

DOI: 10.11766/trxb201609090340

水稻不同生育期对硒吸收累积及铁膜的吸附特性*

张城铭 周鑫斌[†] 高阿祥

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要 采用盆栽试验方法, 研究不同生育期水稻各部位对硒的吸收累积及根表铁膜对水稻吸收累积硒的影响机制。结果表明: 水稻营养器官生物量在拔节期积累最快, 不同时期营养器官中硒含量不同, 根中的硒在拔节期达到最大, 根和茎中的硒在灌浆期和成熟期被转运至其他部位。水稻各组织中约50%的硒在拔节期和孕穗期被吸收, 小穗吸收总硒的47.22%且是在孕穗期完成的, 说明这两个时期对于水稻硒吸收累积非常关键。铁膜中硒占总硒的比例在幼苗期高达73.63%, 是同时期茎中硒所占比例的4.87倍。随着生育期的推进, 铁膜中硒所占比例显著递减, 在成熟期降低至20.02%, 同时期茎中硒占总硒的比例为65.42%。这表明, 根表铁膜在水稻整个生长周期内通过吸附作用使其表面能够富集一定量的硒, 在水稻生育后期, 当土壤溶液中硒含量较少时, 根表铁膜可能会作为一个硒源, 吸附在根表铁膜中的硒重新被水稻所利用, 铁膜在水稻硒吸收转运的过程中扮演了“缓冲器”的角色。明确不同生育期根表铁膜对水稻硒累积特性, 在生产管理中可在不同生育期采取措施提高稻田硒生物有效性, 从而为进一步提高农产品中硒含量提供科学依据。

关键词 水稻; 生育期; 硒; 根表铁膜

中图分类号 S143.7⁺1 **文献标识码** A

硒是一种人类必需的微量营养元素, 以硒蛋白的形式参与体内抗氧化作用^[1]。较高的血浆含硒量对某些癌症有预防和抗癌功效(如乳腺癌、肺癌、食管癌和胃癌等)^[2]。缺硒会引起地方病, 如克山病、大骨节病、地方性肝癌和浙江嘉善的大肠癌等^[3]。我国土壤大面积缺硒, 约有72%的地区土壤处于缺硒和低硒的状态^[4]。土壤或结合叶面施硒是通过食物链补硒的有效途径^[5-6]。但是, 硒的植物利用率仅为5%~30%^[7], 这种施硒方法造成农业投入浪费的同时, 也引起了潜在的环境问题^[8-9]。因此, 提高植物对硒的利用率, 减少硒肥的损失, 既是提高人类硒摄入量的有效途径, 也是防范潜在环境问题的有效措施。

水稻是我国的主粮, 通过研究水稻吸收和积

累硒的特性, 弄清水稻吸收累积硒的关键时期, 进而有效调控饮食中硒的摄入量, 在我国具有非常重要的现实意义。水稻田由于长期淹水, 透气性较差, 硒主要以亚硒酸盐的形式存在, 占总硒的87.3%~93.6%^[10]。水稻在长期进化中, 根系形成了发达的通气组织以适应缺氧环境^[11]。通气组织将氧气释放到水稻根际中, 与根际微生物共同作用在根表形成根表铁氧化物胶膜, 简称“铁膜”^[12]。铁膜是一种由铁氧化物或氢氧化铁氧化物在水稻根部大量累积形成的红棕色胶膜, 能够在水稻根际通过吸附和沉淀等方式阻止重金属元素被水稻根系吸收转运, 从而影响其生物有效性^[13-14]。

采用溶液短期培养试验证明, 铁膜能吸附亚硒酸盐和硒酸盐, 铁膜增加了亚硒酸盐吸收, 但是降

* 国家自然科学基金项目(31372141, 31672238)和2016中央高校基本科研业务费学生双创项目(XDJK2016E155)资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31372141 and 31672238) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. XDJK2016E155)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zxbissas@swu.edu.cn

作者简介: 张城铭(1992—), 男, 四川遂宁人, 硕士研究生, 主要从事植物硒营养生理研究。E-mail: zhangcm1992@outlook.com

收稿日期: 2016-09-09; 收到修改稿日期: 2016-10-12; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-12-02

低了硒酸盐吸收。对于供应亚硒酸盐处理,随着根表铁膜数量的增加,根系硒的浓度增加,但是根表铁膜降低了硒从根到茎的转运^[15]。Zhou等^[16]采用溶液培养证实,吸附在根表铁膜的硒能够再次被植物吸收利用。上述研究均基于水稻苗期试验,关于不同生育期水稻对硒的吸收累积及根表铁膜对水稻吸收积累硒的影响机制尚不清楚。本研究旨在明确水稻对硒吸收积累的关键时期,以及铁膜在不同生育期对硒的吸收和积累特性,对于调控水稻籽粒富硒具有一定的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻品种为西农优1号,供试土壤采自重庆市北碚区农田表层(0~20 cm),土壤类型为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土(潜育水耕人为土)。供试土壤经自然风干后磨碎过5 mm筛用于盆栽试验,其中一部分过2 mm筛用于土壤理化性质分析^[17],结果见表1。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil in test

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	全硒 Total Se (mg kg ⁻¹)	全铁 Total Fe (g kg ⁻¹)	全锰 Total Mn (mg kg ⁻¹)
潜育水耕人为土 Gleyi-Stagnic Anthrosols	6.75	28.5	1.02	0.95	94.5	0.32	21.1	354

