

北京市城郊土壤镉对小白菜的毒性及其影响因素

高伟明¹, 王学东^{1*}, 陈潇霖¹, 田雨¹, 华璐¹, 高国龙² (1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048; 2. 光大环保(中国)有限公司, 广东深圳 518033)

摘要 [目的] 研究北京城郊土壤中 Cd 对小白菜的毒性, 并探究其影响因素, 为北京城郊土壤中 Cd 污染生态风险评价提供一定的科学依据。[方法] 采集了北京城郊 6 个区县的土壤样品, 外源添加不同浓度镉(Cd)后, 通过盆栽试验研究了不同采样点土壤 Cd 对小白菜的毒性及其影响因素。[结果] 当土壤 Cd 添加浓度在 0~12 mg/kg 范围内变化时, 小白菜均能正常生长, 地上部生物量随土壤 Cd 浓度变化无规律。6 个采样点小白菜地上部 Cd 含量与土壤总 Cd 及有效态 Cd 浓度均呈 0.05 水平显著的线性相关性, 但土壤之间小白菜地上部 Cd 含量与总 Cd 的线性方程的斜率变化倍数(2.24)要大于有效态的斜率变化(1.34), 且所有处理($n=36$)中土壤有效态 Cd 浓度与小白菜地上部 Cd 含量的相关关系 ($R^2=0.86, P<0.001$) 优于土壤总 Cd ($R^2=0.81, P<0.001$)。[结论] 土壤有机质和 CEC 是北京城郊土壤 Cd 毒性的主要影响因素。利用 DTPA 提取的有效态 Cd 能更好地表示不同理化性质土壤中 Cd 的毒性。

关键词 土壤; 镉; 小白菜

中图分类号 S156 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)32-11307-04

Cd Toxicity to Chinese Cabbage and Its Influencing Factors in Suburban Soil of Beijing

GAO Wei-ming, WANG Xue-dong*, CHEN Xiao-lin et al (Key Lab of Resources Environment and GIS, College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract [Objective] Cd toxicity to Chinese cabbage and its influencing factors in suburban soil of Beijing were studied aiming to provide certain scientific basis for ecological risk evaluation of Cd pollution in this area. [Method] Soil samples from six districts of Beijing suburban were collected to investigate Cd toxicity to Chinese cabbage and its influencing factors by pot experiment. [Result] Chinese cabbage could grow normally with the increase of Cd concentration from 0 mg/kg to 12 mg/kg, and their aboveground biomass also didn't change significantly. It was found that there were significant linear relationship between Cd content in aerial part and soil total Cd and available Cd concentration at each sampling point, but the slopes of the former (2.24) was greater than that of the latter (1.34). The correlation between Cd content in aerial part of Chinese cabbage and the available Cd ($R^2=0.86, P<0.001$) appeared more significantly than the concentration of total Cd ($R^2=0.81, P<0.001$) when all treatments ($n=36$) were taken into consideration. [Conclusion] The soil organic matter and CEC were the main factors influencing the Cd toxicity. The available Cd using DTPA could better represent the toxicity of Cd in soil that had different physical and chemical properties.

Key words Soil; Cd; Chinese cabbage

镉(Cd)是自然环境中典型的污染物质之一, 其在环境中的持久性、剧毒性和生物积累能力极强^[1-2]。进入植物体内的 Cd 会通过食物链逐渐在人体内蓄积, 并对健康构成危害。国际癌症研究署已将 Cd 列为第一类致癌物质^[3]。2014 年 4 月中国环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤总的点位超标率为 16.1%, 其中 Cd 超标率最高为 7.0%^[4]。土壤 Cd 污染形势不容乐观^[5]。土壤中 Cd 污染的加剧会增加农产品中 Cd 含量及其食品暴露风险, 全国有不少地区已发展到生产“镉米”的程度^[6]。研究人员对全国 6 个地区(华东、东北、华中、西南、华南和华北)市场上大米样品的采购分析结果表明, 10% 左右的市售大米 Cd 含量超标^[7]。由此可知, 土壤 Cd 污染已给生态环境和人类健康带来极大的风险。所以, 对 Cd 污染土壤的防控和风险评价显得尤为重要。

