

烟株对 Se(VI)和 Se(IV)的吸收及叶片硒亚细胞分布

樊俊^{1,2}, 王瑞¹, 胡红青^{2*}, 向必坤¹, 夏鹏亮¹, 邓建强¹

(1.湖北省烟草公司恩施州公司, 湖北恩施 445000; 2.华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 为了解烟草对不同价态硒的吸收及耐性机制, 以水培烟株为材料, 研究了不同浓度 (0、2、5、10、20 mg/L) Se(VI) 和 Se(IV) 对烟株硒吸收及叶片硒亚细胞分布的影响。结果表明: (1) 水培液中加入 Se(VI) 和 Se(IV) 处理, 低浓度 (<2 mg/L) 对烟株生长有促进效果, 高浓度 (>5 mg/L) 有抑制作用, 且相同硒浓度下表现为 Se(IV) 毒性大于 Se(VI); (2) 施硒处理烟株各部位硒含量增加显著, 叶片以有机硒为主, 无机硒主要以 Se(IV) 形态存储; (3) 烟株叶片和茎秆对 Se(VI) 的亲合力大于 Se(IV), 而根系对 Se(IV) 的亲合力大于 Se(VI); (4) 烟株叶片吸收的硒主要贮存在细胞质和细胞壁中, 其次为线粒体和叶绿体; (5) 同等硒用量下, Se(VI) 处理叶片总硒及细胞壁、细胞质中硒含量大于 Se(IV) 处理。综合分析得出, 水培条件下, 烟株对 Se(VI) 的吸收能力和耐受性均大于 Se(IV), 原因为烟株吸收的 Se(VI) 更易合成含硒氨基酸或蛋白质等积累在细胞质中和被细胞壁固定, 进而缓解了硒的毒性。

关键词: 硒; 烟株; 亚细胞分布; 生长; 吸收

中图分类号: S572.01

文章编号: 1007-5119 (2016) 04-0037-05

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2016.04.007

Effect of Selenate and Selenite on Selenium Uptake and Subcellular Distribution in Leaves of Flue-cured Tobacco

FAN Jun^{1,2}, WANG Rui¹, HU Hongqing^{2*}, XIANG Bikun¹, XIA Pengliang¹, DENG Jianqiang¹

(1. Enshi Prefecture Company of Hubei Provincial Tobacco Corporation, Enshi, Hubei 445000, China; 2. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to understand the absorption and resistance mechanism of Se on tobacco, a hydroponic experiment was conducted to study the absorption and subcellular distribution of Se in tobacco leaves under different concentrations (0, 2, 5, 10, 20 mg/L) of Se(VI) and Se(IV). The results showed that (1) At low concentrations (<2 mg/L) Se improved the growth of tobacco plant, but it showed obvious inhibitory effects to tobacco plant at high concentrations (>5 mg/L) and the negative effects of Se(IV) were more serious than Se(VI) at the same concentration of Se. (2) The content of Se in different parts of tobacco plant increased significantly with the application of different valences of Se. The Se forms in leaves were mainly organic Se, and Se(IV) was the dominating form of inorganic Se. (3) For leaves and stalks the affinity of selenate was higher than selenite and for roots it was the opposite. (4) Se was mainly stored in the cytoplasm, and then the cell wall, with the mitochondria, chloroplasts had less Se. (5) The Se content of leaves, Se in the cell wall and cytoplasm from the Se(VI) treatment were higher than the Se(IV) treatment, suggesting that plants have better absorption ability and tolerance to Se(VI) than Se(IV). The reasons for this was that Se (VI) was easier to be used in synthesizing proteins or amino acids and be fixed in the cell wall such that the toxicity of Se was alleviated.

Keywords: selenium; tobacco; subcellular distribution; growth; absorb

硒是植物生长的有益元素, 有研究发现植物体内约有 10 种含硒的有机化合物^[1], 其主要作用是增强免疫能力和抗逆性, 促进植物生长^[2]。适量的硒

能刺激硒积聚植物的生长, 而强烈抑制硒非积聚植物的生长, 在较高浓度下, 大部分植物出现硒中毒症状, 其生长和生理活动受到抑制^[3-4]。国内外主要

基金项目: 国家烟草专卖局科技项目“‘清江源’生态富硒特色烟叶生产关键技术研究与应用”(110201202014); 湖北省烟草公司科技项目“恩施地区硒资源开发及在烟叶上的应用效果研究”{鄂烟科[2013]18号}

作者简介: 樊俊(1985-), 博士, 农艺师, 主要从事烟草富硒栽培技术研究。E-mail: fanjunwhy@163.com.