1.2 试验设计

试验在西南大学资源环境学院温室中进行。将亚硒酸盐以溶液的形式与已施入基肥的土壤反复混匀,土壤中硒的添加浓度为1 mg kg⁻¹。盆栽试验采用土壤-石英砂联合培养法,试验时每个尼龙网袋中装入酸洗的石英砂(不加硒)300 g,然后置于装有6 kg土壤的实验盆中,同时在土壤及尼龙网袋内埋入3支土壤溶液取样器(尼龙网袋内1支,土壤两侧各1支,为了取样更加均匀,减少误差)(Rhizon MOM长10 cm,直径2.5 mm,瓦格宁根,新西兰)。土壤淹水(2~3 cm)平衡三天后开始试验。每个生育期(即幼苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期和成熟期)为一个处理,每处理重复4次,共28盆。

水稻种子经10% H₂O₂表面消毒后用蒸馏水冲洗干净,置于石英砂中催芽。7 d后移栽,每个尼龙网袋内放入3~5株生长情况一致的幼苗(最终保留3株)。在水稻整个生育周期内,保持土壤淹水(2~3 cm)。

1.3 样品采集与处理

水稻播种后第0、5、10、15、40、80、135天(即幼苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期和成熟期)分别收获水稻植株,将其按不同的器官(根、茎、叶、小穗和籽粒)进行分离,并

用蒸馏水冲洗干净后烘干、磨碎,保存于密封塑料袋中,分别测定其生物量和硒含量。

土壤溶液取样器分别于水稻播种后第0、5、10、15、40、80、135天提取根际和非根际土壤溶液各20 ml(尼龙网袋内的石英砂提取的溶液为根际土壤溶液,盆内土壤提取的溶液为非根际土壤溶液),用于测定土壤溶液中总硒含量。

水稻播种后第10、15、40、80、135天(根表铁膜出现的生育期)分别将尼龙网袋从盆中取出,将根和石英砂分开,用蒸馏水冲洗干净,收获新鲜根系,用柠檬酸三钠-碳酸氢钠-连二亚硫酸钠(DCB)(0.03 mol L⁻¹ Na₃C₆H₅O·2H₂O, 0.125 mol L⁻¹ NaHCO₃和0.06 mol L⁻¹ Na₂S₂O₄)溶液中,在室内温度20~25℃温育1 h后,蒸馏水冲洗至100 ml定容。提取铁膜后的水稻根烘干、称重。

1.4 样品测定及质量控制

土壤溶液中总硒的测定:取2 ml用10% HNO₃稀释的土壤溶液,分别加入2 ml 优级纯的浓硝酸和1 ml浓度为6 mol L⁻¹的盐酸,然后将溶液混匀后,放入水浴锅中,100℃下加热2 h,待溶液冷却后用原子荧光光谱法(AFS, AFS-920,北京吉天仪器有限公司,北京,中国)测定溶液中硒含量^[15, 18]。

DCB溶液中硒和铁的测定：分别用原子荧光光谱法（AFS，AFS-920，北京吉天仪器有限公司，北京，中国）和电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES，Optima2000，Perkin Elmer Co. Waltham，MA，美国）测定硒和铁的含量^[15]。

植株硒的测定参照Zhang等^[19]的方法。为了验证消化过程和随后分析的准确性和精度，茶叶标样（GBW07605，中国标准研究中心）和空白与样品同时消化，硒回收率为95%~98%^[19]。

1.5 数据处理

硒的吸收百分数 = $(C_i B_i - C_{i-1} B_{i-1}) / C_m B_m \times 100$ ^[20]

式中， C_i 表示该时期硒浓度， mg kg^{-1} ； B_i 表示同时期生物量， g pot^{-1} ； C_{i-1} 表示前一个时期硒浓度， mg kg^{-1} ； B_{i-1} 表示前一个时期生物量， g pot^{-1} ； C_m 表示成熟期硒浓度， mg kg^{-1} ； B_m 表示成熟期生物量， g pot^{-1} 。

使用Excel 2010和SPSS 18.0软件进行绘图及单因素方差分析处理，采用LSD（最小显著差异法）统计方法进行显著性检验。

2 结果

2.1 水稻不同生育期各器官生物量

在水稻整个生育期，根、茎和叶三种营养器官的生物量变化基本一致，且在成熟期之前均呈显著增加趋势（图1）。与分蘖期相比，水稻拔节期根、茎和叶的生物量增加极其显著，分别增加了10.3倍、3.4倍和6.0倍；拔节期后，根、茎和叶生物量的增加趋势开始放缓，且在灌浆期达到峰值；

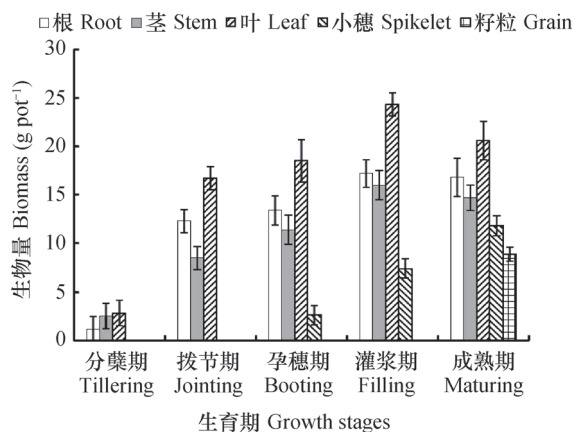


图1 水稻不同生育期的根、茎、叶、小穗和籽粒的生物量
Fig. 1 Biomass in root, stem, leaf, spikelet, and grain of rice relative to growth stage

