

蔡永刚,郭志瑶,李梦雅,等. 蚯蚓粪、牛粪对镉铜复合污染土壤中白菜生长和镉铜积累的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):452-455.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.126

蚯蚓粪、牛粪对镉铜复合污染土壤中白菜生长和镉铜积累的影响

蔡永刚¹, 郭志瑶¹, 李梦雅¹, 段智坤¹, 张鸿宇¹, 王小波^{1,2}

(1. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384; 2. 天津市农田生态与环境修复技术工程中心, 天津 300384)

摘要:采用盆栽试验研究蚯蚓粪、牛粪对镉(Cd)、铜(Cu)复合污染土壤中白菜(*Brassica campestris* ssp. *chinensis*)生长及对镉、铜积累的影响。结果表明:高浓度的Cd、Cu污染显著抑制了第1茬白菜叶绿素含量、产量,Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400处理的叶绿素含量分别较Cd1 + Cu50处理下降23.5%~47.1%、72.3%~79.9%,Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400处理白菜产量分别较对照处理下降61.5%、92.6%,各施肥处理间在Cd、Cu浓度相同时没有显著差异;随着Cd、Cu浓度的提高,各施肥处理的第2茬白菜叶绿素含量并没有显著下降,而在高浓度污染处理中白菜产量较第1茬显著提高,在低浓度的Cd、Cu污染下,牛粪的增产效果高于蚯蚓粪,而在高浓度的Cd、Cu污染下,蚯蚓粪增产效果好于牛粪;Cd在白菜体内的积累随着土壤Cd、Cu浓度的升高而增加,在Cd50 + Cu400处理下,不施肥处理植物体内Cd的积累量显著高于施加牛粪(NF)处理,而施加牛粪处理又显著高于施加蚯蚓粪(QY)处理,且第1茬白菜体内Cd的积累量均高于第2茬;Cu在植物体内的累积随着土壤Cd、Cu浓度增加呈现先增加后降低的趋势,在Cd10 + Cu200处理中达到最高值,在Cd50 + Cu400处理中则显著下降;在Cd10 + Cu200处理中,施加蚯蚓粪后Cu的累积量显著低于NF处理,NF处理也显著低于对照处理;随着Cd、Cu浓度的升高,植物体内氮、磷、钾含量降低,其中对氮的影响较小,对磷的影响为在不添加Cd、Cu时,QY、NF处理磷含量显著高于对照处理,在Cd1 + Cu50、Cd10 + Cu200处理组合下,NF处理显著高于对照处理;在Cd50 + Cu400处理组合下,各施肥处理间差异不显著;对钾的影响方面,除Cd50 + Cu400外,其他施肥处理植物体内钾的含量都显著高于对照处理,QY处理、NF处理间在Cd1 + Cu50处理组合下差异显著,其余处理间差异均不显著。2茬种植结果显示:在Cd、Cu复合污染的土壤中,蚯蚓粪对污染的修复效果优于牛粪,牛粪优于对照。

关键词:蚯蚓粪;牛粪;白菜;镉、铜复合污染;污染修复

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0452-04

随着我国经济的快速发展以及工业化、城镇化等国家战略的实施,我国耕地土壤面临非常严峻的重金属污染问题^[1-3],不仅对农产品质量构成威胁,还损害民众健康,影响社会稳定^[4]。国务院发布的《重金属污染综合防治“十二五”规划》和《国务院办公厅关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通知》(国办发[2013]7号)、《国务院关于加强发展节能环保产业的意见》(国发[2013]30号)中,都明确提出了土壤重金属污染修复技术。目前土壤重金属污染修复技术主要有物理工程法、化学法、生物法和农业调控技术等^[5-10],其中利用有机物料对土壤重金属污染进行修复,是一种经济的、切实可行的方法^[11-12]。有机物料不仅能够减轻农作物对重金属的吸收积累,还可以改善土壤结构,提供作物生长所需养分,减少化肥的使用。本研究分析蚯蚓粪和牛粪

