

水稻不同生育期对硒的吸收、转运及累积规律^①

管文文^{1,2}, 戴其根^{1*}, 张洪程¹, 尹雪斌^{2*}

(1 扬州大学农学院, 江苏扬州 225009; 2 中国科学技术大学苏州研究院功能农业重点实验室, 江苏苏州 215123)

摘要: 采用大田试验, 研究土壤施用含硒肥料后水稻中硒的积累和分布的动态变化。结果表明: 在水稻不同器官中硒的积累量与含硒肥料施用量呈正相关, 相关系数达到 0.98 以上。水稻成熟期, 硒施用量 30 kg/hm² 和 120 kg/hm² 处理全株硒浓度分别比对照处理提高了 98.9% 和 313.7%。不同生育期, 水稻各个器官中硒含量及累积量不同, 水稻硒的生物富集高峰期表现在孕穗期, 叶与水稻穗部吸收累积硒有着密切关系。水稻成熟期整个植株中硒的累积量为茎>叶>精米>根>颖壳。在整个水稻生育期硒有一定的运转累积规律: 水稻分蘖期时, 硒从根、茎流向叶片; 孕穗期再由叶流向茎; 灌浆期又从根运转到叶和穗中; 最后成熟期叶中的硒流向穗。苗期施用含硒肥料是一条提高水稻硒含量的有效农艺措施。

关键词: 硒; 肥料; 水稻; 累积; 分布

中图分类号: S511 文献标识码: A

硒(Se)是人类和动物健康必需的微量元素之一^[1]。硒具有抗氧化、增强人体免疫力、有效清除人体有害垃圾、促进人体健康、延缓衰老之功能^[2]。有报道指出, 缺硒可导致人类疾病, 如克山病(一种地方性心肌病)和大骨节病(一种骨关节炎)等^[3]。在中国, 缺硒地区面积占土地总面积的 72%, 从东北延伸到西南 22 个省^[4]。因此, 硒的缺乏对于我国是一个非常严重的营养和健康问题。通过生物强化生产富硒农产品是增加人类饮食中硒摄入量的一个重要途径^[5], 也是功能农业领域最活跃的实践之一。

中国人口的 60% 都以水稻为主食。然而, 我国稻米中硒含量相对较低(0.025 mg/kg ± 0.011 mg/kg), 所以中国居民摄入硒的量明显不足^[6]。食物硒含量高度依赖于不同地理区域土壤中有效硒水平, 植物吸收累积硒的能力也是重要的制约因素^[7]。许多研究侧重

于水稻叶面喷施含硒肥料(含硒酸钠或亚硒酸钠)以增加大米的硒含量^[8-9]。研究表明稻米硒营养强化在缺硒地区确实有效。但是有关水稻整个生育期对硒的吸收和积累的动态变化却少有报道。因此, 本研究的目的是通过苗期施用含硒肥料, 测定苗期、分蘖期、孕穗期、灌浆期及成熟期水稻各组织器官的硒含量及硒累积量, 探索水稻对硒的吸收、转运、积累和分布的变化规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于江苏省苏州市吴中区横泾街道水稻示范区进行。供试水稻品种为南粳 46 号, 供试土壤为黄泥土, 其基本理化性质见表 1。含硒肥料由苏州硒谷科技有限公司提供, 总硒含量为 5 000 mg/kg。

表 1 试验土壤的理化性质

Table 1 Physiochemical properties of tested field soil

土壤类型	土层(cm)	有机质(g/kg)	总氮(g/kg)	总磷(P ₂ O ₅ , g/kg)	总钾(K ₂ O, g/kg)	总硒(mg/kg)	pH
黄泥土	0~15	22.52 ± 1.73	1.15 ± 0.08	0.80 ± 0.04	10.53 ± 0.56	0.258 ± 0.030	7.1

1.2 试验方法

田间试验采取完全随机设计, 设置 1 个对照

(CK) 2 个含硒肥料处理水平(以单质硒计) 30 kg/hm² (Se30)和 120 kg/hm² (Se120)。小区面积 667 m², 重复

基金项目: 广西创新驱动发展专项(桂科 AA17202026-7, 桂科 AA17202044-1, 桂科 AA17202026-6, 桂科 AA17202027-3, 桂科 AA17202019-2, 桂科 AA17202010, 桂科 AA17202038-1)资助。

