果 树 学 报 2018,35(8):947-956
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20180019

梨园常规施药与土壤重金属潜在污染风险评价

乔晓芳[1],刘奇志[1*],刘松忠[2],刘 军[2],刘聪鹤[1]

([1]中国农业大学植物保护学院,北京 100193;[2]北京市林业果树科学研究院,北京 100093)

摘 要:【目的】了解常规施药(每年8~10次)梨园土壤重金属污染程度。【方法】分别测定了北京平谷、大兴、密云、顺义、房山5个郊区46个常规施药梨园0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层的镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、砷(As)、汞(Hg)的含量,采用单因子和内梅罗综合(多因子)污染指数及单污染物与多污染物潜在生态风险指数对梨园土壤重金属潜在污染程度及风险进行分析和评价。【结果】各取样梨园的各土层Cd含量均超北京市土壤背景值(0.12 $mg\cdot kg^{-1}$),大部分地区超出国家土壤环境质量标准(0.6 $mg\cdot kg^{-1}$);Cr与Hg超北京市土壤背景值,但未超出国家土壤环境质量标准;其余检测元素均未超标。Cd在46个梨园的3个土层(除大兴40~60 cm土层外)的单因子污染指数均大于1,已造成了污染,其余检测元素均未造成污染。顺义区梨园40~60 cm土层的内梅罗综合(多因子)污染指数为重度污染水平,多污染物潜在生态风险指数(471.57)为重度风险水平,Cd的潜在生态风险指数(459.41)达到了严重风险水平;密云区梨园0~20 cm土层的多因子污染指数也为重度污染,多污染物潜在生态风险指数(202.5)为中度风险水平,Cd的潜在生态风险指数(184.56)达重度风险水平。大兴区20~40 cm土层、顺义区20~40 cm及0~20 cm土层的Cd潜在生态风险指数依次为157.50、93.76、89.66,处于较重风险水平;其他区梨园的Cd则为中低度风险水平。其余郊区、土层的其他单、多污染物潜在生态风险指数均为低度风险水平。【结论】顺义、密云地区测试梨园土壤已发生Cd污染。建议梨园减少含磷化肥农药使用,种植Cd超富集植物牛膝菊、碎米芥等。

关键词:梨园土壤;重金属污染;风险评价;常规施药

中图分类号:S661.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-9980(2018)08-0947-10

The evaluation of the potential risk of soil heavy metal pollution with conventional pesticide application in pear orchards

QIAO Xiaofang[1], LIU Qizhi[1*], LIU Songzhong[2], LIU Jun[2], LIU Conghe[1]

([1]*Laboratory of Entomology and Nematology (LEN), College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China;* [2]*College of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100093, China*)

Abstract:【Objective】The pollution of heavy metals in soil is becoming a more and more concerned issue in pear orchards. It has huge impact on pear yield and fruit and environment safety. To investigate the contamination of heavy metals in soils of pear orchard with conventional chemical application (8-10 times a year), this study was conducted in order to guide reasonable pesticide application and reduce the risk of heavy metal pollution in pear orchards and thus to ensure orchard sustainability.【Methods】Forty six pear orchards with conventional pesticide application were investigated for heavy metal contamination evaluation. These orchards were located in 5 suburb counties of Beijing, namely Pinggu, Daxing, Miyun, Shunyi and Fangshan. Fifteen trees in each pear orchard were randomly selected. Three soil samples at the depths of 0-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm were taken 0.5-0.6 m away from the trunk of each tree with a 4 cm diameter earth drill. The soil samples of each layer from 5 trees (15 sampling points) were pooled and about 1 kg of the pooled sample was put into a plastic bag as one replication.