对镉(Cd)、铜(Cu)复合污染土壤中白菜(*Brassica campestris* ssp. *chinensis*)生长及重金属在植物体内累积的影响,以期为重金属污染菜田土壤的修复、利用和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2014年5—12月在天津农学院进行,供试土壤采自天津市武清区后幼庄农户大棚,质地为沙壤,基本理化性质:硝态氮含量47 mg/kg,有效磷含量46 mg/kg,有效钾含量276.8 mg/kg,有机质含量18.1 g/kg,全盐含量0.34 g/kg,全镉含量0.51 mg/kg,全铜含量22.8 mg/kg,pH值7.74。供试有机肥的基本性质见表1,有机肥、土壤过1 mm筛备用,供试白菜(*Brassica campestris* ssp. *chinensis*)品种为力丰五月慢。

1.2 试验设计

设计3种浓度梯度的污染物组合,分别为Cd1 + Cu50(1、50分别表示添加的Cd、Cu浓度分别为1、50 mg/kg,以此类推)、Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400;以不添加污染物为对照(CK)处理。Cd、Cu分别以CdCl₂·2.5H₂O、CuSO₄溶于水后喷至土壤混匀,每种污染浓度分别设施用蚯蚓粪(QY)、牛粪(NF)、不施有机肥(CK)3个处理,施用量为4%。每盆装土4kg,每个处理重复3次,共36盆。试验于2014年5月20日

收稿日期:2015-07-27

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划(编号:201410061119);

天津市科技支撑重点计划(编号:13ZCZDNC00500);

作者简介:蔡永刚(1992—),男,云南楚雄人,主要从事土壤生态、土壤污染与修复研究。E-mail:1003885438@qq.com。

通信作者:王小波,硕士,实验师,主要从事农业环境的教研工作。

E-mail:wangxiaobo1111@163.com。

表 1 有机肥的基本性质

材料	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	有机质含量 (%)	全 Cd 含量 (mg/kg)	全 Cu 含量 (mg/kg)
蚯蚓粪	4.7	2.4	7.6	19.9	0.12	36.2
牛粪	14.0	9.9	22.0	33.4	0.26	81.7

混土装盆,次日种植,第 1 茬于 7 月 6 日收获,第 2 茬于 9 月 12 日播种,10 月 27 日收获。

1.3 测定项目与方法

收获时用叶绿素仪测定叶片的叶绿素含量,称鲜质量,杀青烘干后,用硝酸-高氯酸消解,原子吸收法测定 Cd、Cu 含量^[13],测定第 2 茬植物样品的氮、磷、钾含量^[14]。

1.4 数据处理

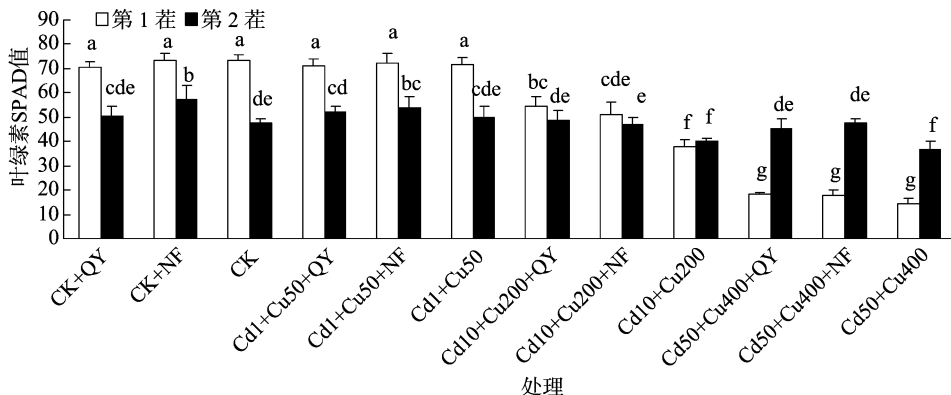
试验数据处理采用 Excel2003、DPS7.05 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理对白菜叶绿素含量的影响