*通信作者, E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2015-11-12

修回日期: 2016-04-08

研究植物对不同形态硒的吸收^[5-6],关于植物亚细胞水平分布研究多见于 Cd、Cu、Zn、As 等(非)金属元素^[7-8],而关于不同价态硒在植物亚细胞水平分布以及在植物叶片中的转化的研究较少。

本文以烟草为试验材料,采用水培的方法,研究不同浓度的 Se(VI)和 Se(IV)处理对烟株生长和硒含量的影响,分析了烟株各部位对硒的吸收能力、烟株叶片组织中硒的转化和亚细胞水平硒分布的差异,为了解烟株对不同价态硒的富集以及耐性机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

云烟 87 烟苗,分析纯硒酸钠[Se(VI)]和亚硒酸钠[Se(IV)],不透光塑料盆。

1.2 试验方法

试验在温室大棚进行,选取长势一致的烟苗(四叶一心)用 Hoagland 营养液进行水培试验。应用长方形不透光塑料盆,上面覆盖泡沫板,钻孔,用海绵包裹烟苗茎部固定在孔中,将根系浸泡在营养液内,每盆栽烟苗 3 株。先用 1/4 营养液培养 7 d,再用 1/2 营养液培养 7 d,然后换成完全营养液。每 7 天更换 1 次营养液,每天补充损失水分。每 2 天通 1 次气,每次 1 h。用全营养液培养 14 d 后分别加入硒酸盐和亚硒酸盐,硒浓度分别为 2、5、10、20 mg/L,同时设置对照(硒浓度为 0),共 9 个处理,4 次重复,每处理共 12 株。试验过程中,第 1 次加硒 15 d 后,换营养液,再加入对应浓度的 2 种价态硒,再培养 15 d 后进行烟株采收取样。

1.3 样品采集与分析测定

每个处理选取长势一致的烟株 4 株(每盆 1 株),进行整株收获,用蒸馏水洗净,105 °C 杀青 30 min,70 °C 烘干,研磨过 60 目筛,保存备用。烟株农艺性状采用 YC/T142—1998 方法进行测定,生物量采用称重法测定。每个处理另取长势一致的烟株 4 株(每盆 1 株)选中部叶相同位置的鲜叶片组织,剪碎混合后,应用改进后的差速离心法分离不同的烟叶亚细胞组分^[9],叶片有机硒和无机硒采用超声破碎提取,各组分和形态硒应用 AFS9800 原子荧光光谱法测定^[10]。

1.4 数据处理

本研究运用 Michaelis-Menten 方程研究烟叶硒含量(C)与培养液硒用量(S)的关系^[11],即:

$$C = \frac{C_{\max} \times S}{K_s + S}$$

式中, C_{\max} 为烟株可达到的最大硒含量(mg/kg); K_s 为烟株硒含量达到最大值一半时培养液中有效硒含量(mg/L),表征烟株对培养液中硒吸收能力的大小。

试验数据用 EXCEL2003 和 DPS7.05 统计分析软件进行处理。

2 结果

2.1 Se(VI)和 Se(IV)对烟株生长的影响

由表 1 看出,随着 Se(VI)和 Se(IV)浓度的增加,烟株叶长、叶宽、根长、叶数和株高都呈先增加再降低的趋势,在 2 mg/L 处理达最大值。硒浓度大于 5 mg/L 时,两种价态硒处理烟株农艺性状指标均小于对照,表明烟株生长受到了抑制。施用等量高浓度(> 5 mg/L)硒,烟株农艺性状指标表现为 Se(VI)处理好于 Se(IV),说明高浓度 Se(IV)在水培条件下对烟株的毒害作用大于 Se(VI)。

表 1 Se(VI)和 Se(IV)对水培烟株农艺性状的影响

Table 1 Effects of selenate and selenite on plant agronomical characters of hydroponic tobacco plants

