 Mature period	0	0.062 3	0.039 8	0.151 7	0.128 8
	50	0.229 0	0.278 8	0.054 1	0.068 2
	100	0.635 7	0.978 6	0.044 3	0.040 4

性较低的 F_{HCl} 态和 F_{HAc} 态为主, F_{HCl} 态占总量的 43.46%~62.24%, F_{HAc} 态占总量的 17.52%~28.81%, 二者合计占总量的 80%以上, 而 F_{R} 态最低, 仅占总量的 3.79%~5.18%。与根相比, V 在水稻茎和叶中形态分布特征有所不同, 水稻茎叶是: 盐酸提取态(F_{HCl})>水提取态(F_{W})>醋酸提取态(F_{HAc})>乙醇提取态(F_{E})>残渣态(F_{R})。茎叶中 V 则以 F_{HCl} 态和 F_{W} 态为主要形态, 所占比例分别为 33.08%~51.30%和 21.49%~29.43%, F_{HAc} 态比例为 8.35%~16.62%, 与根相比较其比例有所下降, 而 F_{W} 态比例有较大提高, F_{E} 态和 F_{R} 态所占比例均低于 15%。结果表明, V 在茎叶中以多种形态存在, 可推断 V 可与多种配位体结合。

不同生长时期水稻各器官 V 的形态分配比例不同(表 4), 但仍以 F_{HCl} 态提取的草酸盐占绝对优势。如新优 188 水稻植株的根、茎和叶中, 幼苗期 F_{HCl} 态占总量的 62.24%、51.30%和 51.08%, F_{W} 态占总量的 10.03%、21.49%和 22.74%, 其余形态比例均低于 15%; 而扬花期 F_{HCl} 态比例为 51.43%、33.08%和 37.47%, F_{W} 态的比例为 13.21%、25.28%和 24.18%, F_{E} 态的比例为 7.61%、13.23%和 11.85%, 其余形态比例较幼苗期略有增加, 但增幅不大; 成熟期 F_{HCl} 态为 53.45%、35.46%和 36.17%, F_{W} 态的比例为 13.21%、27.84%和 27.83%, F_{E} 态的比例为 7.26%、13.21%和 11.04%, 其余形态较扬花期略有降低。十优 838 水稻中 V 的形态分配特征相似。表明活性较低的盐酸提取态在水稻植株的根部分布较多, 使得在植物生长过程中植株体内的 V 向上运移能力较低, 而活性较高

的水提取态和醇提取态在茎叶中分布较多, 使 V 在地上部处于易于移动的状态, 这与农作物小麦和玉米受铅的污染相似^[28]。

3 讨论

金属对植物的毒害作用及植物的耐受性, 取决于植物对金属的吸收和运输能力, 不同种植物对金属的吸收、忍耐和转移能力不同, 同类植物对金属的吸收量也因其品种的不同而存在明显的差异^[27]。两种不同品种水稻不论是地上部还是地下部, 对 V 的积累均有一定的差异(表 2), 十优 838 水稻在各生长期其植株根中 V 含量显著高于新优 188 水稻, 且在不同生长期和不同的 V 处理浓度下, 十优 838 水稻的富集系数(BF)均高于新优 188 水稻, 但新优 188 水稻的迁移系数(TF)均明显高于十优 838 水稻(表 3), 表明十优 838 水稻对 V 的吸收富集能力较强, 而新优 188 水稻对 V 的转运能力较强。居婷等^[30]在水稻对 Cd 的吸收转运与耐性的关系研究中指出, 有些水稻的耐性与其转运能力有关, 转运较多则耐性较强, 而植物对土壤中金属的吸收能力是影响金属对其毒性作用的因素之一, 较低的吸收能力是该种植物的耐受性相对较强的反映。据此, 可以推断本研究中新优 188 水稻较十优 838 水稻对 V 有较强的耐受能力, 其耐 V 的机制还有待进一步研究。由于水稻的根系较为发达, 根系细长而且致密, 这就决定了其根部既是吸收营养物质也是吸收重金属的主要器官, 但因金属的特性和水稻品种不同, 水稻地上部的吸收分配各异。有文

表 4 V 在两种水稻根、茎和叶中的化学形态

Table 4 The chemical forms of V in stems, leaves and roots of two paddy rice cultivars