植物作为土壤最直接的物质和能源输出对象, 其生理代谢和生命活动在很大程度上反映土壤的生态功能^[8], 因此在近年监测和评价土壤重金属污染过程的研究中, 常常优先选择植物作为评价对象。小白菜是典型的叶类蔬菜, 在我国南

北方得到广泛种植, 且大量的植物筛选和物种敏感性研究表明小白菜对镉具有较强的敏感性^[9]。因此, 笔者选用小白菜作为研究对象。

北京城郊是北京重要的农业和蔬菜生产基地。该区域土地资源极度匮乏, 且土地多被过度利用, 一些不合理的耕作措施正加剧土壤重金属污染。郑袁明等^[10]对北京市不同利用类型土地进行调查分析, 发现菜地、稻田和果园的 Cd 含量显著高于背景值, 并且有逐年积累的趋势。因此, 对北京城郊土壤 Cd 污染的风险评价和预防控制迫在眉睫。笔者研究了北京城郊土壤中 Cd 对小白菜的毒性, 并且探究其影响因素, 以期能为北京城郊土壤中 Cd 污染生态风险评价提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤。北京城郊土壤以潮土和褐土为主。经调查分析, 将采样点定在环北京城区的 6 个区县, 所采集土样较全面地代表了北京地区各种土壤类型^[11]。取样时, 采集农田表层(0~20 cm)土壤, 土样经自然风干后, 拣去枯枝、败叶等杂物, 过 2 mm 筛, 备用。土壤理化性质见表 1。

1.1.2 供试植物。供试植物为北京周边广泛种植的蔬菜作物小白菜(*Brassica chinensis*)。供试小白菜种子购自中国农业科学研究院, 商品名为四月慢。

1.2 土壤样品处理 土壤外源添加 6 个 Cd 浓度, 分别为 0、

基金项目 国家自然科学基金(21007042); 北京市自然科学基金(8122014); 北京高等学校青年英才计划(YETP1632)。

作者简介 高伟明(1988-), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤重金属污染和生态毒理学。* 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事土壤重金属污染及其生态风险评价方面的研究。

收稿日期 2014-09-30

1、2、4、8、12 mg/kg(以 Cd 计)。供试药品 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 为分析纯。将 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 制备成溶液后,与土壤混合均匀后平衡 3 个月,以供植物培养。为保证小白菜的正常生长,向每 500 g 平衡后的土壤中添加尿素 0.25 g、磷酸二氢钾 0.10 g、硫酸钾 0.30 g,开展盆栽试验。每个浓度处理设 3 次重复。

表 1 供试土壤的基本理化性质

采样地点	土壤类型	pH	最大持水量//%	有机质//g/kg	CEC//cmol/kg	Mg//mg/kg	Al//mg/kg	Fe//mg/kg
丰台	潮土	7.68	50.5	7.64a	5.35a	9.7ab	53.6b	22.9b
大兴	潮土	7.42	52.4	9.24b	7.40ab	10.9ab	55.8b	25.5b
通州	潮土	7.33	51.9	11.17c	9.78b	12.7a	60.4ab	27.8ab
昌平	褐土	7.49	49.6	9.52b	7.53ab	9.7ab	58.5ab	27.2ab
怀柔	褐土	7.34	48.9	7.81a	7.45ab	8.6b	59.4ab	24.2b
平谷	褐土	7.32	50.7	8.03a	7.28ab	10.4ab	66.9a	31.1a