收稿日期:2018-01-24 接受日期:2018-05-18

基金项目:国家梨产业技术体系专项(CARS-28-18)

作者简介:乔晓芳,女,硕士,研究方向为农业昆虫与害虫防治。Tel:15600915060,E-mail:qiao_xiaofang@126.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:18519264197,E-mail:lqzzyx163@163.com

Three replications were designed in this study. All the samples were collected and carried to LEN laboratory at the same day. In the laboratory, the collected soil samples were put into a ventilated and cool place for air-drying. The totally dried soil samples were crushed in a mortar and sieved with 80 Nylon meshes. The atomic absorption spectrophotometer (single pass) in Vegetable Research Center of Beijing Agriculture and Forestry Academy was used to measure the contents of cadmium (Cd), chromium (Cr), lead (Pb), srsenic (As) and mercury (Hg) in the soil samples. Single factor, Nemerow multi-factor pollution index, single pollutant and multiple pollutant potential ecological risk index were used for analysis and evaluation of the potential pollution degree and the risk of heavy metals in pear orchard soils.【Results】The contents of Cd in the 3 layers of soil in all pear orchards were higher than the soil background value of Beijing (0.12 $mg \cdot kg^{-1}$), most of which were beyond the quality standard of national soil environmental (0.6 $mg \cdot kg^{-1}$), and thus the soils had been polluted. Among them, the highest content of Cd was found in the soil layer of 40-60 cm in pear orchards in Shunyi district (6.88 $mg \cdot kg^{-1}$). The contents of Cr and Hg were beyond the background values of Beijing soil, but no higher than the national standards of soil environmental quality. It showed that the accumulation of Cr and Hg occurred in Beijing. The other elements were in the normal levels. The single factor pollution indexes of Cd in the three soil layers of 46 pear orchards (except 40-60 cm soil layer in Daxing district) were higher than one, which could be regarded as being polluted. Others were not. The Nemerow multi-factor pollution indexes (multifactorial) in the five suburb counties were Shunyi> Miyun> Daxing> Pinggu> Fangshan. The 40-60 cm soil layer in the pear orchards in Shunyi district and 0-20 cm soil layer in pear orchards of Miyun district were both severely polluted. The potential ecological risk index of multiple pollutant RI (471.57) was at a serious level, and the potential ecological risk index of Cd reached the severe level (459.41). The Nemerow multi-factor pollution index of the 0-20 cm soil layer in pear orchards in Miyun district showed that the soil was severely polluted too. The potential ecological risk index of multiple pollutant RI was in the medium level (202.5). In addition, the potential ecological risk index of Cd reached the serious level (184.56). Other heavy metal elements were all in the low risk level. The potential ecological risk indexes of Cd in 20-40 cm soil layer of Daxing and 20-40 cm and 0-20 cm soil layer in Shunyi were 157.50, 93.76 and 89.66, respectively. All of them were at the severe level. Others were at the low level. The potential ecological risks of single and multiple pollutants in the remaining suburb counties and in the other soil layers were all in the low level.【Conclusion】The results indicated that some pear orchards in Shunyi and Miyun regions might have Cd pollution, possibly due to the orchards located in a high Cd content area. The use of phosphorus fertilizers and pesticides should be reduced, and Cd hyperaccumulation plants such as *Galinsoga parviflora*, *Cardamine hirsuta* Linn. are recommended to be planted in the pear orchards.

Key words: Pear orchards; Heavy metals pollution in soil; Evaluation of risk; Conventional pesticide application

在农业生态系统中重金属污染是农田土壤的重要组成部分，土壤就像一个巨大的“吸纳库”，吸纳了环境中大约90%来自土壤、大气、水源等能引起污染的物质[1]。大量金属氧化物、有机质和矿物质等物质在土壤固相中能引起污染的物质，如重金属等吸收进来，在土壤中产生积累，当超过其最大累积限度时，就会造成土壤污染[2]。重金属元素在土壤中的迁移使得动植物的正常生长发育受到危害，并通过食物链进入人体，造成重金属中毒等慢性疾病的发生，从而影响生态系统的整体结构与功能[3]。

长期不合理施用农药，可导致土壤重金属污染，西力生消毒种子，随之进入土壤中的Hg达6~9 $g \cdot hm^{-2}$；在美国的密执安州，因其长期施用含砷的农药，土壤中的砷元素产生大量的积累，达到了112

$mg\cdot kg^{-1}$[4]。在果树和温室作物常用的杀真菌药剂，如代森锰锌、波尔多液中通常含有Cu和Zn，大量施用则会导致土壤Cu、Zn大量积累导致污染[5-6]。