由图 1 可见,在 Cd、Cu 低浓度处理(CK、Cd1 + Cu50)下,第 1 茬白菜叶片的叶绿素 SPAD 值都显著高于第 2 茬,而在

Cd50 + Cu400 处理中第 1 茬的叶绿素 SPAD 值均显著低于第 2 茬;在第 1 茬中 CK、Cd1 + Cu50 处理白菜叶片叶绿素含量没有显著差异,而随着 Cd、Cu 浓度的提高,叶绿素含量显著下降,其中 Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400 处理分别较 Cd1 + Cu50 处理下降了 23.5% ~ 47.1%、72.3% ~ 79.9%;随着 Cd、Cu 浓度的提高,第 2 茬白菜叶绿素含量并没有显著下降;在低浓度 Cd、Cu 处理(CK、Cd1 + Cu50)下,施肥处理对同茬白菜叶片的叶绿素 SPAD 值没有显著影响,但在 Cd10 + Cu200 处理下施肥处理均显著高于 CK 处理;在 Cd50 + Cu400 处理下,第 1 茬之间没有显著差异,而第 2 茬的施肥处理显著高于 CK 处理;NF、QY 处理间,除在不添加 Cd、Cu 时,NF 显著高于 QY 外,其他处理间都没有显著差异。



不同小写字母表示差异显著。下图同

图 1 不同 Cd、Cu 浓度处理对小白菜叶绿素含量的影响

2.2 不同处理对白菜产量的影响

由图 2 可见:在第 1 茬中 CK、Cd1 + Cu50 处理没有显著差异,但 Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400 处理却显著下降,分别较 CK 处理平均下降 61.5%、92.6%;不同的施肥处理在 Cd、Cu 浓度相同时,产量没有显著差异。第 2 茬中 Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400 处理分别较 CK 处理下降 28.4%、54.7%,同种有机肥在不同浓度的污染处理中,QY 处理只在

Cd50 + Cu400 处理下产量显著下降;NF、CK 处理在 Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400 处理组合下都显著下降;在相同的 Cd、Cu 浓度组合下,施肥处理的产量都显著高于 CK。除 CK + NF 外,其余处理第 1 茬在 Cd、Cu 低浓度时(CK、Cd1 + Cu50)产量高于第 2 茬,而在高浓度时(Cd10 + Cu200、Cd50 + Cu400)第 1 茬产量则低于第 2 茬。

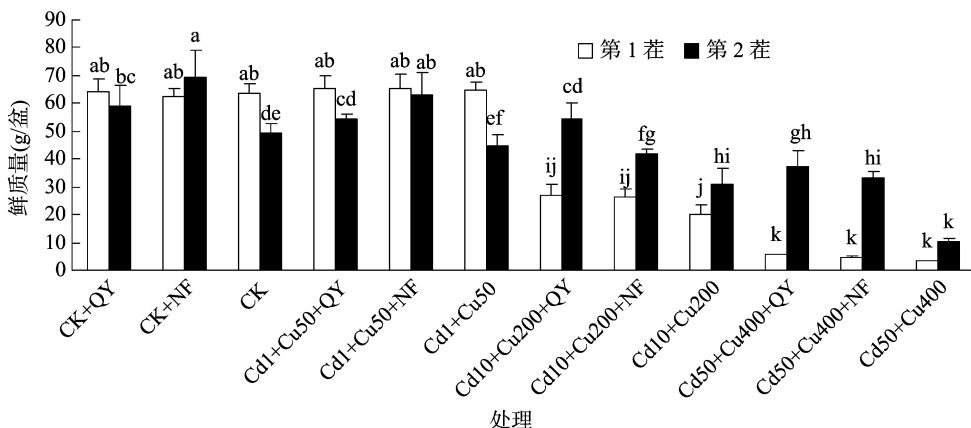


图 2 不同处理对小白菜产量的影响

2.3 不同处理对镉铜在植物体内积累的影响

由表 2 可见,Cd 在白菜体内的积累量随着土壤 Cd、Cu 浓度的升高而增加,在 Cd 浓度达到 50 mg/kg 时,其积累量显著高于其他处理;Cd 浓度为 10 mg/kg 时,其积累量也显著高于 1 mg/kg Cd、CK 处理;Cd1 + Cu50 处理下,第 1、第 2 茬植物体内 Cd 浓度平均值分别为 CK 处理的 7.03、5.15 倍。相同 Cd 浓度下,在低浓度时(CK、Cd1 + Cu50)各施肥处理间的差异不显著;在 Cd10 + Cu200 处理下,不施肥处理植物体内 Cd 的积累量明显高于 QY 处理;在 Cd50 + Cu400 处理下,CK 处理显著高于 NF 处理,而第 1 茬 NF 处理又显著高于 QY,且第 1