注:同列不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

1.3 植物毒性试验 小白菜种子经浓度 5% 双氧水消毒后用蒸馏水冲洗干净,置于垫有湿润滤纸的培养皿上,在 28 ℃ 黑暗条件下催芽 30 h,然后选择 2 mm 左右长胚芽的种子均匀播撒在苗床上,并且置于人工气候箱内。7 d 左右,待植株长到 2~3 片真叶时,选择健康茁壮、体型相似的植株移栽至装有不同 Cd 添加处理土样的塑料培养盆(直径 12 cm,深 10 cm),每盆 3 株。将培养盆置于人工气候箱内,设标准试验条件:温度(22 ± 1 ℃),湿度(60 ± 1 %),光照为 1 333 lx(间歇光照,即白天 12 h,夜晚 12 h)。每隔 2 d 称重,并用去离子水浇灌,维持土壤湿度在田间持水量的 50%。在培育期间持续观察植株生长情况,待植株长到 6~7 片真叶时收获。将收获的植物样品用蒸馏水清洗干净,晾干水分后将地上部和地下部分离后称重,2 个部分之和记为植株总质量,然后在 105 ℃ 杀青 60 min 后 70 ℃ 下烘干至恒重,称干重。烘干后样品磨细,过 40 目筛以备植物体内 Cd 含量的测定。

1.4 样品分析测试 土壤 pH 在 5:1 水土比条件下采用酸度计测定(DELTA 320);土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定;土壤阳离子交换量(CEC)采用氯化钡缓冲液法测定;土壤最大持水量采用比重法测定。

土壤总 Cd 以及 Mg、Al、Fe 等用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解,有效态镉用 0.005 mol/L DTPA + 0.01 mol/L CaCl_2 + 0.1 mol/L TEA 浸提^[12]。土壤 Mg、Al、Fe、总 Cd、有效态 Cd 以及植物中 Cd 含量的测定采用 ICP-OES(Varian 720-ES,美国),同时采用国家标准参考物(GBW07403(GSS-3))进行分析质量控制。

1.5 数据处理 数据统计和处理采用 SPSS16.0 统计软件,绘图采用 Origin8.5。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质及 Cd 含量 由表 1 可知,样品的 pH 范围为 7.32~7.68,相互之间差异性不显著($P < 0.05$)。土壤有机质含量的变化范围在 7.64~11.17 g/kg,CEC 的变化范围在 5.35~9.78 cmol/kg,两者含量最多的均为通州土壤,最少的为丰台土壤。由于取样范围相对较小,仅丰台土壤和通州土壤在有机质含量和 CEC 两项理化性质上呈显著性差异($P < 0.05$),其他土壤各性质介于二者之间,差异不明显。

以 6 个 Cd 浓度添加处理后测得土壤的总 Cd 含量的变化范围在 1.50~13.92 mg/kg 之间,有效态 Cd 的变化范围在

0.11~7.41 mg/kg 之间,土壤有效态 Cd 随总 Cd 含量的增加而增加,两者呈极显著正相关关系($R^2 = 0.98, P < 0.05$)(图 1)。土壤有效态 Cd 占总 Cd 的比例随着土壤总 Cd 浓度的升高而升高,由最低 5.2% 增加到 43.9%。

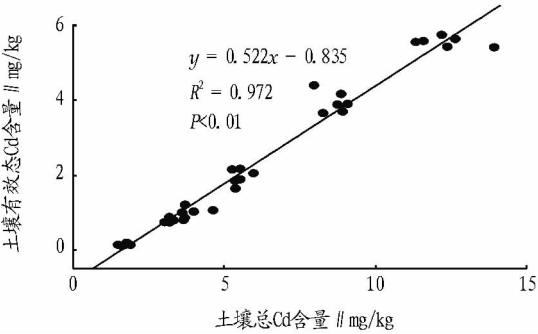


图 1 土壤总 Cd 与土壤有效态 Cd 的关系

2.2 土壤 Cd 添加量与小白菜生物量的关系 在不同浓度梯度 Cd 胁迫下,小白菜植株在外观形态上并无明显差异,更没有表现出明显的毒害症状。由图 2 可知,在植株收获后,小白菜地上部生物量(鲜重)也没有显著的变化。未添加 Cd 处理土样小白菜地上部生物量鲜重平均值为 6.35 g/株,浓度最高时生物量平均值为 5.68 g/株,减少量约为对照组的 10.5%,最高浓度与最低浓度之间生物量差异不显著($P < 0.05$)。各土壤上小白菜干重变化趋势与鲜重一致。王朝