灌浆期之后，根、茎和叶的生物量均有所减少。小穗的生物量在水稻孕穗期之后迅速增加，籽粒在成熟期的生物量为 8.9 g pot^{-1} 。可见，拔节期是水稻营养器官生物量积累速度最快的时期，为水稻下一个时期（孕穗期）水稻生殖生长提供足够的营养物质。

2.2 水稻不同生育期土壤溶液硒含量动态变化

土壤中添加亚硒酸盐后，在水稻整个生长期中，土壤溶液中硒含量呈持续降低的趋势，总硒的变化范围从 $37.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 降低至 $2.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 。非根际土壤溶液中硒含量在拔节期之前显著降低（从 $37.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 降低至 $10.3 \mu\text{g L}^{-1}$ ），拔节期之后降低趋势有所减缓，在成熟期达到最小值 $3.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 。根际土壤溶液中硒含量在分蘖期之前显著降低（ $15.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 降低至 $8.6 \mu\text{g L}^{-1}$ ），分蘖期之后降低趋势有所减缓，在成熟期达到最小值 $2.2 \mu\text{g L}^{-1}$ （图2）。非根际土壤溶液中硒含量在水稻整个生育期均大于根际土壤溶液硒含量，拔节期之前这种差异极其显著，拔节期之后差异缩小，在水稻扬花期之后无显著差异。

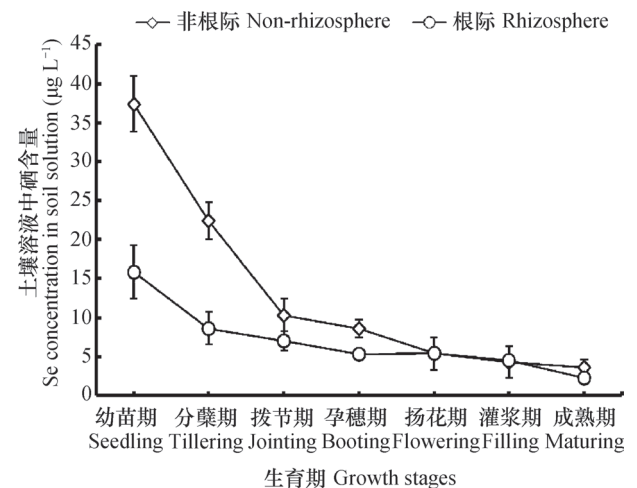


图2 水稻不同生育期土壤溶液中硒含量
Fig. 2 Selenium concentration in soil solution of rice relative to growth stage

2.3 水稻不同生育期体内硒含量动态变化

水稻根中的硒含量从幼苗期开始增加，在拔节期达到了峰值 8.8 mg kg^{-1} ，至扬花期之前均呈减少趋势，在灌浆期略有增加，之后继续减少，在成熟期达到最小值 5.1 mg kg^{-1} （图3）。根中的硒在水稻生殖生长阶段（孕穗期之后的生长期）的含量较在营养生长阶段的含量普遍偏低，前者的含量

范围为 $5 \sim 6 \text{ mg kg}^{-1}$ ，后者的含量范围为 $6.5 \sim 8.8 \text{ mg kg}^{-1}$ （图3）。水稻茎中的硒含量在扬花期之前持续增加且变化不大，在灌浆期显著减少，之后保持稳定值 1.03 mg kg^{-1} （图3）。同样，水稻叶中的硒含量也是持续增加且变化不大，但这种增加趋势持续了整个水稻生育周期。水稻小穗中的硒含量在孕穗期（小穗出现的最早时期）达到最大值

0.75 mg kg^{-1} ，且持续减少，在成熟期达到最小值 0.35 mg kg^{-1} （图3）。在水稻成熟期，籽粒出现，硒含量为 0.31 mg kg^{-1} ，略低于成熟期的小穗中硒含量（图3）。在不同生育期，水稻体内各器官中硒含量在孕穗期之前的大小关系为：根 > 茎 > 叶，在孕穗期之后的大小关系为：根 > 茎 > 叶 > 小穗 > 籽粒。