* 通讯作者(qgdai2000@126.com; xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介: 管文文(1983—), 女, 江苏连云港人, 博士研究生, 主要从事功能农业研究。E-mail: guanww007@163.com

3 次。水稻于 2015 年 5 月 23 日播种,6 月 11 日移栽。于水稻苗期(2015 年 6 月 17 日),将含硒肥料通过与尿素混合施入稻田。其他栽培管理措施按常规栽培要求实施。

分别于水稻苗期、分蘖期、孕穗期、灌浆期和成熟期采集水稻植株样品。由于不同生长时期水稻植株有不同生物量,所以每个时期采集水稻植株的数量也不同,各时期采集水稻植株的数量分别为:苗期 200 株、分蘖期 516 株、孕穗期 176 株、灌浆期 70 株和成熟期 54 株。采集后的样本,立即用自来水冲洗,然后用去离子水多次洗净水稻表面。样品被分成根、茎、叶、糙米以及颖壳,所有植物样品在 50 ℃ 烘干 24 h,测量干物质量。干燥温度相对较低,以防止硒的挥发损失。所有样品研磨成粉,过 100 目筛,备化学分析。

1.3 硒的测定

取 0.2 g 左右的水稻或土壤样品,置于 50 ml 三角瓶中,用浓硝酸和高氯酸混合酸(4:1, V/V)消解。步骤如下:样品浸泡在混合酸中室温下过夜,在电热板上加热 100 ℃ 1 h,120 ℃ 2 h,180 ℃ 1 h,然后在 210 ℃ 时赶酸,直至溶液无色透明。用 5 ml 的浓盐酸将 Se^{6+} 还原到 Se^{4+} ,3 h 后定容至 25 ml,待测。用原子荧光光度计 AFS-9230(吉天,北京)测定硒含量。仪器条件:电流 80 mA,负高压 270 V,雾化器高 8 mm,载气速度 400 ml/min,屏蔽气 800 ml/min,应用峰面积模式。每批样品用空白和标准物质(GBW 07603-GSV-2 和 GBW07401-GSS-1)控制数据质量。

2 结果与分析

2.1 不同生育期水稻各器官硒含量变化

水稻苗期施用含硒肥料之前,水稻苗硒含量为 $3.129 \text{ mg/kg} \pm 0.102 \text{ mg/kg}$ 。水稻整个生育期不同器

官中硒含量变化如图 1 所示。在根部,分蘖期 CK 和 2 个硒肥处理硒含量相差不大;孕穗期各处理硒含量较分蘖期显著增加,且 Se30 和 Se120 处理硒含量分别为 3.930 mg/kg 和 8.292 mg/kg ,明显高于 CK 的 3.080 mg/kg ;而灌浆期各处理硒含量均显著下降了 14%~20%;成熟期硒含量较灌浆期略有上升,分别为 0.705 mg/kg (CK)、 0.884 mg/kg (Se30)和 1.513 mg/kg (Se120)。

在茎、叶部,CK 处理硒含量从分蘖期的 0.699 mg/kg 和 2.217 mg/kg 一直下降至成熟期的 0.102 mg/kg 和 0.158 mg/kg ,下降趋势非常明显。Se30 处理叶片硒含量从分蘖期的 1.909 mg/kg 下降至成熟期的 0.250 mg/kg ($P < 0.01$),而茎中硒含量从分蘖期的 0.404 mg/kg 升高至 0.885 mg/kg (孕穗期),随后在成熟期又下降至 0.229 mg/kg 。Se120 处理茎中硒含量的变化与叶相似,均是在孕穗期达到高峰,然后明显下降($P < 0.05$)。