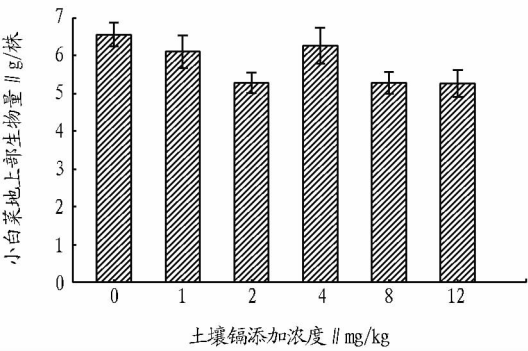
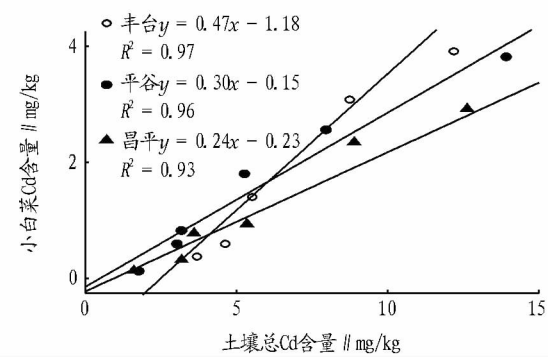


图 2 不同土壤 Cd 添加浓度下小白菜地上部生物量的变化($n = 6$) 晖^[13]对华 中地区 9 种土壤进行植物毒性试验时也发现这一现象。当土壤中 Cd 浓度添加到 10 mg/kg 时,小白菜体内 Cd 含量达到 197 mg/kg,但植株生物量没有明显的变化。孙光闻^[14]研究发现,小白菜生长在中度和重度 Cd 污染的土壤

中,其地上部生长状态、生物量没有发生明显的变化。

2.3 土壤总 Cd 含量与小白菜地上部 Cd 含量的关系 由图 3 可知,随着土壤 Cd 含量的增加,各采样点土壤栽植的小白菜地上部 Cd 含量也显著增加,两者之间呈显著的线性关系。但是,不同采样点土壤的小白菜地上部 Cd 含量的增加幅度随土壤总 Cd 含量的增加表现出很大的差异性,通州土壤上小白菜 Cd 含量增加的幅度最小,线性方程($R^2 = 0.96, P < 0.001$)的斜率最小(0.21),而丰台土壤的小白菜对 Cd 的吸收量增加的幅度最大,拟合方程($R^2 = 0.97, P < 0.001$)斜率最高(0.47),斜率变化达到 2.24 倍。小白菜对 Cd 吸收能力的差异可能与土壤的理化性质有关。研究表明,土壤有机质和 CEC 能够降低重金属的活性,从而影响植物对其吸收能力^[15];有机质能够与重金属直接形成络合物,使其吸附在



土壤表面或存留于土壤溶液中,从而影响重金属的迁移转化过程^[16];而 CEC 的增加能增加土壤对 Cd 的吸附量^[17-18]。研究中通州土壤有机质和 CEC 较其他土壤都高,通州土壤中加入的 Cd 元素活性受有机质和 CEC 的影响而降低,所以小白菜对 Cd 吸收量增加的幅度最小,而丰台则恰好相反。

对 6 个采样点所有处理($n = 36$)小白菜地上部 Cd 含量与土壤总 Cd 含量进行相关性分析($R^2 = 0.81, P < 0.001$),并且运用逐步线性回归方法,在拟合过程中逐步加入土壤有机质和 CEC 的影响,结果表明增加有机质的影响后拟合方程的相关性达到 0.85($P < 0.001$),继续考虑 CEC 的影响,相关性增加到 0.87($P < 0.001$),而加入 Mg、Al、Fe 之后,方程的相关性没有明显的提高。