器官 Organ	生长期 Vegetation period	各形态 V 含量 V content/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ FW									
		F_{E}		F_{W}		F_{HAc}		F_{HCl}		F_{R}	
		新优 188	十优 838	新优 188	十优 838	新优 188	十优 838	新优 188	十优 838	新优 188	十优 838
根 Roots	苗期 Seedling	0.45±0.02 (6.05)	0.57±0.06 (5.79)	0.74±0.03 (10.03)	0.86±0.07 (8.82)	1.29±0.07 (17.52)	2.83±0.95 (28.81)	4.58±0.09 (62.24)	5.12±0.98 (52.20)	0.31±0.02 (4.16)	0.43±0.04 (4.38)
	分蘖期 Tillering period	6.50±0.26 (8.89)	4.64±0.85 (7.84)	11.15±0.78 (15.25)	9.21±0.71 (15.58)	20.01±0.72 (27.37)	16.29±0.79 (27.55)	31.77±0.95 (43.46)	25.96±0.94 (43.90)	3.68±0.63 (5.03)	3.03±0.56 (5.13)
	扬花期 Flowering period	7.04±0.36 (7.61)	5.07±0.48 (5.34)	12.23±0.64 (13.21)	14.44±0.67 (15.21)	21.59±0.95 (23.33)	20.13±0.60 (21.21)	47.60±1.21 (51.43)	51.68±0.87 (54.45)	4.09±0.34 (4.42)	3.60±0.48 (3.79)
	灌浆期 Pustulation period	4.27±0.34 (7.46)	5.39±0.66 (6.09)	7.79±0.66 (13.55)	15.46±0.79 (17.45)	13.15±0.86 (22.89)	19.19±0.70 (21.66)	29.70±1.19 (51.69)	44.87±1.08 (50.65)	2.55±0.49 (4.44)	3.68±0.48 (4.15)
	成熟期 Mature period	4.20±0.68 (7.26)	5.89±0.66 (6.57)	7.64±0.57 (13.21)	14.17±0.63 (15.80)	12.78±0.86 (22.10)	18.554±0.73 (20.68)	30.90±0.68 (53.45)	46.44±0.93 (51.77)	2.30±0.38 (3.98)	4.65±0.44 (5.18)
	茎 Stems	苗期 Seedling	0.05±0.04 (6.87)	0.07±0.00 (8.22)	0.16±0.02 (21.49)	0.21±0.01 (24.19)	0.07±0.00 (10.51)	0.10±0.01 (11.22)	0.38±0.04 (51.30)	0.40±0.02 (45.66)	0.07±0.00 (9.83)
分蘖期 Tillering period		0.57±0.06 (12.87)	0.28±0.01 (11.67)	1.31±0.06 (29.43)	0.70±0.06 (28.83)	0.38±0.05 (8.35)	0.27±0.02 (11.20)	1.73±0.06 (38.82)	0.89±0.05 (36.97)	0.47±0.05 (10.53)	0.27±0.01 (11.33)
扬花期 Flowering period		0.20±0.01 (13.23)	0.32±0.05 (13.61)	0.38±0.02 (25.28)	0.65±0.04 (27.71)	0.24±0.01 (15.91)	0.26±0.03 (11.25)	0.50±0.02 (33.08)	0.78±0.04 (33.44)	0.19±0.01 (12.50)	0.33±0.02 (13.99)
灌浆期 Pustulation period		0.19±0.01 (13.13)	0.22±0.01 (13.68)	0.39±0.02 (26.86)	0.48±0.02 (29.38)	0.18±0.02 (12.58)	0.18±0.01 (11.02)	0.49±0.03 (33.97)	0.56±0.03 (33.82)	0.20±0.01 (13.46)	0.20±0.01 (12.10)
成熟期 Mature period		0.31±0.02 (13.21)	0.31±0.02 (12.59)	0.66±0.04 (27.84)	0.71±0.03 (28.38)	0.26±0.02 (10.17)	0.25±0.02 (10.11)	0.84±0.05 (35.46)	0.94±0.06 (37.45)	0.30±0.02 (12.72)	0.29±0.02 (11.47)
叶 Leaves		苗期 Seedling	0.04±0.00 (4.83)	0.05±0.00 (5.67)	0.18±0.01 (22.74)	0.22±0.01 (24.15)	0.08±0.00 (10.53)	0.12±0.01 (14.00)	0.40±0.01 (51.08)	0.42±0.02 (46.42)	0.08±0.00 (10.82)
	分蘖期 Tillering period	0.53±0.04 (12.30)	0.31±0.02 (13.80)	1.09±0.06 (25.12)	0.52±0.03 (23.61)	0.47±0.03 (10.76)	0.28±0.01 (12.60)	1.80±0.04 (41.43)	0.87±0.05 (39.40)	0.45±0.03 (10.39)	0.23±0.02 (10.59)
	扬花期 Flowering period	0.36±0.03 (11.85)	0.17±0.01 (12.92)	0.73±0.04 (24.18)	0.33±0.01 (24.97)	0.45±0.04 (14.95)	0.20±0.01 (15.20)	1.12±0.06 (37.47)	0.47±0.03 (35.47)	0.35±0.02 (11.55)	0.15±0.01 (11.44)
	灌浆期 Pustulation period	0.08±0.00 (11.27)	0.07±0.00 (10.72)	0.18±0.02 (26.40)	0.17±0.01 (26.46)	0.07±0.00 (10.97)	0.10±0.00 (16.10)	0.26±0.02 (39.24)	0.23±0.02 (35.50)	0.08±0.00 (12.12)	0.07±0.00 (11.22)
	成熟期 Mature period	0.02±0.00 (11.04)	0.07±0.00 (9.60)	0.05±0.00 (27.83)	0.20±0.02 (26.83)	0.02±0.00 (11.59)	0.12±0.01 (16.62)	0.07±0.00 (36.17)	0.26±0.03 (35.60)	0.02±0.00 (13.37)	0.08±0.00 (11.33)