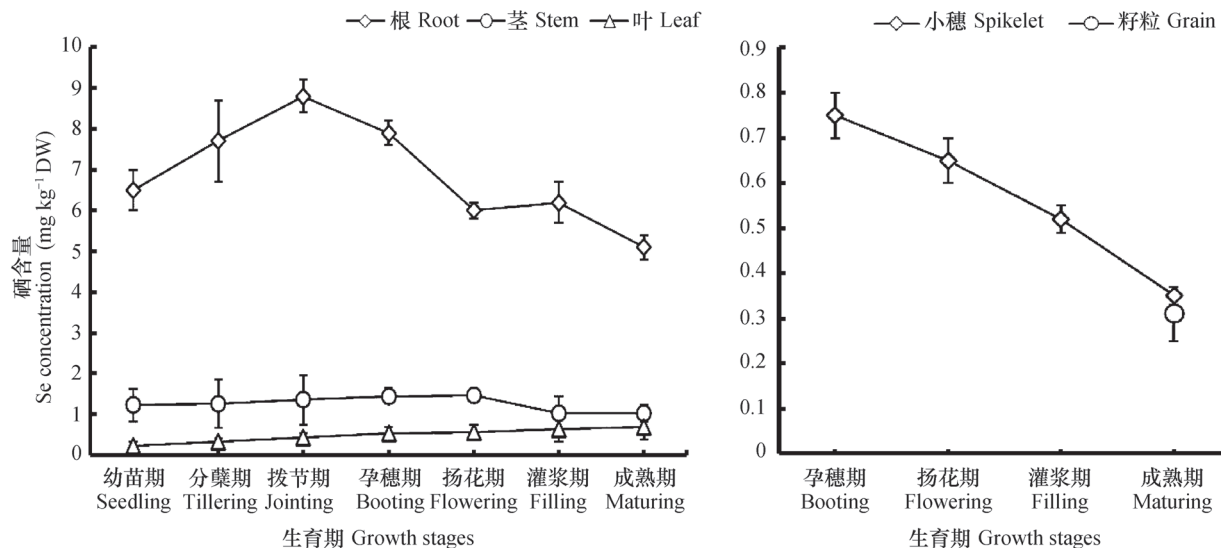


图3 水稻不同生育期根、茎、叶、小穗和籽粒硒含量

Fig. 3 Selenium concentration in root, stem, leaf, spikelet, and grain of rice relative to growth stage

2.4 水稻不同生育期硒吸收百分数

为了明确各生育期对水稻吸收硒的贡献程度，在水稻各器官硒含量和相应生物量的基础上计算水稻不同生育期硒的吸收百分数。其中，正数表示吸收积累的硒大于转运损失的硒，负数表示转运损失的硒大于吸收积累的硒，结果见表2。水稻根在拔节期和孕穗期吸收硒百分数超过50.01%。水稻茎中硒的吸收百分数同样在拔节期达到最大值51.93%，其次是孕穗期31.77%，这两个时期合

计硒的吸收百分数超过了100%，在整个生育期中占据了绝对多数。水稻叶中硒的吸收百分数在拔节期达到了峰值，约为44%，孕穗期硒的吸收百分数约为23%，在整个生育期仅次于拔节期。水稻小穗中硒的吸收百分数在孕穗期达到最大值，约为47.22%。在水稻成熟期，根、茎和叶硒的吸收百分数均为负值，分别为-3.36%、-8.84%和-7.85%，小穗硒的吸收百分数为6.82%。可见，水稻各组织中约50%的硒是在拔节期和孕穗期吸收

表2 不同生育期水稻硒的吸收百分数

Table 2 Se uptake in percentage to the total in the different parts of the plant at different growth stages (%)

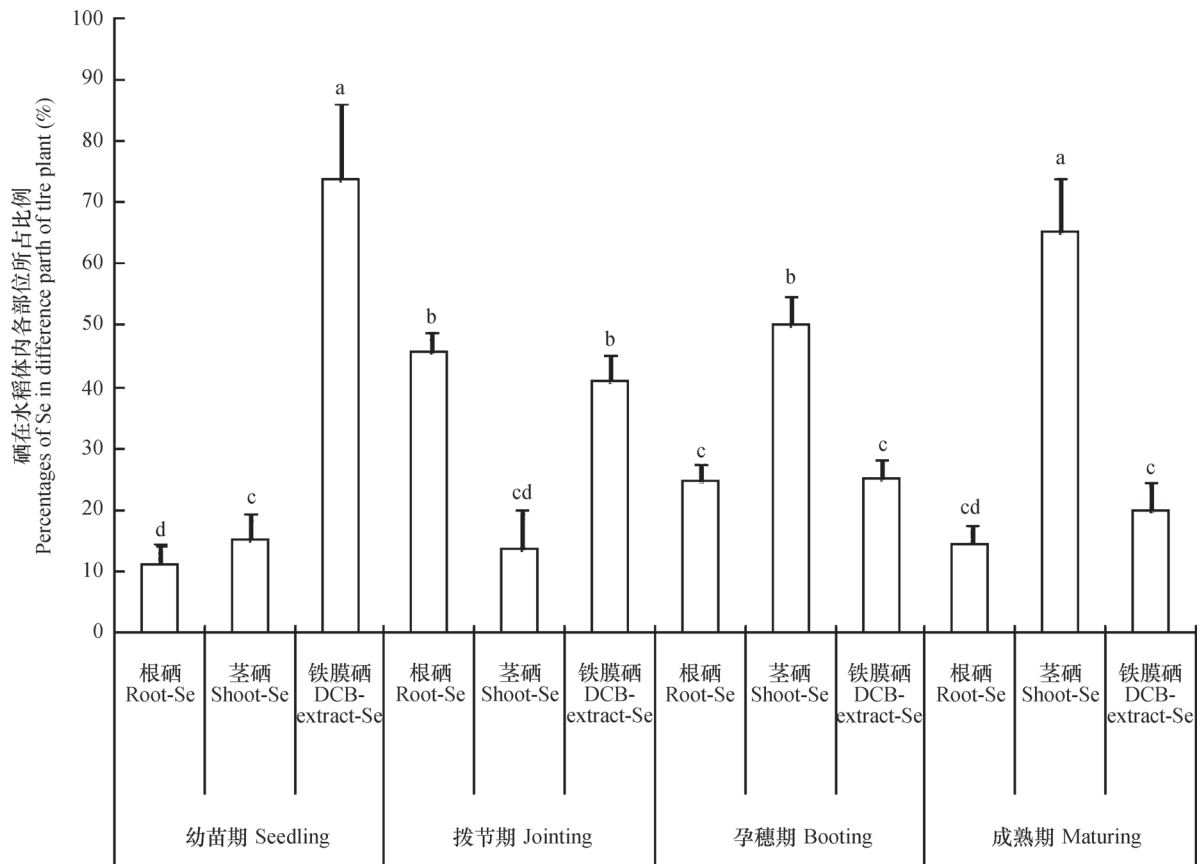
	幼苗期 Seedling	分蘖期 Tillering	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	扬花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing
根Root	0.32	15.85	28.67	58.06	12.03	-11.57	-3.36
茎Stem	4.87	15.93	51.93	31.77	22.07	-17.73	-8.84
叶Leaf	0.61	5.60	43.59	23.15	19.48	15.42	-7.85
小穗Spikelet	0	0	0	47.22	20.46	25.50	6.82

