

硫在稻根微域中化学行为及其对水稻吸收重金属的影响机理^①

胡正义^{1,2}, 夏旭^{1,2}, 吴丛杨慧^{1,2}, 樊建凌^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 我国水稻种植面积和产量分别占世界 23% 和 40%。人类活动, 如农药和除草剂施用、采矿、污水灌溉, 已经导致了一些地区水稻土污染。开发能够控制、减少水稻对重金属吸收和经食物链传递的技术与方法, 对确保食品安全具有重要意义。硫(S)有 6 个化合态, 土壤硫化物种类多, 其在土壤中转化相当复杂, 在土壤环境化学研究中具有重要地位。本文收集了国内外有关文献, 评述了S在水稻土中的含量、形态及转化, 重点阐述了S在根际微域化学行为及其与水稻吸收重金属之间的关联, 并提出了未来应开展的主要研究方向。

关键词: 水稻; 硫; 重金属; 根际微域; 水稻土; 化学行为

中图分类号: S154.4; X171.1

我国水稻种植面积和产量分别占世界 23% 和 40%。人类活动, 如农药和除草剂施用、采矿、污水灌溉, 已经导致了一些地区水稻土污染^[1]。矿区和经济发达地区水稻土重金属污染时有发生, 控制、减少水稻对重金属的吸收和食物链传递, 对确保食品安全具有重要意义。影响水稻吸收重金属的因素研究已有很多报道, 如重金属浓度、土壤种类、土壤性质(pH、Eh、CEC、有机质含量与组分、质地、黏粒)、重金属之间复合污染以及重金属与其他养分之间相互作用、农业管理(有机无机肥料施用、水分管理、轮作制度、水稻品种等)措施等^[1-3]。然而, 有关土壤S含量、形态及化学行为对水稻吸收重金属的影响程度与机理研究较少。本文收集了国内外有关文献, 评述了S在水稻土中的含量、形态及转化, 重点阐述了S在根际微域化学行为及其与水稻吸收重金属之间的关联, 并提出了未来应开展的主要研究方向。

1 水稻土中硫素概况

土壤 S 素含量差异大, 硫化物种类繁多, S 价态变化复杂。稻田土壤 S 素状况既与成土母质有关, 也受大气沉降的影响, 还与耕作、施肥、灌溉等农业技术措施密切相关^[4]。我国南方水稻土全 S 平均含量为 262.2 mg/kg, 含量范围 139.0 ~ 560.7 mg/kg^[5]。水稻土中 S 的主要形态为有机 S, 占全 S 的 86% ~ 94%, 主要化合物包括硫酸酯、含硫氨基酸、谷胱苷肽、硫砷类化合物等; 无机硫化物有十几种, 如 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 等

^[6]。S 素与土壤氧化还原体系关系密切。硫化物含量、化学形态及其相互之间的转化影响土壤性质, 进而影响重金属在土壤中的化学形态、活性及其生物有效性。从作用区域来讲, S 素通过影响根表和根际土壤来影响重金属的化学行为与活性。

2 硫素在根表微域中的化学行为与重金属生物有效性之间的关系

2.1 S 素对水稻根表胶膜形成的影响

许多研究已证实稻根胶膜影响水稻吸收As、Cu、Zn、Cd^[7-10]。胶膜是促进还是抑制重金属吸收与膜厚度和重金属形态有关^[7, 9-10]。影响铁胶膜厚度因素已有许多研究, 如水稻土肥力^[5]、水稻品种及泌氧能力^[10-11]、铁锰肥的使用^[12-13]、水分管理等^[14]。然而, 有关S对水稻铁胶膜影响研究则较少。我们研究证实土壤S含量影响水稻根的颜色; 施S显著增加水稻根表胶膜铁锰含量, 其效应与S形态及含量有关; 施S能显著减少水稻As吸收^[15-16]。因此, 作者认为土壤S能影响水稻根表胶膜, 进而影响水稻吸收重金属。土壤S素参与的下述化学过程应该与稻根胶膜形成有关。