2.2 不同生育期水稻各器官硒累积量变化

如图 2 所示,水稻各器官及全株水稻硒累积量的动态变化与硒含量变化相似:根、茎、叶部的硒累积量均在孕穗期达到最高,然后有所降低,而根部的硒累积量明显低于茎、叶部。根、茎、叶部,CK 处理硒累积量明显低于硒肥处理;与 CK 相比,Se30 处理根、叶部的硒累积量变化达到显著水平($P_{根} < 0.05$, $P_{叶} < 0.01$),而 Se 120 处理根、茎、叶部的硒累积量变化极显著($P < 0.01$)。叶片的硒累积量从灌浆期的 0.301 (CK)、 0.637 (Se30)和 $1.037 \mu\text{g/株}$ (Se120)分别降至成熟期 0.171 、 0.246 、 $0.522 \mu\text{g/株}$,减少了 50% 左右。对于全株的硒累积量,分蘖期 3 种处理间差异不明显,孕穗期比分蘖期增加了 2.5 倍~6.5 倍($P < 0.01$),灌浆期降低至孕穗期的 23%~45%,成熟期较灌浆期略有降低。

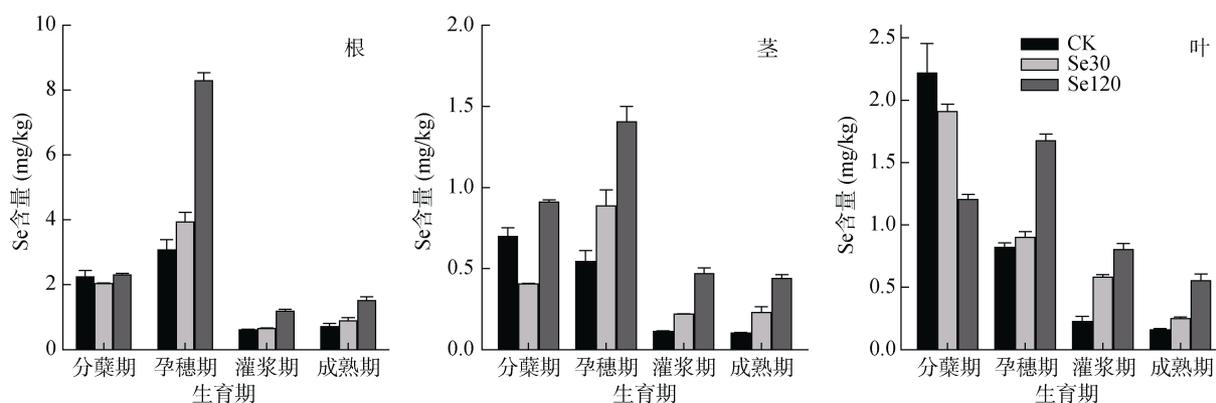


图 1 水稻各部位硒含量在整个生育期的变化

Fig. 1 Changes of selenium concentrations in rice different tissues at different growth stages