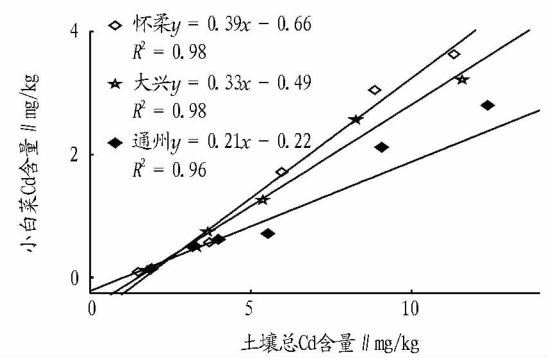
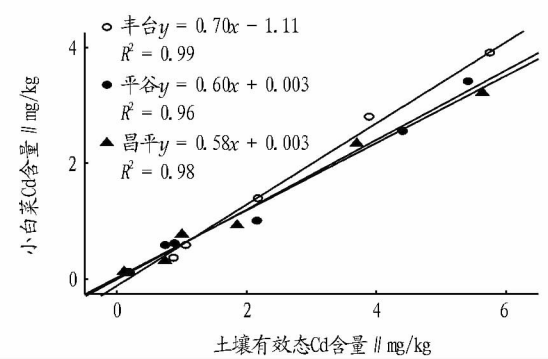


图 3 不同采样点土壤中总 Cd 含量与小白菜地上部 Cd 含量的关系

2.4 土壤有效态 Cd 含量与小白菜地上部 Cd 含量的关系 由图 4 可知,6 个采样点不同 Cd 浓度处理的土壤中有效态 Cd 含量与小白菜地上部 Cd 含量呈现出显著的线性相关关系,且 6 个采样点土壤中二者的相关系数均在 0.98($P < 0.001$)以上。6 个采样点拟合方程的斜率变化范围在 0.52~0.70 之间,变化倍数约 1.34,明显低于总 Cd 的变化范围(2.24)。这是因为利用 DTPA 等作为提取剂提取出土壤有效态 Cd 后,排除了理化性质、土壤环境条件等对 Cd 毒性的干扰。



进一步分析 6 个采样点所有处理土样($n = 36$)中有效态 Cd 含量与小白菜地上部 Cd 含量的关系,二者所呈现的线性相关性($R^2 = 0.86, P < 0.001$)要优于土壤总 Cd 与小白菜 Cd 含量的关系($R^2 = 0.81, P < 0.001$)。袁波等^[19]对菜地土壤 Pb、Cd 有效态与生物有效性的研究表明,重金属有效态含量与小白菜可食部分 Pb、Cd 含量相关性显著,优于重金属总量。这说明化学提取法提取的有效态 Cd 比土壤中总 Cd 更能反映其生物毒性。

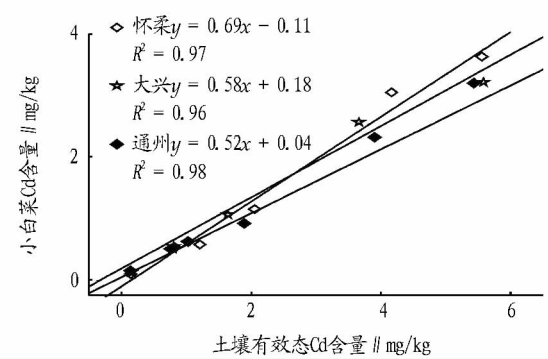


图 4 不同采样点土壤中有效态 Cd 含量与小白菜地上部 Cd 含量的关系

3 讨论

土壤理化性质如 pH、有机质、CEC 以及 Mg、Al、Fe 含量都有可能影响重金属的生物毒性。选取的北京市城郊 6 个取样点土壤中,土壤理化性质如有机质含量和 CEC 等在某几个取样点土壤中差异明显,且这些因素影响小白菜对 Cd

的吸收,例如在有机质含量和 CEC 较高的通州土壤中,Cd 的吸收速率较低,反之在有机质含量和 CEC 较低的丰台土壤中,小白菜对 Cd 的吸收速率较高。李波^[20]用有代表性的我国 17 种土壤样本,研究外源添加 Cu、Ni 对植物的毒害时发现,土壤 pH、有机质含量和 CEC 是控制 Cu、Ni 毒性的关键因