注: F_E 、 F_W 、 F_{HAc} 、 F_{HCl} 和 F_R 分别表示 80% 的乙醇、去离子水、2% HAc、0.6 mol·L⁻¹ HCl 和残留态; 括号内表示百分比(%); 除幼苗期未加 V 外, 其他生长期 V 处理浓度均为 100 mg·kg⁻¹。

Note: F_E 、 F_W 、 F_{HAc} 、 F_{HCl} and F_R represented the fractions extracted by 80% ethanol, distilled water, 2% HAc, and 0.6 mol·L⁻¹ HCl and residual form respectively. Parenthesis indicates percentage. Addition to the seedling without V, the concentration of V was 100 mg·kg⁻¹.

献^[31]表明, 水稻对 Cd 的积累为根系>子实>茎叶, 对 Zn 却表现为茎叶>根系、子实, 而水稻对 V 的吸收为根>茎叶>子实, 说明水稻植株对 V 有一定的迁移转运能力, 它能够将少量的 V 从根部运输到茎叶、子实等部位。但随着生长时间和 V 处理浓度的增加, 根部 V 含量增加较多, 茎叶 V 含量变化较小, 说明水稻植株将 V 从根部转运到地上部的迁移能力下降(表 3), 根系固持 V 的能力较强, 减少了 V 向地上部分运输, 从而缓解重金属对植物生命活动的影响。

植物体内重金属离子能与极性化合物结合形成螯合物, 限制金属在体内的移动性。这些极性化合物

一般是水溶性、醇溶性和酸溶性低分子量的金属螯合物, 含有大量金属离子配位基团, 在维持细胞金属离子的微量稳态方面起着重要作用^[32]。本研究中, 两种水稻根中 V 均主要以活性较低的酸提取态(F_{HCl} 和 F_{HAc})存在, 表明 V 在水稻植株的地下部以重金属磷酸盐类、蛋白结合态类和草酸盐类形态存在, 通过沉淀和络合等作用使得游离态 V 含量及迁移能力降低, 从而可降低其有效性及毒性。水稻茎和叶中 V 总量明显低于根部, 其累积量未呈现随 V 处理浓度的增高而明显增加的现象, 也与水稻根中活性较低的 V 形态占优势, 难以向上运移有关。与根部相比较,

茎叶中水溶态(F_w)的含量比根部更多,且随着植物生长时间的增加(水稻扬花期和成熟期),植株茎叶中活性较高的水溶态(F_w)和醇溶态(F_E)的比例增加,说明水稻地上部植株中活性大的V含量增大,容易迁移以减小其潜在的毒性,这与水稻的耐性机制有关。