(1) 无机S的氧化还原: 水生植物根际氧化还原状态在整个生育期具有明显季节动态^[17-20]。在整个生育期中, 水稻根际不总是相对的氧化状态。最大分蘖前期, 土壤处于强还原状况^[18]; 从最大分蘖期到拔节期, 因茎节的形成, 地上输送氧到根部受阻, 根际土壤Eh也逐渐降低, 加上此时根分泌物的增加, 促使根际厌

①基金项目: 国家自然科学基金项目(20577055, 20777092)和江苏省自然科学基金项目(BK2005170)资助。

作者简介: 胡正义(1963—), 男, 安徽贵池人, 教授, 主要从事土壤环境化学与面源污染控制方面研究。E-mail: zhyhu@gucas.ac.cn

氧微生物的滋生,根际呈还原状态^[19];根际还原状态一直持续到水稻抽穗期浮根的出现,浮根具有吸收表面氧气的作用并能将部分氧气送到下部根系^[21];不同时期水稻乙醇酸氧化供氧系统生化机能差异也是影响根际微域氧化还原强弱的重要因素^[22]。植物诱导的氧化还原界面可存在于根表^[7],根际微域氧化还原变化必将导致S的氧化还原。水稻根际既有S还原微生物,也含S氧化微生物,它们处于动态平衡之中^[23]。根际硫酸盐还原菌比近根土壤高 47%^[24]。 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,其与 Fe^{2+} 立即反应形成 FeS 、 FeS_2 ^[25]。 S^{2-} 能还原 Fe^{3+} 为 Fe^{2+} , S^{2-} 也还原 MnO_2 为 Mn^{2+} ^[26]。元素S是常用S肥之一,元素S在水稻根际土壤的氧化速率显著大于非根际土壤^[27]。微生物、 MnO_2 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 均能氧化元素S为 SO_4^{2-} ^[26], FeS 和 FeS_2 也能被氧化而释放 Fe^{2+} ^[25],可见S的氧化还原将影响Fe、Mn价态及活性。

(2) 根际含S还原性物质的氧化:水稻幼苗根表黏液厚度达 0.2~2 mm,黏液中S、Fe浓度比土壤、根内都高^[28-29]。这些还原性物质是土壤主要电子供体,它们的氧化必将影响根际微环境Eh,进而影响Fe、Mn活性。实验证实Mn对还原性物质比Fe敏感,水稻渍水土壤 30%~70%的 MnO_2 被迅速还原为 Mn^{2+} ^[30]。

(3) SO_4^{2-} 在根表富集: SO_4^{2-} 从土壤向根际迁移,以质流为主,当迁移量大于水稻吸收S量将导致 SO_4^{2-} 在根表富集。我们的试验结果表明水稻根际 SO_4^{2-} 是非根际的 3 倍多^[31]。 SO_4^{2-} 被 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 吸附,减少铁细菌与 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 接触,导致Fe(III)溶解性降低^[32]。铁膜中水铁矿占 63%,针铁矿占 32%,XANES揭示 $\text{Fe}_{6-x}\text{Fe}_x(\text{OH})_{12}[\text{SO}_4]_{x/2}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 是铁膜成分之一^[33]。

上述S的化学过程通过影响Fe/Mn氧化还原、溶解沉淀而控制水稻根胶膜组成元素Fe/Mn化学行为。

2.2 根际含S有机物分泌作用

水稻根表黏液层中含S有机化合物对金属离子具有束缚作用^[28-29]。水稻根系分泌的含S氨基酸与Cd络合提高重金属移动性^[1]。含S半胱氨酸参与重金属,如Hg的甲基化^[34]。这些有机硫化物对重金属作用必将影响其生物有效性。植株中含硫谷胱苷肽对Cd在植物体运输、积累和解毒有非常重要的作用^[35]。水稻S营养可能影响含S谷胱苷肽在根中合成,进而影响根对Cd等重金属离子的吸收。植物S营养能影响根系ATP-硫酸化酶和腺苷酰硫酸磺基转化酶的活性,进而影响植物螯合素(phytochelatatin)的形成,这种物质在调控植物Cd吸收方面具有重要作用^[36]。据报道,S还会与Se竞争同化酶,使硒代氨基酸减少,尤其是硒蛋氨酸减少,从而使水稻植株产生的挥发性Se降低^[37-38]。