素。华路等^[21]在对镉、锌污染土壤进行改良时发现,向土壤中加入有机质后,土壤中水溶态和交换态镉明显减少,有机结合态 Cd 明显增加。以有效态 Cd 含量表述小白菜所受毒害效应时,6 个采样点土壤上小白菜对 Cd 的吸收速率极为相似,拟合方程斜率的变化范围仅 1.34 倍,远小于以总 Cd 表述的变化范围 2.24 倍。这也进一步说明土壤理化性质影响了 Cd 的植物毒性。研究中,部分土壤在有机质含量和 CEC 上差异显著。这对 Cd 毒性产生明显的影响。由于该研究针对北京城郊土壤展开,取样范围相对较小,造成所取土壤样品在诸如 pH、Fe、Mg 等理化性质上没有表现出明显的差异。

所有采样点土壤上对照小白菜 Cd 含量在 0.09 ~ 0.14 mg/kg 之间,低于食品安全限值(0.2 mg/kg),说明各取样点土壤重金属含量尚属安全范围。随着 Cd 添加浓度的增加,小白菜地上部 Cd 吸收量显著增加。按照 GB2726-2005 规定的叶菜类蔬菜中 Cd 最高允许限量标准,推算各采样点土壤 Cd 含量的阈值,丰台、大兴、通州、昌平、怀柔、平台对应土壤总 Cd 浓度分别为 2.8、2.1、2.0、1.8、1.9、1.2 mg/kg。与我国现行土壤环境质量标准相比,该研究结果偏高,但以往的研究中同样得出高于环境标准的阈值结果,如叶宗嗣^[22]提供的上海市农土壤中 Cd 的临界浓度为 2.0 mg/kg;李志博等^[23]在稻田土壤 Cd 浓度限值的研究中发现,当 pH 从 5.0 变化到 8.0 时,Cd 浓度限值变化范围为 0.42 ~ 2.81 mg/kg。尽管这些研究结果高于我国现行土壤环境质量标准,但接近世界各国土壤 Cd 含量环境质量标准(1 ~ 5 mg/kg)^[24-25],表明我国土壤 Cd 限量标准较严格,今后可以根据不同土壤类型采用不同的标准。

参考文献

- [1] SIMON L. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant[J]. *Journal of Plant Nutrition*,1998,21(2):341-352.
- [2] MORENO-CASELLES J, MORAL R, PEREZ-ESPINOSA A, et al. Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant[J]. *Journal of Plant Nutrition*,2000,23(2):243-250.
- [3] SATARUG S, BAKER J R, URBENJAPOL S, et al. Global perspective on cadmium and toxicity in non-occupationally exposed population[J]. *Toxicology Letters*,2003,137:65-83.

(上接第 11306 页)

外,各交换性阳离子之间均有 0.01 水平显著的相关性。这是由各元素的离子半径、离子水合半径、化合价以及在土壤中存在形态的相似性所致。交换性 Na 与碱化度、钠吸附比、总碱度都有显著的相关性。硫酸盐和氯化物盐是造成惠农燕子墩盐化土壤的主要原因。测定结果表明,0 ~ 60 cm 土层是交换性钠和水溶盐离子的集中分布层,因此该层既是银北盐化土壤研究的重点,又是土壤改良时需要着重考虑的对象。

参考文献

- [1] 沈其荣. 土壤肥科学通论[M]. 北京:高等教育出版社,2001:53-85.
- [2] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京:高等教育出版社,2001:55-243.
- [3] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:158-169.
- [4] 张学军. 宁夏银北地区种稻改良利用盐碱地的技术措施探讨[J]. 盐碱