茬白菜体内的积累量都高于第 2 茬。

由表 2 可见,Cu 在植物体内的积累量随着土壤 Cd、Cu 浓度升高呈现先增加后降低的趋势,在 Cd10 + Cu200 处理下达到最高值,在 Cd50 + Cu400 处理下则相对显著下降,且加 Cu 处理植物体内的 Cu 积累量均显著高于对照。各对照施肥处理对 Cu 的积累量没有显著影响,而在 Cd1 + Cu50 组合条件下 QY 处理 Cu 的积累量显著低于 NF、CK 处理;在 Cd10 + Cu200 组合条件下,QY 处理 Cu 的积累量显著低于 NF 处理,NF 处理也显著低于 CK 处理。

表 2 不同处理对镉、铜在植物体内积累的影响

处理	Cd 含量(mg/kg)		处理	Cu 含量(mg/kg)	
	第 1 茬	第 2 茬		第 1 茬	第 2 茬
CK + QY	1.00 ± 0.004k	0.94 ± 0.10k	CK + QY	6.00 ± 0.02k	7.06 ± 0.08k
CK + NF	1.95 ± 0.084jk	1.84 ± 0.27jk	CK + NF	6.95 ± 0.11k	8.04 ± 1.00k
CK	1.00 ± 0.007k	1.03 ± 0.06k	CK	5.97 ± 0.30k	5.67 ± 0.56k
Cd1 + Cu50 + QY	8.08 ± 1.003ijk	5.71 ± 0.62ijk	Cd1 + Cu50 + QY	26.54 ± 1.38f	12.21 ± 0.38j
Cd1 + Cu50 + NF	8.84 ± 1.148ij	6.08 ± 1.01ijk	Cd1 + Cu50 + NF	30.97 ± 1.21e	18.53 ± 2.13hi
Cd1 + Cu50	10.85 ± 1.62i	7.84 ± 1.03ijk	Cd1 + Cu50	31.21 ± 3.68e	16.61 ± 0.55i
Cd10 + Cu200 + QY	27.55 ± 1.57h	40.08 ± 7.74fg	Cd10 + Cu200 + QY	29.85 ± 0.76ef	38.51 ± 2.21d
Cd10 + Cu200 + NF	34.25 ± 1.45gh	29.63 ± 3.77h	Cd10 + Cu200 + NF	46.06 ± 2.37c	44.83 ± 5.15c
Cd10 + Cu200	38.18 ± 4.00g	46.08 ± 7.77f	Cd10 + Cu200	59.12 ± 4.63a	54.62 ± 3.68b
Cd50 + Cu400 + QY	87.83 ± 7.99c	76.77 ± 6.99de	Cd50 + Cu400 + QY	11.93 ± 1.35j	20.78 ± 1.06gh
Cd50 + Cu400 + NF	102.48 ± 4.12b	74.78 ± 5.03e	Cd50 + Cu400 + NF	22.72 ± 2.56g	28.78 ± 0.71ef
Cd50 + Cu400	113.90 ± 7.66a	82.45 ± 3.48cd	Cd50 + Cu400	21.07 ± 2.28gh	19.50 ± 1.35ghi

注:表中数据均为干基含量。同列数据不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$);下表同。

2.4 不同处理对白菜氮磷钾含量的影响

由表 3 可见,随着 Cd、Cu 浓度的升高,植物体内氮磷钾含量总体呈现降低趋势,其中对氮的影响较小,只有 Cd10 + Cu200 + NF 处理与 Cd50 + Cu400 + NF、Cd50 + Cu400 处理间的差异达显著水平。对磷的影响表现为在不添加 Cd、Cu 时,

QY、NF 处理磷的含量显著高于 CK;在 Cd1 + Cu50、Cd10 + Cu200 处理组合下,NF 处理显著高于 CK 处理;在 Cd50 + Cu400 处理下,各施肥处理间差异不显著。对钾的影响:各施肥处理下钾含量均高于不施肥处理,QY 和 NF 之间在 Cd1 + Cu50 处理条件下差异显著,其余处理间差异都不显著。