2.3 S素在根际集积作用

在稻根富集的 SO_4^{2-} ^[31],可能影响重金属离子(如 SeO_3^{2-} , SeO_4^{2-} , AsO_2^- , HAsO_4^{2-})吸附/解吸、吸收/拮抗,进而影响重金属生物有效性^[31]。许多研究认为,土壤中保持 SeO_3^{2-} 和 SeO_4^{2-} 的机制和保持 SO_4^{2-} 的机制是相同的^[39-41]。土壤中吸附的Se可以被 SO_4^{2-} 交换, SO_4^{2-} 浓度是控制Se淋失量的主要因素^[42-43]。Mikkelsen等^[44]对水稻吸收Se、S的研究证明,低浓度时, Se^{6+} 和 SO_4^{2-} 的吸收有协同作用,但在较高浓度下对Se、S的吸收则表现出相互拮抗,即丰富的 SO_4^{2-} 存在可以减轻过量Se的中毒。

3 硫素在近根土壤中化学行为与重金属化学形态、活性和迁移

3.1 S素氧化还原作用

通过土壤有机S矿化产生的 SO_4^{2-} 以及大气沉降和施肥进入土壤的 SO_4^{2-} ,在厌氧条件下很快被还原为 S^{2-} , S^{2-} 与金属离子形成硫化物^[6]。厌氧土壤中金属硫化物是稳定和难溶的,其对土壤空隙水重金属离子浓度有重要影响^[45]。水稻土淹水 5 周,土壤将有CdS存在^[1]。当 S^{2-} 在好氧条件下氧化时,硫化物中的金属将被释放出来。水稻含Cd量与水稻生育后期的水分状况有关,此时排水烤田可导致水稻Cd吸收量增加几倍^[46-47],主要是土壤中CdS溶解的缘故。

土壤硫化物氧化将导致土壤pH下降。作为肥料施用的元素S在近根土壤中氧化,也能降低土壤pH,低pH有利于重金属化合物的溶解^[6]。随着土壤溶液pH升高,重金属离子在土壤固相上的吸附能和吸量增加。在pH 6以下时,Cd的生物有效性随pH的升高而增加^[48],酸性砂土的pH每增加 0.5 个单位,土壤中Cd的吸附就增加一倍。一般酸度越强,土壤对Se的吸附固定能力越强,且土壤pH越接近中性,对植物的有效性越高^[49]。低pH条件下(pH<5),Se易形成可溶性金属络合物,同时次生铝矿物溶解度增加,降低Se的有效性;高pH时,氢氧化铁可取代吸附位点上的 SeO_3^{2-} ,使 SeO_3^{2-} 进入溶液,导致Se的有效性增加^[50]。土壤对重金属离子吸附必将降低其从近根土壤向根表迁移。水稻土中含有许多铁质浸染斑,成分是铁锰化合物和有机化合物。硫素的氧化还原影响土壤中Fe、Mn的价态及活性,进而影响土壤中对重金属具有很强吸附能力的铁质浸染斑的形成^[5]。因此,S通过影响铁质浸染斑来影响重金属活性及其向根表的迁移。土壤中S素氧化还原将影响重金属(如As、Se)价态变化,进而影响这些重金属元素活性与毒性。

3.2 土壤含S有机化合物作用

土壤中胱氨酸和半胱氨酸参与重金属的甲基化, 甲基化的As、Hg、Cd活性和移动性增强^[34]; 土壤含S 硫化化合物能与Hg、Cd结合, 影响重金属离子在土壤中迁移^[3]; 含S氨基酸与Cd络合显著提高Cd在砂壤土中的移动性^[1]。