的,说明这两个时期对于水稻硒吸收非常关键。

2.5 水稻不同生育期各部位硒含量的比例关系

由图4可见,铁膜中硒所占比例在幼苗期达到最大值73.63%,是同时期茎中硒所占比例的4.87倍。随着生育期的推进,铁膜中硒所占比例显著递减($p < 0.001$),在成熟期降低至20.02%。茎中

硒所占比例在整个生育期显著增加($p < 0.001$),从幼苗期的15.12%增加至成熟期的65.42%。根中硒所占比例在幼苗期约为11.25%,在拔节期达到最大值46.31%,之后开始逐渐减少,至成熟期减少至14.56%。以上变化趋势说明,随着水稻生育期的推进,铁膜中吸附的硒能重新被水稻根系吸收利用。



注:图中同一生育期不同字母表示差异极显著($p < 0.001$) Note: Different letters in the same stage mean significant difference at $p < 0.001$

图4 水稻不同生育期根、地上部和铁膜中硒所占比例

Fig. 4 Selenium distribution in root, shoot, and iron coating of rice relative to growth stage

2.6 水稻根表铁膜中铁与硒间相互关系

由图5可见,在水稻整个生育周期中,根表铁膜中铁含量和硒含量的变化具有显著的相关性。因此,根表铁膜中铁含量和硒含量之间的相互关系能够被一个一元二次方程表达($y = -0.0016x^2 + 0.3986x - 18.70$, $p < 0.001$)。说明,根表铁膜对硒元素具有较高的亲和力,能够在整个生育期中不断吸附硒。

3 讨论

3.1 水稻不同生育期对硒吸收累积的差异

土壤溶液中硒含量在水稻整个生育期中均呈显著下降趋势(图2),这是由于长期淹水的条件下,硒主要以亚硒酸盐的形式存在于土壤溶液中,与硒酸盐相比,亚硒酸盐更容易被土壤固相(如铁氧化物和铁氢氧化物)吸附,从而造成了土壤溶液

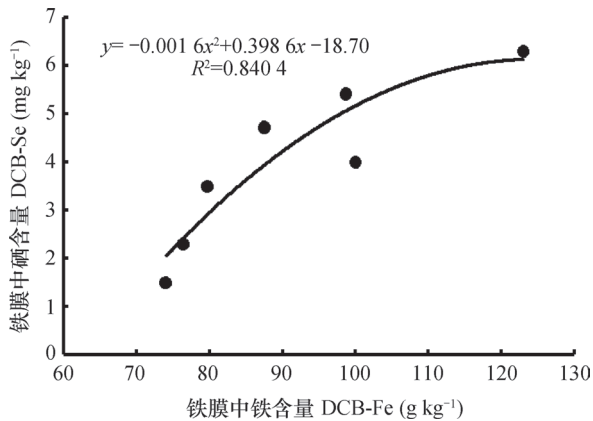


图5 水稻全生育期根表铁膜中硒含量和铁膜中铁含量的相互关系

Fig. 5 Relationship between DCB-Se and DCB-Fe on rice root surfaces during the whole growth period of rice

中硒含量的减少^[21-22]。另一方面,水稻对土壤溶液中有效硒的吸收以及微生物的同化作用等,均能造成这种结果^[23]。在水稻扬花期前,根际土壤溶液硒含量显著低于非根际土壤中,这可能是由于水稻根系对根际土壤硒的吸收利用,造成了这种差异。

水稻小穗中硒含量在孕穗期积累最多,从扬花期开始显著降低(图3)。一方面,由表2可知,小穗在孕穗期硒的吸收百分数超过了45%,说明在孕穗期水稻小穗吸收积累硒的能力最强。随后扬花期硒的吸收百分数降低至5.64%,这在一定程度上表明了水稻小穗硒的吸收积累能力显著降低,可能水稻小穗在开始灌浆时向籽粒转运大量的硒。另一方面,可能是随着水稻生育期的推进,小穗的生长极其迅速,扬花期之后水稻籽粒也开始灌浆,从而促进了小穗生物量的急剧增加,产生了生物量稀释效应。有研究表明,小穗中砷浓度和吸收百分数在籽粒灌浆之后迅速降低^[20]。Wu等^[24]的结果也表明,锌的吸收百分数在水稻孕穗期之后开始降低。上述结论与本研究结果一致。