硒浓度/ (mg·L ⁻¹)	Se(VI)处理					Se(IV)处理				
	叶长/cm	叶宽/cm	根长/cm	叶数/片	株高/cm	叶长/cm	叶宽/cm	根长/cm	叶数/片	株高/cm
0	30.67b	10.33a	15.67a	10.33a	18.17b	30.67a	10.33ab	15.67ab	10.33a	18.17ab
2	34.33a	11.17a	17.00a	10.33a	25.00a	30.00a	11.67a	16.33a	9.67a	19.33a
5	21.83d	7.73b	14.17b	8.67b	15.00b	25.67ab	9.83ab	14.33bc	9.33ab	19.00a
10	27.33c	9.67ab	13.17b	9.00ab	18.50b	25.00ab	8.67b	13.83c	8.33b	18.00ab
20	30.67b	10.10a	13.00b	7.67b	17.17b	23.00b	9.83ab	13.00c	6.33c	14.00b

注:同列不同字母表示差异达 5%显著水平,下同。

2.2 Se(VI)和 Se(IV)对烟株硒含量及有效性的影响

由表 2 看出，随着不同价态硒用量的增加，烟株各部位硒含量增加显著。Se(VI)处理，烟株根系硒含量在 10 mg/L 达最大值 较对照增加了 50.7 倍；茎秆和叶片硒含量在 20 mg/L 达最大值，分别较对照增加了 81.6 倍和 132.8 倍；Se(IV)处理，烟株根系、茎秆、叶片硒含量在 20 mg/L 达最大值，分别较对照增加了 68.0、36.3 和 57.0 倍。等量硒浓度，烟株根系硒含量为 Se(IV)大于 Se(VI)处理；茎秆和叶片硒含量为 Se(VI)大于 Se(IV)处理。

由表 3 看出，Se(VI)处理，烟株叶片和茎秆 K_s 分别为 4.44 和 13.43 mg/L，较 Se(IV)处理降低了 70.6%和 25.7%； C_{max} 分别为 303.72 和 281.43 mg/kg，较 Se(IV)处理增加了 67.7%和 91.7%。Se(VI)处理烟株根系 K_s 和 C_{max} 分别为 2.34 和 204.12 mg/kg，是

Se(IV)处理的 2.6 倍和 0.79 倍。上述分析说明水培烟株叶片和茎秆对 Se(VI)的亲和力大于 Se(IV)，而根系对 Se(IV)的亲和力大于 Se(VI)。

2.3 Se(VI)和 Se(IV)对烟株叶片硒价态的影响

从表 4 看出，Se(VI)处理，叶片 Se(IV)和 Se(VI)含量较对照均有显著增加，分别占总硒含量的 7.6%~35.0%和 1.3%~32.6%，无机形态硒以 Se(IV)为主；Se(IV)处理，叶片 Se(IV)含量显著增加，Se(VI)含量增加不明显，分别占总硒含量的 23.8%~51.3%和 0.3%~3.7%，无机形态硒主要以 Se(IV)为主。施用两种价态硒，烟株叶片无机硒主要以 Se(IV)的形态存储，Se(VI)处理虽然叶片无机态 Se(VI)含量增加，但仍以 Se(IV)为主要存储形态。另外，两种价态硒处理，叶片有机硒与无机硒比值大于 1，说明烟株吸收的硒，在叶片中主要以有机硒的形态为主。

表 2 Se(VI)和 Se(IV)对烟株硒含量的影响 mg/kg
Table 2 Effects of selenate and selenite on Se content of tobacco plants

硒浓度/ (mg·L ⁻¹)	Se(VI)处理			Se(IV)处理		
	根系	茎秆	叶片	根系	茎秆	叶片
0	3.59d	2.04e	1.87d	3.59d	2.04d	1.87d
2	91.45c	36.51d	100.43c	181.42c	20.16c	29.69c
5	132.88b	77.04c	152.28b	209.03b	24.62c	51.30b
10	185.67a	118.84b	214.67a	241.59a	56.18b	58.09b
20	170.28a	168.58a	248.29a	247.88a	76.19a	108.39a

表 3 烟株各部位硒含量与水培液硒用量的 Michaelis-Menten 方程拟合参数

Table 3 Fitting parameters of Michaelis-Menten equation on hydroponic Se concentration and Se content of different parts of tobacco