4 结论与研究展望

总的来讲, S 素根际化学研究已取得了长足进展^[15], 但是有关 S 素根际转化对植物吸收重金属影响机理研究不多^[16]。主要原因可能是早期开发的用于植物根胶膜研究的浸提剂 DCB (在 0.03 mol/L 柠檬酸钠和 0.125 mol/L 碳酸氢钠溶液中加入 0.6 g 连二亚硫酸钠) 本身含有 S^[51-52], 限制了样品中 S、Fe、Mn 同时测定, 使 DCB 不能用于 S 对水稻根胶膜形成及其生态效应研究。新的浸提剂 ACA (抗坏血酸-柠檬酸钠-乙酸钠浸提剂) 的开发与使用^[53], 有望推进这方面深入研究。S 素是植物的必需营养元素之一, S 在土壤环境化学方面具有重要作用。作者认为缺 S 土壤上 S 肥施用, 不仅能改善水稻 S 营养, 其对水稻重金属和 P 吸收可能具有重要调控作用。S 施用结合其他农艺措施有望开发一种实用的水稻重金属吸收原位阻控技术。针对目前该方面研究进展, 作者认为以下方面有待进一步深入研究: ①方便、高效浸提根际胶膜元素的浸提剂开发与元素测定方法; ②S 对水稻根表微观结构影响及其与水稻吸收重金属之间关联; ③S 对水稻吸收重金属影响过程与机制; ④田间条件下 S 对水稻吸收重金属的影响程度; ⑤以 S 为主要手段的水稻吸收重金属原位阻控技术研究与开发。

参考文献:

- [1] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996
- [2] Cabrera C, Ortega E, Lorenzo ML, Lopez MC. Cadmium contamination of vegetable crops, farmlands, and irrigation waters. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, 154: 55-81
- [3] Alina KP, Pendas H. *Trance Elements in Soils and Plants*. Florida, USA: CRC Press, 2001
- [4] 黄运湘, 张杨珠, 刘鹏, 冯跃华, 周清. 稻作制与有机肥及地下水对水稻土硫素状况的影响-全硫和有效硫含量. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2003, 27(3): 205-208
- [5] 李庆远. *中国水稻土*. 北京: 科学出版社, 1992
- [6] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 2002: 283-307
- [7] Chen Z, Zhu YG, Liu WJ, Meharg AA. Direct evidence showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (*Oryza sativa*) roots. *New Phytologist*, 2005, 165: 91-97
- [8] Ye ZH, Cheung KC, Wong MH. Copper uptake in *Typha latifolia* as affected by iron and manganese plaque on the root surface. *Canadian Journal of Botany*, 2001, 79: 314-320
- [9] Zhang XK, Zhang FS, Mao D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*oryza sativa* L): Zinc uptake. *Plant and Soil*, 1998, 202: 33-39
- [10] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 杨林书. 根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸镉的影响. *生态学报*, 2001, 21(4): 598-602
- [11] 张西科, 尹君, 刘文菊, 张福锁, 毛达如. 根系氧化力不同的水稻品种磷锌营养状况的研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 54-57
- [12] 史锟, 张福锁, 刘学军, 张旭东. 不同时期施铁对水稻根表铁胶膜中铁镉含量及其根系镉含量的影响. *农业环境科学学报*, 2004, 23(1): 6-12
- [13] 曾忠祥, 吕世华, 刘文菊, 张西科, 张福锁. 根表铁、锰胶膜对水稻铁、锰和磷锌营养的影响. *西南农业学报*, 2001, 14(4): 34-38
- [14] 吕世华, 张西科, 张福锁, 刘文菊. 根表铁、锰氧化物胶膜在磷不同浓度下水稻磷吸收的影响. *西南农业大学学报*, 1999, 12: 7-12
- [15] Hu ZY, Silvia H, Cao ZH, Ewald S. Chemical behavior of soil sulfur in the rhizosphere and its ecological significance. *Landbauforschung Volkenrode, Special issue*, 2005, 283: 53-60
- [16] Hu ZY, Zhu YG, Li M, Zhang LG, Cao ZH. Effect of sulfur-induced root surface iron plaque on arsenic uptake into rice (*Oryza sativa*) seedlings. *Environmental Pollution*, 2007, 147: 387-393
- [17] Azzonia R, Giordani G, Bartoli M, Welsh DT, Viaroli P. Iron, sulphur and phosphorus cycling in the rhizosphere sediments of a eutrophic *Ruppia cirrhosa* meadow (Valle Smarlacca, Italy). *Journal of Sea Research*, 2001, 45(1): 15-26
- [18] Kimura M. The physiology of rice plants and their rhizosphere microorganisms // IBSRAM. *Soil Management for Sustainable Rice Production in the Tropics: Monograph No. 2*. Bangkok, Thailand, 1991: 63-81
- [19] Kimura M. Physiology of rice plants and their rhizosphere microorganism. *Proc. First Intern. Symp. On Paddy Soil Fertility*. Thailand, 1988: 157-171
- [20] 木村真人. 水稻根圈研究. *日本土壤肥料科学杂志*, 1984, 55: 197-198
- [21] 宋茂山, 白克智, 崔郁英, 娄成后. 水稻等植物幼苗地上部向根系供氧气的呼吸部位. *植物学报*, 1965, 13(4): 375-381
- [22] 吴九根, 唐建军, 宋松泉. 水稻对缺氧胁迫响应及耐性鉴定.