表 3 不同处理对白菜氮磷钾含量的影响

%

处理	氮含量	磷含量	钾含量
CK + QY	4.55 ± 0.08a	0.244 ± 0.012a	2.41 ± 0.09b
CK + NF	4.49 ± 0.03a	0.238 ± 0.006a	2.47 ± 0.08b
CK	4.33 ± 0.04ab	0.203 ± 0.012bc	2.11 ± 0.06c
Cd1 + Cu50 + QY	4.29 ± 0.09ab	0.204 ± 0.010bc	2.41 ± 0.02b
Cd1 + Cu50 + NF	4.35 ± 0.43ab	0.212 ± 0.013b	2.76 ± 0.20a
Cd1 + Cu50	4.30 ± 0.22ab	0.190 ± 0.012c	2.11 ± 0.11cd
Cd10 + Cu200 + QY	4.24 ± 0.21ab	0.212 ± 0.015b	2.37 ± 0.10b
Cd10 + Cu200 + NF	4.51 ± 0.14a	0.244 ± 0.009a	2.38 ± 0.17b
Cd10 + Cu200	4.19 ± 0.13ab	0.191 ± 0.008bc	2.11 ± 0.05cd
Cd50 + Cu400 + QY	4.33 ± 0.13ab	0.209 ± 0.013bc	2.01 ± 0.13cde
Cd50 + Cu400 + NF	4.12 ± 0.14b	0.202 ± 0.012bc	2.05 ± 0.09cde
Cd50 + Cu400	4.11 ± 0.17b	0.196 ± 0.010bc	1.91 ± 0.02de

3 讨论与结论

光合作用是植物生长的重要物质基础和能量来源,叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素,其含量的高低对光合速率有直接影响^[15-17]。叶绿素的合成受光照、温度和营养元素的影响^[18],高浓度的重金属胁迫会抑制叶绿素的合成^[19]。在本试验中,低浓度的 Cd、Cu(CK、Cd1 + Cu50)处理下第 1 茬白菜叶绿素含量显著高于高浓度的处理(Cd10 + Cu200、

Cd50 + Cu400),原因可能是高浓度的 Cd、Cu 进入植物体与叶绿体中蛋白质的一SH 发生结合或取代作用。其中的 Fe²⁺、Mg²⁺ 等破坏了叶绿体结构和功能,使叶绿素分解。而第 2 茬时高低浓度处理间的差异减小,同时 Cd50 + Cu400 处理下第 2 茬叶绿素含量较第 1 茬显著提高,其原因可能为在第 2 茬时,土壤中高浓度的 Cd、Cu 由于受土壤和有机肥的固定,其有效态降低,减轻了对植物叶绿素合成的影响。在低浓度时,第 1 茬的叶绿素含量高于第 2 茬,可能与有机肥在第 1 茬时

较第2茬能提供给植物较多养分有关。

白菜的产量与叶绿素含量的变化有大致相同的趋势和原因。蚯蚓粪和牛粪对植物产量的影响在第1茬时表现均不明显,可能的原因为土壤本身的肥力水平较高,因此在低浓度污染时各施肥处理间差异不显著,而高浓度污染时因加入的Cd、Cu有效态较高,都抑制了作物生长。随着处理时间的延长,在第2茬中因牛粪能比蚯蚓粪提供更多的养分,在低浓度的Cd、Cu处理下,牛粪处理的产量高于蚯蚓粪,而蚯蚓粪因其富含腐殖酸和大量活性物质^[20-21],在高浓度的Cd、Cu处理下能促进作物的生长,使其产量明显高于牛粪处理。

单一污染时植物体内Cd、Cu的累积量随着土壤Cd、Cu浓度的提高而增加^[22-24],复合污染时植物对Cd、Cu的吸收因作物种类、添加浓度不同而有差异^[25-27]。本研究发现,在镉铜复合污染植物体内,Cd的累积量随着土壤Cd、Cu浓度的增大而增加,而Cu的累积量表现为先增加后降低,在Cd、Cu浓度组合为Cd50+Cu400时抑制了白菜对Cu的吸收。在不加入外源Cd、Cu时,蚯蚓粪和牛粪的施用因其所含的Cd、Cu使植物体内Cd、Cu的累积量略有增加,但差异不显著。在有外源Cd、Cu加入时,低浓度处理(Cd1+Cu50)对Cd的累积差异不显著,而蚯蚓粪处理则降低了作物对Cu的累积量;当加入Cd10+Cu200处理组合时,蚯蚓粪降低作物对Cu的累积效果好于牛粪,同时牛粪好于对照,而对Cd的影响则不一致;当加入Cd50+Cu400处理组合时,蚯蚓粪降低作物对Cd的累积效果好于牛粪,同时牛粪好于对照,而此时高浓度的Cd、Cu抑制了作物对Cu的吸收累积。