- [4] 中华人民共和国国土资源部网站. 环保部国土部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-18). http://www.mlr.gov.cn/xwdt/mltsy/zgfw/201404/t20140418_1313092.htm.
- [5] 国家环境保护总局. 中东部地区生态环境现状调查报告[J]. *环境保护*,2003(8):3-8.
- [6] 赵中秋,朱永官,蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. *生态环境*,2005,14(2):282-286.
- [7] 甄燕红,成颜君,潘根兴,等. 中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价[J]. *安全与环境学报*,2008,8(1):119-122.
- [8] CORTET J, GOMOT-DE VAUFLERY A, POINSOT-BALAGUER N, et al. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects[J]. *European Journal of Soil Biology*,1999,35(3):115-134.
- [9] 郭海涛. 不同蔬菜吸收积累镉的差异研究[D]. 北京:首都师范大学,2009.
- [10] 郑袁明,罗金发,陈同斌,等. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征[J]. *地理研究*,2005,24(4):542-548.
- [11] 北京市土壤类型分布统计数据[R]. 全国土壤第二次普查,1978-1979.
- [12] 徐亚平,刘凤枝,蔡彦明,等. 土壤中铅镉有效态提取剂的选择[J]. *监测分析*,2005(4):46-48.
- [13] 王朝晖. 小白菜对土壤镉污染的反应及其与土壤性质关系[D]. 武汉:华中农业大学,2004.
- [14] 孙光闻. 不同浓度 Cd 对小白菜生长及抗氧化系统的影响[J]. *农业环境科学学报*,2004,23(5):877-880.
- [15] 夏月,朱永官. 硝化作用作为生态毒性指标评价土壤重金属污染生态风险[J]. *生态毒理学报*,2007,2(3):273-279.
- [16] 陈怀满. 影响土壤吸附的有关因子[J]. *土壤*,1988,20(30):131-136.
- [17] BROOS K, MERTENS J, SMOLDERS E. Toxicity of heavy metals in soil assessed with various soil microbial and plant growth assays[J]. *A Comparative Study Environment Toxicology Chemistry*,2005,24(3):634-640.
- [18] 李宗利,薛澄泽. 污灌土壤中 Pb、Cd 形态的研究[J]. *农业环境保护*,1994,13(4):152-157.
- [19] 袁波,傅瓦利,蓝家程,等. 菜地土壤铅、镉有效态与生物有效性研究[J]. *水土保持学报*,2011,25(5):130-134.
- [20] 李波. 外源重金属铜、镍的植物毒害及预测模型研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [21] 华路,陈世宝,白玲玉,等. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. *农业环境保护*,1998,17(2):55-59.
- [22] 叶宗嗣. 土壤环境背景值在容量计算和环境质量评价中的应用[J]. *中国环境监测*,1993,9(3):52-53.
- [23] 李志博,骆永明,宋静,等. 基于稻米摄入风险的稻田土壤镉临界值研究[J]. *土壤学报*,2008,45(1):76-81.
- [24] WILLIAMS P N, LEI M, SUN G, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. *Environment Science Technology*,2009,43(3):637-642.
- [25] 童潜明. 土壤和稻米镉含量标准质疑[J]. *国土资源导刊*,2010,11(2):95.

- 地利用,1994(4):11-12.
- [5] 刘刚,李新平,张永宏,等. 银北地区硫磺改良盐碱土初探[J]. *干旱地区农业研究*,2008(4):79-82.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:152-200.
- [7] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996:24-49.
- [8] 姜勇,张玉革,梁文举. 沈阳市郊区蔬菜保护地土壤交换性钙镁含量及钙镁比值的变化[J]. *农村生态环境*,2004,20(3):24-27.
- [9] 姜勇,张玉革,梁文举,等. 耕地土壤交换性钙镁比值的研究[J]. *土壤通报*,2003,34(5):414-417.
- [10] 浙江大学普通化学教研组. 普通化学[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2002:202-249.
- [11] 姜勇,张玉革,梁文举,等. 耕地土壤中交换态钙镁铁锰铜锌相关关系研究[J]. *生态环境*,2003,12(2):160-163.
- [12] 李彬,王志春. 苏打碱化土壤交换性阳离子与相关性分析[J]. *中国农学通报*,2008,24(6):271-275.