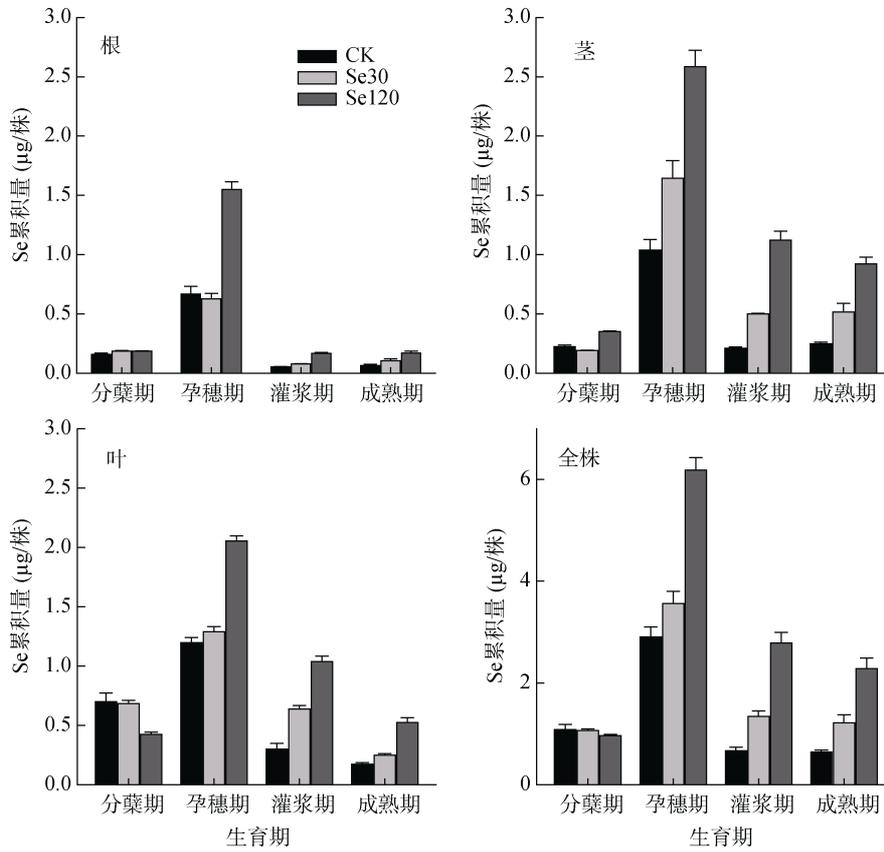


图 2 水稻各部位及全株硒积累量在整个生育期的变化

Fig. 2 Changes of total Se accumulation in rice different tissues at different growth stages

2.3 水稻硒积累分布动态变化及其转运

由图 3 可见,分蘖期叶中硒的积累量占全株百分比最高,3 个处理分别为 65%(CK)、64%(Se30)和 44%(Se120)。从分蘖期到孕穗期,叶中硒积累量占比分别下降了 23%(CK)、28%(Se30)和 11%(Se120),同时,根和茎中硒积累量占比上升。灌浆期,Se30 和

Se120 处理根中硒积累占比明显下降($P<0.05$),而茎硒积累占比下降不明显($P>0.05$)。灌浆期穗部硒积累占比分别为 15%(CK)、10%(Se30)和 17%(Se120),成熟期 Se30 和 Se120 处理穗部硒积累占比上升为 28%和 29%,同时,从灌浆期到成熟期 Se30 和 Se120 处理叶中硒的积累占比下降了 14% 和 15%($P<0.05$)。

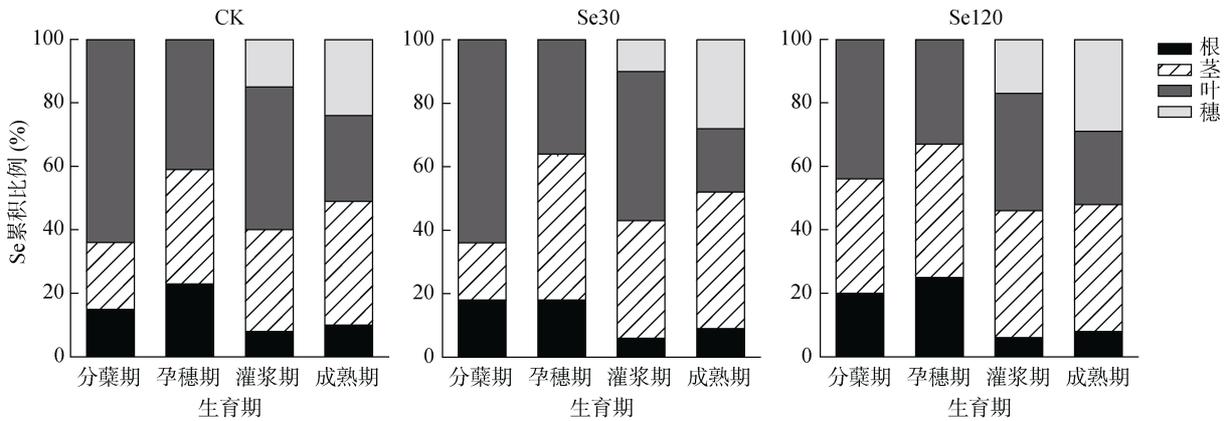


图 3 不同硒处理下水稻硒积累分布动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of selenium accumulation distribution in rice under different Se fertilization rates