- 生态学杂志, 1995, 64(2): 13-16
- [23] Wind T, Conrad R. Sulfur compounds, potential turnover of sulfate and thiosulfate, and numbers of sulfate-reducing bacteria in planted and unplanted paddy soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 1995, 18(4): 257-266
- [24] Wind T, Stubner S, Conrad R. Sulfate-reducing bacteria in rice field soil and on rice roots. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, 22(2): 269-276
- [25] Dent D. Acid sulphate soils. A baseline for research and development. Inter. Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands, 1986, 25-26
- [26] Murase J, Kimura M. Anaerobic reoxidation of Mn^{2+} , Fe^{2+} , S^0 and S^2 in submerged paddy soil. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 25: 302-306
- [27] 李敏, 章力干, 胡正义. 元素硫在水稻根际氧化特征及其对水稻吸收铁锰磷硫的影响. *安徽农业大学学报*, 2007, 34(3): 426-431
- [28] 刘芷宇, 施卫明. 利用电子探针对植物根际和根内营养元素微区分布的探讨. *植物生理学报*, 1988, 14(1): 23-28
- [29] Chino M. Application of electronprobe X-ray microanalysis to the localization of chemical elements with and around rice roots grown in soil under submerged condition. *Japan Agric. Res. Quart.*, 1977, 11(3): 129-135
- [30] 丁昌璞, 于天仁. 水稻土中氧化还原过程的研究. IV. 红壤性水稻土中铁、锰的活性. *土壤学报*, 1958, 6: 99-107
- [31] Hu ZY, Haneklaus S, Wang SP, Xu CK, Cao ZH, Schnug E. Comparison of mineralization and distribution of soil sulfur fractions in the rhizosphere of oilseed rape and of rice. *Commun. of Soil Sci. and Plant Anal.*, 2003, 34 (15/16): 2243-2257
- [32] 曲东, 张一平, Schnell S, Conrad R. 水稻土中铁氧化物的厌氧还原及其对微生物过程的影响. *土壤学报*, 2003, 40(6): 858-863
- [33] Hansel CM, Fendorf S. Characterization of Fe plaque and associated metals on the roots of mine-waste impacted aquatic plants. *EST*, 2001, 35: 3863-3868
- [34] Craig PJ. Organometallic compounds in the environment: Principle and reaction. Harlaw, Essex, 1986: 368
- [35] Bogs J, Bourbouloux A, Cagnac O. Functional characterization and expression analysis of a glutathione transporter, BjGT1, from *Brassica juncea*: Evidence for regulation by heavy metal exposure. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26: 1703-1711
- [36] Nussbaum S, Schmutz D, Brunold C. Regulation of assimilatory sulfate reduction by cadmium in *Zea mays* L. *Plant Physiol.*, 1988, 88: 1407-1410
- [37] Aller AJ, Bernal JL, Nozal MJ. Effects of selected trace elements on plant growth. *J. Sci. Food Agric.*, 1990, 51: 447-449
- [38] 马友华, 丁瑞兴, 张继榛, 竺伟民. 植物体内硒和硫的相互作用. *植物生理学通讯*, 2001, 37(2): 161-166
- [39] Singh M. Adsorption and desorption of selenite and selenate selenium on different soils. *Soil Sci.*, 1981, 132(2): 134-141
- [40] Levesque M. Selenium distribution in Canadian soil profiles. *Canadian J. Soil Sci.*, 1974, 54: 63-68
- [41] Rajan SSS. Adsorption of selenite and phosphate on an allophane clay. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1976, 40: 51-54