由表2可以看出,水稻不同生育期中硒的吸收百分数波动较大,变化极其显著。根、茎和叶在水稻成熟期硒的吸收百分数均为负值,这表明水稻的营养器官在这一时期向外转运的硒比吸收积累的硒要多,其中根向上转运的最多,约为-24.46%,表现出硒向籽粒富集的特性,这一结果与Zhou和Shi^[25]的研究一致。水稻根、茎和叶硒的吸收百分数在拔节期最大,其中根和茎分别超过了100%

和70%;除根以外,茎和叶在孕穗期硒的吸收百分数均仅次于拔节期,分别为31.77%和23.15%,小穗在此时期硒的吸收百分数达到最大值。这说明,水稻的拔节期和孕穗期是水稻吸收硒的关键时期。原因可能有三:首先,水稻在拔节期和孕穗期生长活性最强,对各种营养元素的吸收能力得到提高^[25-26]。其次,水稻在孕穗期形成强大的根系,增加了根和土壤的接触面从而提高了营养元素的吸收^[27]。同时孕穗期较高的叶面积指数也促进了元素的吸收^[28]。另一方面,由图1得出结论:水稻的营养器官在拔节期生物量积累速度最快,说明水稻在此时期生长发育活动较强,同时,此时期也是水稻营养器官和生殖器官的交叉生长时期,为水稻下一个时期(孕穗期)生殖器官的出现及显著积累提供足够的营养物质,在此时期提高水稻营养器官硒积累能保证更多的硒转运至生殖器官包括籽粒中。

3.2 根表铁膜对水稻硒吸收累积的影响机制

根表铁膜与土壤中的铁氧化物具有相似的化学性质,亚硒酸盐能被铁膜中铁氧化物吸附形成难溶复合物^[29]。从图5可以看出,根表铁膜对硒元素具有较高的亲和力,能够在水稻整个生育期不断吸附硒,且铁膜中的硒含量与铁膜的数量呈正相关^[22]。正因为铁膜具有吸附特性,所以能够阻止重金属元素进入根细胞以及向地上部转运^[15]。针对铁膜吸附砷和磷等非金属元素的研究与本研究结果类似^[20-30]。本试验结果(图4)显示,在水稻幼苗期根、地上部和铁膜硒含量差异显著,铁膜中硒含量所占比例最大,说明在水稻幼苗期根表铁膜吸附了大量的硒,这与前人的结果一致^[31]。在水稻成熟期地上部硒含量所占比例则超过了铁膜中硒所占比例,说明铁膜中的硒重新被水稻吸收利用。Balistrieri和Chao^[32]的研究表明,针铁矿吸附的亚硒酸盐能够被有机酸(柠檬酸或草酸)阴离子转移出来。Zhou等^[16]也证明了铁膜中吸附的硒能够被低分子量有机酸重新活化,供水稻再次利用。水稻田生态系统是一个缺氧的环境,土壤在厌氧条件下形成了强还原环境,能够把亚硒酸根(SeO_3^-)还原为负二价硒离子(Se^{2-}),因此,水稻根表铁膜可能在吸附了大量亚硒酸盐的同时也吸附了较多的 Se^{2-} , Se^{2-} 具有很强的还原性,后者可将根表铁膜中的铁和锰大量还原,使根表铁膜释放出更多的硒供水稻吸收利用^[33],这也是水稻生育后期根际

土壤和非根际土壤之间硒含量差异不显著的重要原因。因此, 铁膜能够吸附较多的硒元素, 但随着生育期的推进, 硒会还原铁膜, 从而释放出更多的硒元素供水稻吸收转运。

本研究揭示了水稻在不同生育期对硒的吸收累积特性是不一致的, 这将为制定培养富硒水稻的措施提供一定的理论依据。在水稻的拔节期, 根、茎和叶的吸收百分数以及根的硒含量均达到了峰值。在孕穗期, 茎和叶的吸收百分数也仅次于拔节期; 小穗的吸收百分数和硒含量均达到了峰值。因此, 水稻的拔节期和孕穗期是提高地上部硒含量以及籽粒吸收累积硒的关键时期。同时, Huang等^[23]的研究表明: 水稻幼苗在移栽后35 d (孕穗期), 根表铁膜可能是水稻根吸收硒的硒源。可以推断, 此时期根表铁膜吸附的硒已经开始被水稻吸收利用, 这也极大地促进了水稻对硒的吸收累积。关于根表铁膜中的硒被水稻重新利用的关键时期, 还需进一步深入研究。烤田是农民在实际生产中常用的一种水稻田水分管理技术, 其原理是将水稻田中水分排出, 增加土壤中的氧气, 提高土壤氧化还原电位, 增强土壤微生物活性, 促进水稻根系发育, 从而促进水稻养分吸收。那么, 在水稻关键生育期进行烤田或者干湿交替等水分管理是否能够促进水稻对硒的吸收累积, 还需要进行研究。揭示水分管理影响水稻吸收累积硒的机制, 对生产源头上有效调控硒从稻田向农产品食物链传递、进而满足人类硒营养健康具有重要的理论和现实意义。