综上所述,可以得出以下结论:第1茬中高浓度的Cd、Cu污染显著抑制了白菜叶绿素含量和产量,各施肥处理间也没有显著差异;第2茬中各施肥处理显著提高了白菜产量,在低浓度的Cd、Cu污染时牛粪的增产效果高于蚯蚓粪,而在高浓度的Cd、Cu污染时蚯蚓粪增产效果好于牛粪;白菜体内Cd的累积量随着土壤Cd、Cu浓度的增大而增加,而Cu的累积量表现为先增加后降低,Cd50+Cu400处理抑制了白菜对Cu的吸收,可见在有适当浓度外源Cd、Cu加入时,蚯蚓粪降低白菜对Cu吸收累积的效果好于牛粪,牛粪好于对照。

参考文献:

- [1] 骆永明. 中国土壤环境污染态势及预防、控制和修复策略[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(12): 27-31.
- [2] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 309-313.
- [3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
- [4] 中国工程院. 中国环境宏观战略研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [5] 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3716-3721.
- [6] Boisson J, Mench M, Vangronsveld J, et al. Immobilization of trace metals and arsenic by different soil additives; Evaluation by means of chemical extractions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1999, 30(3/4): 365-387.
- [7] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5): 261-265.
- [8] Mulè P, Melis P. Methods for remediation of metal-contaminated soils: preliminary results[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(19/20): 3193-3204.
- [9] 郭晓方, 卫泽斌, 谢方文, 等. 过磷酸钙与石灰混施对污染农田低累积玉米生长和重金属含量的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1374-1380.
- [10] Basta N T, McGowan S L. Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil[J]. Environmental Pollution, 2004, 127(1): 73-82.
- [11] 王意锟, 张焕朝, 郝秀珍, 等. 有机物料在重金属污染农田土壤修复中的应用研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1275-1280.
- [12] 周利强, 尹斌, 吴龙华, 等. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. 土壤, 2013, 45(2): 227-232.
- [13] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 488-490.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-270.
- [15] Marshall J G, Rutledge R G, Blumwald E, et al. Reduction in turgid water volume in jack pine, white spruce and black spruce in response to drought and paclobutrazol[J]. Tree Physiology, 2000, 20(10): 701-707.
- [16] 徐刚, 彭天沁, 高文瑞, 等. 氮肥水平对木薯渣复合基质栽培黄瓜生长及光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 68-72.
- [17] 郎鹏, 袁龙义, 李世平. 不同光照条件对马来眼子菜和菹齿眼子菜光合作用的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(6): 323-325.
- [18] 王平荣, 张帆涛, 高家旭, 等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3): 629-636.
- [19] 乔琳, 盛东风, 邓艳. 重金属铜、锌、铁、铅污染对白菜幼苗鲜重及叶绿素含量的影响[J]. 广东农业科学, 2010(2): 34-37.
- [20] Tomati U, Grappelli A, Galli E. The presence of growth regulators in earthworm-worked wastes[M]//Bonvicini Paglioi A M, Omodeo P. On Earthworms: Proceedings of International Symposium on Earthworms; Selected Symposia and Monographs. Mucchi, Modena, Italy: Unione Zoologica Italiana, 1987: 423-435.
- [21] 唐浩, 朱江, 黄沈发, 等. 蚯蚓在土壤重金属污染及其修复中的应用研究进展[J]. 土壤, 2013, 45(1): 17-25.
- [22] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 654-658.
- [23] 薛长雷. 镉、铜在小白菜内的积累规律及其食用危害性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [24] 张成. 有机物料与外源铜对小白菜和土壤的效应研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2013.
- [25] 茹淑华, 张国印, 贡冬梅, 等. 铜、锌、铅和镉复合污染对番茄生长和重金属累积规律的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(增刊1): 371-375.
- [26] 余国营, 吴燕玉, 王新. 重金属复合污染对大豆生长的影响及其综合评价研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(3): 433-439.
- [27] 祖艳群, 李元, 陈海燕, 等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 289-292.