处理	叶片			茎秆			根系		
	K_s (mg·L ⁻¹)	C_{max} (mg·kg ⁻¹)	R^2	K_s (mg·L ⁻¹)	C_{max} (mg·kg ⁻¹)	R^2	K_s (mg·L ⁻¹)	C_{max} (mg·kg ⁻¹)	R^2
Se(VI)	4.44	303.72	0.996	13.46	281.43	0.999	2.34	204.12	0.971
Se(IV)	15.12	181.08	0.945	18.12	146.80	0.971	0.91	258.14	0.996

表 4 Se(VI)和 Se(IV)对烟株叶片硒价态的影响

Table 4 Effects of selenate and selenite on Se valences in leaves

处理	硒浓度/(mg·L ⁻¹)	无机硒含量/(mg·kg ⁻¹)		无机硒总量/(mg·kg ⁻¹)	有机硒含量/(mg·kg ⁻¹)	有机硒/无机硒
		(占总硒比例/%)				
		Se(IV)	Se(VI)	(占总硒比例/%)	(占总硒比例/%)	
Se(VI)	0	0.10e (5.3)	1.46d (78.2)	1.56e (83.5)	0.31d (16.5)	0.197
	2	7.64d (7.6)	32.78a (32.6)	40.42d (40.2)	60.01c (59.8)	1.484
	5	47.83c (31.4)	16.21b (10.6)	64.04c (42.0)	88.24c (58.0)	1.378
	10	68.29b (31.8)	8.44c (3.9)	76.73b (35.7)	137.94b (64.3)	1.798
	20	87.01a (35.0)	3.13d (1.3)	90.14a (36.3)	158.15a (63.7)	1.755
Se(IV)	0	0.10c (5.3)	1.46a (78.2)	1.56c (83.5)	0.31e (16.5)	0.198
	2	15.22b (51.3)	1.09a (3.7)	16.31b (54.9)	13.38d (45.1)	0.820
	5	23.63a (46.1)	0.15a (0.3)	23.78a (46.4)	27.52c (53.6)	1.157
	10	15.44b (26.6)	1.72a (2.9)	17.15b (29.5)	40.93b (70.5)	2.386
	20	25.79a (23.8)	1.76a (1.6)	27.56a (25.4)	80.84a (74.6)	2.933

2.4 Se(VI)和 Se(IV)对烟株叶片亚细胞硒分布的影响

由表 5 看出, Se(VI)处理, 烟株叶片各亚细胞组分硒含量增加显著, 总硒含量在 10 mg/L 达最大值, 较对照增加了 78.7 倍, 效果显著; 叶片硒主要贮存在细胞质中(占总硒含量的 47.6%~63.6%), 其次为细胞壁(占总硒含量的 24.5%~27.0%), 再次为线粒体(占总硒含量的 5.4%~17.9%), 叶绿体硒含量最低(占总硒含量的 3.4%~9.8%)。Se(IV)处理, 烟株叶片细胞壁和细胞质硒含量增加显著, 叶绿体和线粒体硒含量变化不明显; 总硒含量在 10 mg/L 达最大值, 较对照增加了 19.3 倍, 效果显著; 叶片

硒主要贮存在细胞质(占总硒含量的 58.2%~71.7%) 和细胞壁(19.3%~33.8%)中, 线粒体和叶绿体含量较少。比较不同价态硒对烟株叶片亚细胞组分硒含量的影响, 表明两种价态硒均主要贮存在细胞质中, 然后是细胞壁, 再次为线粒体, 叶绿体硒含量最低。另外, 烟株叶片对 Se(VI)的吸收能力和耐受性均大于 Se(IV) (Se(VI)处理叶片总硒含量及细胞壁和细胞质中硒含量大于 Se(IV)), 说明环境中的 Se(VI)更易被烟株叶片吸收, 并合成含硒氨基酸或蛋白质等物质积累在细胞质中和被细胞壁固定而缓解硒的毒性。

表 5 Se(VI)和 Se(IV)对烟株叶片亚细胞硒含量的影响
Table 5 Effects of selenate and selenite on subcellular level of Se content in leaves