4 结 论

水稻在拔节期营养器官生物量积累最为显著, 说明此时期是水稻生长发育的关键时期, 为水稻生殖器官的发育提供足够的营养物质。水稻根硒含量在拔节期达到最大值, 根和茎中的硒在灌浆期和成熟期被转运至其他部位。水稻根、茎和叶在拔节期和孕穗期吸收的硒约占总硒的50%, 小穗吸收占总硒47.22%的硒是在孕穗期完成的, 因此水稻吸收累积硒的关键时期是拔节期和孕穗期。根表铁膜能够持续不断地吸附硒, 且铁膜数量越多所吸附的硒就越多。随着生育期的推进, 吸附在根表铁膜中的硒会重新被水稻吸收利用, 铁膜在水稻吸收转运的过程中扮演了“缓冲器”的角色。

参 考 文 献

- [1] Rayman M P. Selenium and human health. *The Lancet*, 2012, 379 (9822): 1256—1268
- [2] Cai X L, Wang C, Yu W Q, et al. Selenium exposure and cancer risk: An updated meta-analysis and meta-regression. *Scientific Reports*, 2016 (6): Article number: 19213
- [3] Navarro-Alarcon M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: A review. *Science of the Total Environment*, 2008, 400 (1/3): 115—141
- [4] Chen L, Yang F, Xu J, et al. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content of rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50 (18): 5128—5130
- [5] Combs G E. Food system-based approaches to improving micronutrient nutrition: The case for selenium. *Biofactors*, 2000, 12 (1/4): 39—43
- [6] 管亚玲, 王朝辉, 毛晖, 等. 施用硒、锌、铁对玉米和大豆产量与营养品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (1): 252—256
Zan Y L, Wang Z H, Mao H, et al. Effect of Se, Zn and Fe application on yield and nutritional quality of maize and soybean (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (1): 252—256
- [7] Eichgreutorex S, Sogn T A, Gaard A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79 (3): 221—231
- [8] Hartikainen H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 18 (4): 309—318
- [9] Broadley M R, White P J, Bryson R J, et al. Biofortification of UK food crops with selenium. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2006, 65 (2): 169—181
- [10] Das S, Chou M L, Jean J S, et al. Water management impacts on arsenic behavior and rhizosphere bacterial communities and activities in a rice agro-ecosystem. *Science of the Total Environment*, 2015, 542 (Pt A): 642—652
- [11] Shiba H, Daimon H. Histological observation of secondary aerenchyma formed immediately after flooding in *Sesbania cannabina* and *S. rostrata*. *Plant and Soil*, 2003, 255 (1): 209—215

- [12] Weiss J V, Emerson D, Backer S M, et al. Enumeration of Fe (II) -oxidizing and Fe (III) -reducing bacteria in the root zone of wetland plants: Implications for a rhizosphere iron cycle. *Biogeochemistry*, 2003, 64: 77—96
- [13] Mei X Q, Wong M H, Yang Y, et al. The effects of radial oxygen loss on arsenic tolerance and uptake in rice and on its rhizosphere. *Environmental Pollution*, 2012, 165 (6) : 109—117
- [14] Xu B, Yu S. Root iron plaque formation and characteristics under N₂ flushing and its effects on translocation of Zn and Cd in paddy rice seedlings (*Oryza sativa* L). *Annals of Botany*, 2013, 111 (6) : 1189—1195
- [15] Huang Q Q, Yu Y, Wang Q, et al. Uptake kinetics and translocation of selenite and selenate as affected by iron plaque on root surfaces of rice seedlings. *Planta*, 2015, 241 (4) : 907—916
- [16] Zhou X B, Shi W M, Zhang L H. Iron plaque outside roots affects selenite uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture. *Plant and Soil*, 2007, 290 (1) : 17—28
- [17] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 第1版. 北京: 中国大地出版社, 2008
- Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil chemical analysis and environmental monitoring (In Chinese). 1st ed. Beijing: China Land Press, 2008
- [18] Fujii R, Deverel S J, Hatfield D B. Distribution of selenium in soils of agricultural fields, western San Joaquin Valley, California. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52 (5) : 1274—1283
- [19] Zhang L H, Shi W M, Wang X C. Difference in selenite absorption between high-and low-selenium rice cultivars and its mechanism. *Plant and Soil*, 2006, 282 (1) : 183—193
- [20] Li R Y, Zhou Z G, Zhang Y H, et al. Uptake and accumulation characteristics of arsenic and iron plaque in rice at different growth stages. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46 (19) : 2509—2522
- [21] Barrow N J, Whelan B R. Testing a mechanistic model. VII. The effects of pH and of electrolyte on the reaction of selenite and selenate with a soil. *Journal of Soil Science*, 1989, 40 (1) : 17—28
- [22] Neal R H, Sposito G. Selenate adsorption on alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53 (1) : 70—74
- [23] Huang Q Q, Wang Q, Luo Z, et al. Effects of root iron plaque on selenite and selenate dynamics in rhizosphere and uptake by rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, 2015, 388 (1/2) : 255—266
- [24] Wu C Y, Lu L L, Yang X E, et al. Uptake, translocation, and remobilization of zinc absorbed at different growth stages by rice genotypes of different Zn densities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58 (11) : 6767—6773
- [25] Zhou X B, Shi W M. Effect of root surface iron plaque on Se translocation and uptake by Fe-deficient rice. *Pedosphere*, 2007, 17 (5) : 580—587
- [26] Liu H J, Zhang J L, Christie P, et al. Influence of external zinc and phosphorus supply on Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings with root surface iron plaque. *Plant and Soil*, 2007, 300 (1/2) : 105—115
- [27] Lin Z S, Zheng W Z, Song Y G, et al. Uptake, translocation, and distribution of phosphorus in rice at different growth stages. *Atomic Energy Science and Technology*, 1963 (6) : 477—479
- [28] Liu L J, Xu W, Wu C F, et al. Characteristics of growth, development, and nutrient uptake in rice under site-specific nitrogen management. *Rice Science*, 2007, 21 (2) : 167—173
- [29] Batty L C, Baker A J M, Wheeler B D, et al. The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel. *Annals of Botany*, 2000, 86 (3) : 647—653
- [30] Liu J G, Leng X M, Wang M X, et al. Iron plaque formation on roots of different rice cultivars and the relation with lead uptake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74 (5) : 1304—1309
- [31] Neal R H, Sposito G, Holtzclaw K M, et al. Selenite adsorption on alluvial soils. 1. Soil composition and pH effects. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51 (5) : 1161—1165
- [32] Balistrieri L S, Chao T T. Selenium adsorption by goethite. *Soil Science Society of American Journal*, 1987, 51 (5) : 1145—1151
- [33] 周鑫斌, 于淑慧, 王文华, 等. 土壤施硒对水稻根表铁膜形成和汞吸收的影响. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2014, 36 (1) : 91—95
- Zhou X B, Yu S H, Wang W H, et al. Effects of application of selenium in soil on the formation of root surface iron plaque and mercury uptake by rice plants (In Chinese). *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 36 (1) : 91—95