4 结论

(1)在各生长期,两个品种水稻根、茎叶和子实中累积的V含量为根>茎叶>子实。水稻吸收的V主要集中在根部,占植株总V含量的75%以上。十优838水稻比新优188水稻对V的吸收富集能力强,而新优188水稻对V有较好的迁移转运能力。

(2)两个品种水稻根中V主要以活性较低的盐酸提取态(F_{HCl})和醋酸提取态(F_{HAc})为主,在茎叶中以盐酸提取态(F_{HCl})和水提取态(F_w)为主,说明水稻植株吸收的V被固定在根部,限制了其转移到茎和叶,可减小V对植物生理过程的干扰。

(3)随着水稻生育期的延长,植株茎叶中活性较大的V含量(F_w 、 F_E)增加,表明V的迁移能力增大。

参考文献:

- [1] Rawal S B, Singh M V, Salhan A, et al. Influence of vanadium on acclimatization of humans to high altitude[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 40(2):95-98.
- [2] Weg W. Salinity dependence of vanadium toxicity against the brackish water hydroid *Cordylophora caspia*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 48:18-26.
- [3] 侯明,张兴龙,路畅. V(V)、Cr(VI)单一和复合胁迫对小麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. *环境化学*, 2012, 31(7):1016-1022.
HOU Ming, ZHANG Xing-long, LU Chang. Effects of V, Cr single and combined stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedling[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(7):1016-1022.
- [4] 邹宝方,何增耀. 钒对大豆生长的影响[J]. *农业环境保护*, 1992, 11(6):261-263, 277.
ZOU Bao-fang, HE Zeng-yao. Vanadium influence on the soybean[J]. *Agro-environmental Protection*, 1992, 11(6):261-263, 277.
- [5] 胡莹,朱永官,黄益宗,等. 钒镉复合污染对水稻吸收积累镉、钒和磷的影响[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(2):198-202.
HU Ying, ZHU Yong-guan, HUANG Yi-zong, et al. Effects of combined contaminations of vanadium and cadmium on cadmium, vanadium and phosphorus uptake by rice in solution culture[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2):198-202.
- [6] 侯明,黄以峰,何剑亮,等. 蔬菜根际环境钒的形态变化及植物有效性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(7):1353-1357.
HOU Ming, HUANG Yi-feng, HE Jian-liang, et al. Speciation and phytoavailability of vanadium in vegetable rhizosphere[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2009, 28(7):1353-1357.
- [7] 胡正义,沈宏,曹志洪. Cu污染土壤-水稻系统中Cu的分布特征[J]. *环境科学*, 2000, 5(2):62-65.
HU Zheng-yi, SHEN Hong, CAO Zhi-hong. Distribution of Cu in soil-crop system polluted by Cu[J]. *Environmental Science*, 2000, 5(2):62-65.
- [8] 李铭红,李侠,宋瑞生. 受污农田中农作物对重金属镉的富集特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3):675-679.
LI Ming-hong, LI Xia, SONG Rui-sheng. Cadmium accumulation in crops grown in polluted farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):675-679.
- [9] 陈岭啸,宋根先,袁旭音,等. 长江三角洲典型地区土壤-水稻系统中Cd的分布及其迁移制约因素[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(3):288-295.
CHEN Ling-xiao, SONG Yin-xian, YUAN Xu-yin, et al. Distribution of Cd and impact factors on the migration in soil-rice system in typical area of Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(3):288-295.
- [10] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biometals*, 2004, 17(5):549-553.
- [11] 邹继颖,刘辉,祝惠,等. 重金属汞镉污染对水稻生长发育的影响[J]. *土壤与作物*, 2012, 1(4):227-232.
ZOU Ji-ying, LIU Hui, ZHU Hui, et al. Effects of mercury and cadmium pollution on rice growth and development[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(4):227-232.
- [12] Sundaramoorthy P, Chidambaram A, Ganesh K S, et al. Chromium stress in paddy: (i) Nutrient status of paddy under chromium stress; (ii) Phytoremediation of chromium by aquatic and terrestrial weeds[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2010, 333:597-607.
- [13] 胡莹,黄益宗,段桂兰,等. 镉对不同生态型水稻的毒性及其在水稻体内迁移转运[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(6):664-670.
HU Ying, HUANG Yi-zong, DUAN Gui-lan, et al. Cadmium toxicity and its translocation in two ecotype rice cultivars[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(6):664-670.
- [14] Williams P N, Lei M, Sun G X, et al. Occurrence and partitioning of cadmium arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(3):637-642.
- [15] Zhao K L, Liu X M, Xu J M, et al. Heavy metal contaminations in soil-rice system: Identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1/2):778-787.
- [16] 司江英,汪晓丽,赵海涛,等. 不同铜水平对水稻幼苗生长、铜积累和养分吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4):1312-1315.
SI Jiang-ying, WANG Xiao-li, ZHAO Hai-tao, et al. Effects of different copper levels on growth, copper accumulation and nutrient uptake of rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1312-1315.