处理	硒浓度/(mg·L ⁻¹)	硒含量/(mg·kg ⁻¹) (占总硒比例/%)				总硒含量/(mg·kg ⁻¹)
		细胞壁	叶绿体	线粒体	细胞质	
Se(VI)	0	0.10e (16.3)	0.34c (53.2)	0.04d (6.6)	0.15d (23.9)	0.63
	2	6.74d (27.6)	0.82bc (3.4)	1.31c (5.4)	15.47c (63.6)	24.34
	5	9.79c (27.0)	1.82b (5.0)	3.92b (10.8)	20.73b (57.2)	36.26
	10	12.32b (24.5)	4.94a (9.8)	8.99a (17.9)	24.06a (47.8)	50.31
	20	13.35a (26.6)	4.75a (9.5)	8.18a (16.3)	23.89a (47.6)	50.17
Se(IV)	0	0.10b (16.3)	0.34a (53.2)	0.04b (6.6)	0.15b (23.9)	0.63
	2	1.73ab (19.3)	0.026a (0.3)	0.78a (8.7)	6.43a (71.7)	8.96
	5	2.11ab (20.3)	0.23a (2.2)	0.49ab (4.8)	7.54a (72.7)	10.37
	10	3.69a (28.8)	0.12a (1.0)	0.64a (5.0)	8.36a (65.2)	12.81
	20	3.68a (33.8)	0.59a (5.3)	0.29ab (2.7)	6.34a (58.2)	10.90

3 讨论

本研究中水培条件下施用 Se(VI)和 Se(IV), 低浓度 (< 2 mg/L) 对烟株的生长发育有促进作用; 高浓度 (> 5 mg/L) 则有明显的抑制作用, 与已有报道认为^[3-4], 适量硒浓度促进植物生长, 提高植株生物量, 但过量硒对植株有毒害作用相一致。研究表明相同高浓度 Se(IV)对烟株生长的抑制大于 Se(VI), 可能与植物对 Se(VI)与 Se(IV)的吸收转化途径不同有关^[12-13] 植物对 Se(IV)和 Se(VI)的吸收、转化和分配有很大不同, 两种形态硒的吸收和转运机制相对独立^[3]。另外, 可能与吸收的 Se(VI)较 Se(IV)更易合成含硒蛋白质或被细胞壁固定而增加烟株对硒的耐性有关。

植物体内硒转运的主要形态为 Se(VI), 以 Se(IV)为硒源, 被植物根部吸收后氧化成为 Se(VI)和其他硒化物向地上部转移至叶片, 由于这一转化过程比

根吸收的过程要慢很多, 因此大量的 Se(IV)会积累在根内^[12], 与文中研究结论相一致。本文利用 Michaelis-Menten 方程拟合发现水培烟株叶片和茎秆对 Se(VI)的吸收能力大于 Se(IV)。有研究认为, 植物在土壤盆栽条件下, 根系对 Se(VI)的吸收能力大于 Se(IV)^[14], 与本文中水培条件下烟株根系对 Se(VI)的吸收能力小于 Se(IV)的研究结论不一致, 其原因可能为土壤对 Se(IV)的吸附固定能力显著大于 Se(VI), 而使 Se(IV)生物有效性降低有关。

施用 Se(IV)和 Se(VI), 烟株叶片硒形态以有机硒为主, 无机形态只占较少部分, 说明烟株在高硒环境下, 叶片吸收的硒可以通过与氨基酸或蛋白质等相结合进行解毒。另外, 施用 Se(IV)和 Se(VI), 烟株叶片中的无机硒都以 Se(IV)为主要形态, 可能烟株吸收的 Se(VI)从根部转移到地上部, 在叶片中被还原成 Se(IV), 然后转化为有机硒化物进入其他

组织;而烟株吸收的 Se(IV)及其代谢产物主要积累在根部,少部分氧化为 Se(VI)转移到地上部,然后在叶片中再还原为 Se(IV)参与硒的代谢^[15]。

(非)重金属积累通常会对植物亚细胞结构造成严重破坏^[16],进而导致植物体出现各种生理生化反应^[17],而其在细胞壁的沉淀以及细胞内的区隔化分布是植物内部解毒的两个重要途径^[18]。液泡和细胞质是植物细胞代谢副产品及废物囤积场所,其中含有的多种蛋白质、有机酸、有机碱等物质能与(非)重金属相结合,使其在细胞内被区隔化,而降低(非)重金属的毒性^[19]。本研究施用不同价态的外源硒,烟株叶片硒主要贮存在细胞质中,其次为细胞壁,线粒体和叶绿体硒含量最低,说明烟株叶片可通过区隔化分布和细胞壁沉淀两种途径来降低外界环境中硒对烟株的毒害,增强植株的耐受性。