Uptake and Accumulation of Selenium and Iron Coating on Rice Root at Different Growth Stages

ZHANG Chengming ZHOU Xinbin[†] GAO Axiang

(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract 【Objective】 Rice is a staple food for the people in China, so it is feasible to improve effectively the status of the Chinese people being generally insufficient in intake of selenium by increasing the content of selenium in rice grains. Therefore, it is of great practical significance to the country to study characteristic of Se absorption and accumulation by rice, to define critical periods of the crop absorbing and accumulating selenium, hence to effectively regulate Se intake with daily diet. Rice is a species of hydrophyte, growing for a long time in fields flooded with water, where poor in aeration, the crop has a well-developed aerenchyma formed at the root, to adapt itself to the anaerobic environment. The aerenchyma releases oxygen into the rhizosphere of the rice, which acts jointly with rhizosphere microorganisms to form a thin layer of “iron coating” on the surface of the root. The coating readily adsorbs selenium, thus lowering its bio-availability. As the researches in the past focused mainly on kinetics of Se absorption by rice at the seedling stage and impact of the iron coating on Se absorption and transfer, little has been reported on Se absorption and accumulation by rice at different growth stages, and impact of the iron coating on rice root on Se absorption and accumulation in the whole growth period. 【Method】 A pot experiment was carried out to study Se absorption by rice at various growth stages and accumulation in various parts of the plant, and mechanism of the iron coating on rice root surface affecting Se absorption and accumulation. 【Result】 Results show that the jointing stage was the period of time when the nutritive organs of rice grew and accumulated the rapidest in biomass to store adequate nutrients for the growth of reproductive tissues of the rice at the next growth stage, namely, booting stage. Se content in the nutritive tissues varied with growth stage, and peaked in the root at the jointing stage. Se in the root and stem was transported to the other parts of the rice at the booting and maturing stages. About 50% of the selenium in the various tissues was absorbed by the plant at the jointing and booting stages, and 47.22% of the total selenium in the spikelets was filled up at the booting stage. Obviously, jointing and booting stages are the two critical periods for the plant to absorb and accumulate selenium in. Se content in the iron coating peaked at the seedling stage, accounting for 73.63% of the total in the plant, which was 4.87 times that (15.12%) in the stem. As the plant grew, Se content in the iron coating declined significantly down to 20.02% in proportion at the maturing stage, while Se content in the stem reached 65.42%, which shows that in the entire life cycle of rice, the iron coating on the root surface is able to accumulate a certain amount of selenium through sorption and serve as a Se source for the plant at the late growth stages, when soil solution contains less selenium. The selenium adsorbed to the iron coating can be absorbed and transported by the plant to its shoots. So the iron coating on the root surface plays a role of “buffer” in the process of Se absorption and transport. 【Conclusion】 By illustrating Se absorption and accumulation by rice varying with growth stage, this study has defined that the jointing and

booting stages are the two critical periods for the crop to absorb and accumulate Se in and the iron coating on the root surface plays a role of “buffer” in Se absorption and accumulation of rice. All the findings in this study may have certain theoretical and practical significance in producing selenium-rich rice grains.

Key words Rice; Growth stage; Selenium; Iron coating on root surface

(责任编辑: 陈荣府)