- [42] Brown MJ. Leaching of added selenium from alkaline soils as influenced by sulfate. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1969, 33: 563-565
- [43] 马友华, 张继榛, 竺伟民, 丁瑞兴. 土壤中硒和硫相互作用的研究. *土壤通报*, 2008, 31(4): 162-165
- [44] Mikkelsen RL, Wan HF. The Effect of selenium on sulfur uptake by barley and rice. *Plant and Soil*, 1990, 121: 151-153
- [45] Otero XL, Sanchez JM, Macias F. Bioaccumulation of heavy metals in Thionic Fluvisols by a marine polychaete: The role of metal sulfides. *JEQ*, 2000, 29: 1133-1141
- [46] 小山雄生, 小川吉雄, 久保田正亚, 真弓洋一. 第 11 部门环境保全. *日本土壤肥料杂志 (部门别进步总特集号)*, 1989, 60: 597-605
- [47] 孙汉中, 赖辉比, 陈付清, 左武龙, 赵家骅, 李莎, 温江清. 红壤类土壤含镉量对水稻生态的影响及其临界含量的探讨 // 夏增禄主编. *土壤环境容量研究*. 北京: 北京气象出版社, 1986: 47-58
- [48] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响. *环境科学学报*, 1999, 19(1): 81-86
- [49] Dhillon KS, Dhillon SK. Adsorption-desorption reactions of selenium in some soils of India. *Geoderma*, 1999, 93: 19-31
- [50] 李永华, 王五一. 硒的土壤环境化学研究进展. *土壤通报*, 2002, 33(3): 230-233
- [51] Taylor GT, Crowder AA. Use of DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plant. *Amer. J. Bot.*, 1983, 70: 1254-1257
- [52] Otte ML, Rozema J, Koster L, Haarsma MS, Broekman RA. Iron plaque on roots of *Aster Tripolium* L. : Interaction with zinc uptake. *New Phytol.*, 1989, 3: 309-317
- [53] 高明霞, 胡正义, 王国栋. 水稻根表胶膜浸提及其元素测定方法比较研究. *环境化学*, 2007, 26(3): 331-334

Chemical Behaviors of Sulfur in the Rhizosphere of Rice and Its Impacts on Heavy Metals Uptake in Rice

HU Zheng-yi^{1,2}, XIA Xu^{1,2}, WU Cong-yang-hui^{1,2}, FAN Jian-ling^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;*

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Paddy cultivation area in China accounts for 23% of world's total paddy fields, as well as 40% of world's total rice yields. Anthropogenic activities, such as pesticide and herbicide application, mining, and irrigation with contaminated water have significantly enhanced heavy metal levels in some paddy soils. Thus, it should be important for the development of practical approaches to reduce heavy metal accumulation in rice. Sulfur is one of important elements in environmental chemistry of soils because there are six oxidation states of sulfur from -2 to +6, a series of sulfur compounds and chemical reactions linked to soil quality. This review was to summarize the data about sulfur in paddy soils with view to its content, fractions, transformations, chemical behaviors of sulfur in the rhizosphere of rice and their link to heavy metal uptake in rice. The further research needs on environmental chemistry of sulfur in soils were also suggested.

Key words: Rice, Sulfur, Heavy metals, Rhizosphere, Paddy soil, Chemical behaviors