4 结 论

水培液中加 Se(VI)和 Se(IV)处理,低浓度(< 2 mg/L)对烟株生长有促进作用,高浓度(> 5 mg/L)有明显的抑制效果,相同硒浓度下表现为 Se(IV)毒性大于 Se(VI)。烟株叶片以有机硒为主,无机硒主要以 Se(IV)形态存储。水培烟株叶片和茎秆对 Se(VI)的亲合力大于 Se(IV),而根系对 Se(IV)的亲合力大于 Se(VI)。烟株叶片吸收的硒主要贮存在细胞质和细胞壁中。同等硒用量下,Se(VI)处理叶片总硒含量及细胞壁、细胞质中硒含量均大于 Se(IV)处理,表明烟株对 Se(VI)的吸收能力和耐受性均大于 Se(IV)。另外,烟株对不同价态硒耐受性差异的分子机制是今后进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 黄峙,向军俭,郭宝江. 硒蛋白的分子生物学研究进展[J]. 生物化学与生物物理进展, 2001, 28(5): 642-645.
- [2] 吴军,刘秀芳,徐汉生. 硒在植物生命活动中的作用[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(5): 417-422.
- [3] Yu X Z, Gu J D. Metabolic responses of weeping willows to selenate and selenite[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2007, 14(7): 510-517.
- [4] Simona D G, Silvia L, Fernando M, et al. Brassica juncea

- can improve selenite and selenate abatement in selenium contaminated soils through the aid of its rhizospheric bacterial population[J]. Plant and Soil, 2006, 285: 233-244.
- [5] Emese K, Peter R, Hilleström, et al. Effect of foliar application of selenium on its uptake and speciation in carrot[J]. Food Chemistry, 2009, 115(4): 1357-1363.
- [6] 王其兵,吴金绥. 落花生不同器官对硒元素吸收和累积动态的研究[J]. 植物学报, 1997, 39(2): 164-168.
- [7] Nishizono H, Ichikawa H, Suziki S, et al. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense*[J]. Plant and Soil, 1987, 101: 15-20.
- [8] Küpper H, Zhao F J, McGrath S P. Cellular Compartmentation of Zinc in leave of the hyperaccumulator *thalaspi caerulescens*[J]. Plant Physiology, 1999, 119: 305-311.
- [9] 徐君,贾荣,施国新,等. 镉在水花生叶片中的亚细胞分布及其毒理学[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1070-1076.
- [10] 贺与平,李维香,何素芳,等. 氢化物发生原子荧光光谱法测定螺旋藻中无机硒和有机硒[J]. 光谱实验室, 2009, 26(6): 1404-1408.
- [11] Liu X L, Zhang S Z, Shan X, et al. Combined toxicity of cadmium and arsenate to wheat seedlings and plant uptake and antioxidative enzyme responses to cadmium and arsenate co-contamination[J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2007, 68: 305-313.
- [12] Arvy M P. Selenate and selenite up take and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*)[J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44: 1083-1087.
- [13] 江用彬,季宏兵,李甜甜,等. 环境硒污染的植物修复研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(1): 98-104.
- [14] 王松山,吴雄平,梁东丽,等. 不同价态外源硒在石灰性土壤中的形态转化及其生物有效性[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2499-2505.
- [15] 王晓芳,陈思杨,罗章,等. 植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 539-544.
- [16] 周红卫,施国新,杜开和,等. Cd²⁺污染对水花生生理生化及超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1581-1584.
- [17] 谷巍,施国新,巢建国,等. 汞、镉、铜污染对鱼草细胞膜系统的毒害作用[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1138-1143.
- [18] Brune A, Urbach W, Dietz K J. Compartmentation and transport of zinc in barley primary leaves as basic mechanism involved in zinc tolerance[J]. Plant Cell and Environment, 1994, 17: 153-162.
- [19] 周守标,徐礼生,吴龙华,等. 镉和锌在皖景天细胞内的分布及化学形态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2515-2520.