2.4 成熟期不同器官硒积累量与硒用量的关系

从图 4 可见,整个水稻植株硒积累量和各器官硒

积累量均随着施硒量的增加而增加,各器官硒积累量差异显著($P<0.05$)。Se30 处理单株水稻积累量比 CK

增加 90%，Se120 处理的单株水稻累积量比 CK 增加 257%。茎中硒的累积量占全株硒累积量的 50% 左右，而颖壳里硒累积量最少，为 7%。成熟期水稻各器官硒的累积量为茎>叶>精米>根>颖壳。水稻硒总累积和根茎叶中硒累积量与含硒肥料施用量有正相关关系。单株水稻硒总累积量与含硒肥料施用量的关系为： $Y=0.0027x+0.7155$ ($r=0.9939$)；根中硒累积量与含硒肥料施用量的关系为： $Y=0.0002x+0.073$ ($r=0.9881$)；茎中硒累积量与含硒肥料施用量的关系为： $Y=0.0011x+0.2956$ ($r=0.9869$)；叶中硒累积量与含硒肥料施用量的关系为： $Y=0.0006x+0.1664$ ($r=0.9995$)。

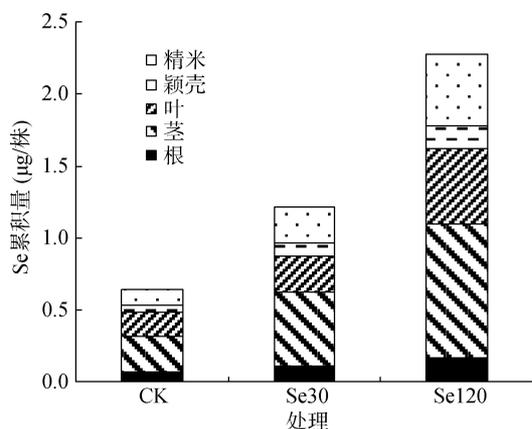


图 4 成熟期单株水稻各部位硒累积分布
Fig. 4 Selenium accumulation in rice different parts at maturity stage

3 讨论

3.1 水稻吸收硒的高峰期

水稻在生殖生长阶段(孕穗期)对营养元素(如氮、磷、钾等)有很高的吸收率。一般来说，植物对矿质元素的需求量与其生物量密切相关。本试验结果表明，在分蘖期，硒在水稻叶中大量累积。曾有研究报告，随着水稻生长进入分蘖期，水稻能迅速加强对硒的累积，而从分蘖期到孕穗期水稻吸收硒的量占整个吸收量的 65%~77%，这也说明此阶段是水稻吸收硒的关键时期^[10]。本研究结果显示，水稻孕穗期是吸收累积硒的高峰期。

3.2 叶与水稻吸收硒的关系

当水稻中硒含量和累积量在孕穗期达到最高值时，相对于分蘖期水稻叶中硒的累积占比却在下降，这表示从分蘖期到孕穗期，水稻硒从叶中向根、茎转移。当叶成熟时，叶中的硒水平降低，可能是由于叶生物量增加导致稀释作用，或者是硒从成熟叶中流向嫩叶和果实中。早期对于黄芪的研究表明，在生殖生

育阶段，叶中的硒转运到黄芪种子从而导致叶中硒下降而种子硒大量上升^[11]，这与本研究结果一致。从灌浆期到成熟期，叶中硒累积量下降了 14%~27%，而水稻穗部硒累积量提高了 9%~20%，显示叶与水稻含硒量有着密切的关系。周鑫斌等人^[12]的研究表示，叶尤其是剑叶中的硒是籽粒硒灌浆的重要来源。本研究发现整个生育期内硒在水稻中转运有一定的规律：分蘖期从根吸收经由茎流向叶部，叶硒量占总累积量的 50%；孕穗期从叶部流向茎；灌浆期茎硒含量比较稳定，根中的硒主要流向叶和穗部；最后在成熟期，穗部的硒累积主要来自于叶片。

3.3 水稻吸收硒的特点

硒不仅可以从植物的一个部位转运到另一个部位，还能从植物中挥发出去，植物可以把无机硒转化为有机硒，比如易挥发的甲基硒成分^[13]。高温、土壤含水量多及土壤有机质含量高都可能导致硒的挥发率增高^[14]。从本试验结果看，整株水稻硒累积量在灌浆期减少是否意味着硒挥发？这是水稻硒损失的一个方面，当然落叶也可能导致水稻硒的损失。