- [17] 赵 雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土壤污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11):2236-2240.
- ZHAO Xiong, LI Fu-yan, ZHANG Dong-ming, et al. Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2236-2240.
- [18] 陈志德, 仲维功, 杨 杰, 等. 不同水稻品种在 Cd、As 和 Hg 胁迫下的吸收积累特性[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2):389-393.
- CHEN Zhi-de, ZHONG Wei-gong, YANG Jie, et al. Response characteristics of different rice cultivars under Cd, As and Hg stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(2):389-393.
- [19] 周鸿凯, 何觉民, 陈小丽, 等. 大田生产条件下不同品种水稻植株中镉的分布特点[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):229-234.
- ZHOU Hong-kai, HE Jue-min, CHEN Xiao-li, et al. The Cd uptake and distribution features in plant organs of four rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):229-234.
- [20] Carey A M, Lombi E, Donner E, et al. A review of recent developments in the speciation and location of arsenic and selenium in rice grain[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2012, 402:3275-3286.
- [21] Kuramata M, Abe T, Matsumoto S, et al. Tadashi Abe: Arsenic accumulation and speciation in Japanese paddy rice cultivars[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57(2):248-258.
- [22] Wu C, Ye Z H, Shu W S, et al. Arsenic accumulation and speciation in rice are affected by root aeration and variation of genotypes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(8):2889-2898.
- [23] Zeng F R, Ali S, Qiu B Y, et al. Effects of chromium stress on the sub-cellular distribution and chemical form of Ca, Mg, Fe, and Zn in two rice genotypes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173:135-148.
- [24] 于 辉, 杨中艺, 杨知建, 等. 不同类型镉积累水稻细胞镉化学形态及亚细胞和分子分布[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2221-2226.
- YU Hui, YANG Zhong-yi, YANG Zhi-jian, et al. Chemical forms and subcellular and molecular distribution of Cd in two Cd-accumulation rice genotypes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2221-2226.
- [25] 许嘉琳, 鲍子平, 杨居荣, 等. 农作物体内铅、镉、铜的化学形态研究[J]. 应用生态学报, 1991, 2(3):244-248.
- XU Jia-lin, BAO Zi-ping, YANG Ju-rong, et al. Chemical forms of Pb, Cd and Cu in crops[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(3):244-248.
- [26] Tiwari K K, Singh N K, Patel M P, et al. Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74:1670-1677.
- [27] Tanhan P, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, et al. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2):323-329.
- [28] 孙贤斌, 李玉成, 王 宁. 铅在小麦和玉米中活性形态和分布的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4):666-669.
- SUN Xian-bin, LI Yu-cheng, WANG Ning. Comparisons on active chemical form and distribution of lead in wheat and corn[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(4):666-669.
- [29] 铁 梅, 梁彦秋, 张朝红, 等. Cd 污染地草坪草中 Cd 分布特征及化学形态的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2):175-178.
- TIE Mei, LIANG Yan-qiu, ZHANG Chao-hong, et al. Distribution characteristics and chemical pattern of cadmium in grasses planted in the cadmium contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2):175-178.
- [30] 居 婷, 张春华, 胡延玲, 等. 水稻对镉的吸收转运与耐性的关系研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(9):3506-3508.
- JU Ting, ZHANG Chun-hua, HU Yan-ling, et al. Studies on the relationship among cadmium absorption, translocation and tolerance in rice [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(9):3506-3508.
- [31] 仲维功, 杨 杰, 陈志德, 等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(4):331-338.
- ZHONG Wei-gong, YANG Jie, CHEN Zhi-de, et al. Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs (*Oryza sativa* L.)[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2006, 22(4):331-338.
- [32] Rauser W E. Structure and function of metal chelators produced by plants[J]. *Cell Biochem and Biophys*, 1999, 31:19-48.