本研究表明，水稻硒累积量与含硒肥料施用量有正相关关系，相关系数达到 0.98 以上，所以苗期施用含硒肥料是一条提高水稻硒含量的有效农艺措施。成熟期水稻硒的累积分布是茎>叶>精米>根>颖壳，而硒含量是根>叶>茎，与先前的研究结果一致^[15]。

4 结论

1) 水稻不同器官中硒的积累与含硒肥料施用量呈正相关关系，所以苗期在土壤中施用含硒肥料是有效提高水稻硒含量的农艺措施。

2) 不同生育期，水稻各个器官中的硒含量及累积量也不同，水稻硒的生物富集高峰期表现在孕穗期，而且叶与水稻穗部吸收累积硒有着密切的关系。成熟期水稻整个植株中硒的分布为茎>叶>精米>根>颖壳。

参考文献：

- [1] Wang Q Y, Zhang J B, Zhao B Z, et al. Influence of long-term fertilization on selenium accumulation in soil and uptake by crops[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(1): 120-129
- [2] 张城铭, 周鑫斌, 高阿祥. 水稻不同生育期对硒吸收累积及铁膜的吸附特性[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3): 693-702
- [3] 周骏, 刘兆云, 孟立丰, 等. 土壤性质对土壤-水稻系统中硒迁移的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 734-741
- [4] 黄太庆, 江泽普, 邢颖, 等. 水稻对外源硒的吸收利用研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(5): 449-455

- [5] 黄青青, 杜威, 王琪, 等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1423–1429
- [6] Chen L C, Yang F M, 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[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(18): 5128–5130
- [7] Dumont E, Vanhaecke F, Cornelis R. Selenium speciation from food source to metabolites: A critical review[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, 385(7): 1304–1323
- [8] 滕世辉, 李晓霞, 曹洪祥, 等. 叶面喷硒对稻米产量和含硒量影响研究初报[J]. 农学学报, 2015, 5(11): 1–3
- [9] 朱文东. 叶面喷施有机硒肥对稻米硒含量及品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(8): 1764–1767
- [10] 周鑫斌, 赖凡, 张城铭, 等. 不同形态硒向水稻籽粒转运途径及品种差异[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1251–1258
- [11] Galeas M L, Zhang L H, Freeman J L, et al. Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related nonaccumulators[J]. The New Phytologist, 2007, 173 (3): 517–525
- [12] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J]. 土壤, 2007, 39(5): 731–736
- [13] Zayed A, Lytle C M, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants[J]. Planta, 1998, 206(2): 284–292
- [14] Terry N, Zayed A M, De Souza M P, et al. Selenium in higher plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2000, 51: 401–432
- [15] Frankenberger W T, Karlson U. Campaigning for bioremediation[J]. Chemtech, 1994, 24 (11): 45–51

Accumulation and Distribution of Selenium in Rice (*Oryza sativa*) at Different Growth Stages

GUAN Wenwen^{1,2}, DAI Qigen^{1*}, ZHANG Hongcheng¹, YIN Xuebin^{2*}

(1 College of Agricultural Science, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2 Key Laboratory of Functional Agriculture, Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: To enhance Se accumulation in rice and meet human nutritional needs of Se by daily diet, an experiment was conducted to study the kinetics of accumulation and distribution of Se in rice in a yellow muddy soil treated with nanoscale Se composite fertilizers. The results showed that the studied rice cultivar had a relatively low ability to accumulate Se from the yellow muddy soil, but the uses of Se fertilizers significantly increased Se accumulation in rice, and Se accumulation in rice tissues positively correlated with the Se fertilization rate. A large variation in Se concentration was observed in different rice tissues at different growth stages. The highest Se-bioconcentration was observed at the booting stage, and Se distribution in rice at the maturity stage was in an order of stem > leaf > rice grain > root > husk. Se flow was figured out during rice growth cycle as follows: Se firstly accumulated in leaves from roots and stems at tillering stage, then flowed from leaves to stem at booting stage, moving up from roots to leaves and panicle by stem at grain-filling stage, and finally stored in rice panicle from leaves at maturity stage. The present study will be helpful for Se biofortification on rice.

Key words: Selenium (Se); Fertilizer; Rice; Accumulation; Distribution