果农为了防虫治病，滥用农药现象比较严重。一般病虫害管理较合理的梨园，梨树从开花到果实成熟需喷10次药左右，有些果园甚至每年喷13次或更多。据2017年中国统计年鉴统计，我国梨的栽培面积为112.4万hm^2 [7]，估算每年全国梨园用药2~2.5万t。

针对梨园树上病虫害防治，目前主要集中在综合治理研究[8-14]、天敌利用研究[15-16]等方面；针对梨园树下土壤中的研究主要集中在土壤线虫群落结构[17-18]、土壤养分状况[19-20]等方面，而对梨园土壤重金属污染程度及潜在风险鲜有报道，但果园土壤重金属元素是产地环境检测的一项重要指标，在美国果园的土壤管理中，重金属元素的监测是其重要的管理部分之一[21]。鉴于此，笔者以北京常规年施药8~10次梨园为例，采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价梨园土壤的重金属污染程度，应用潜在生态风险指数法评价重金属潜在生态风险，以期为指导梨园合理用药、降低梨园土壤重金属污染风险、保障梨园土壤健康的可持续性提供参考。

1　材料和方法

1.1　土样采集

试验土样采于2014年6月，分别采自北京5个郊区46个常规施药（每年8~10次）的梨园[每个梨园约10~13.3 hm^2，树龄13~15 a（年）]。分别在每个梨园各随机选取15株树，每株树下取3个样点，在离树干0.5~0.6 m周围，用直径为4 cm的土钻分别取0~20、20~40、40~60 cm土层的土壤样品，将每个土层的每15个取样点的土充分混合均匀，从中取大约1 kg的土装入到自封袋中，作为一个重复，试验共3个重复。

在实验室中，将采集到的土样置于通风并且阴凉的地方进行自然风干处理，清除土壤样品中的落叶、枯枝等及可见的有机体，并将其碾碎于研钵中，用80目（0.178 mm）的尼龙筛处理之后，保存待用。

1.2　重金属检测方法

采用北京市农林科学院蔬菜研究中心的石墨炉原子吸收分光光度计（单道），型号：PE-AA600，测量处理后的样品的各重金属含量，包括全量镉（Cd）、铬（Cr）、铅（Pb）、砷（As）、汞（Hg）。

1.3　污染评价法

根据目前广泛使用的土壤重金属评价方法[22]，对研究区域土壤重金属污染状况采用单因子污染指数法和内梅罗综合（多因子）污染指数法[23]。

1.3.1　*单因子污染指数法*　单因子污染指数法是用来评价一个体系中单个污染因子（如重金属元素），对该体系造成的污染程度[24]。单因子污染指数的计算公式为：$P^i{}_r=C_i/S_i$。

式中：$P^i{}_r$为土壤重金属元素i的单因子污染指数；C_i土壤中重金属i的实测值（$mg\cdot kg^{-1}$）；S_i为重金属i的评价标准值（$mg\cdot kg^{-1}$），S_i选用北京市土壤重金属含量背景值，分别为：镉Cd：0.12 $mg\cdot kg^{-1}$；铬Cr：29.80 $mg\cdot kg^{-1}$；铅Pb：24.60 $mg\cdot kg^{-1}$；砷As：7.09 $mg\cdot kg^{-1}$；汞Hg：0.08 $mg\cdot kg^{-1}$[25-27]。

评价指标：$P^i{}_r\leqslant1$表示未造成污染，$P^i{}_r>1$表示已造成污染，$P^i{}_r$越大污染越严重[25-27]。

1.3.2　*内梅罗综合污染指数法*　内梅罗综合污染指数能较全面评价土壤重金属的污染程度，突出高浓度重金属对土壤的污染作用[23]，在工业土壤[24]、城市功能区土壤[25]、湘江流域[26]、污灌农田[28]等土壤重金属污染程度评价中得以广泛应用。计算公式为：

$$P_N=\sqrt{(P_{均}{}^2+P_{i\max}{}^2)/2}$$

式中：$P_{均}$为样本中所有重金属元素的单因子污染指数的均值；P_{imax}指的是样本土壤中的所有重金属元素单因子污染指数最大值。评价标准见表1。

表1　土壤重金属污染划分等级标准[17]

Table 1　Grading standard of soil heavy metal pollution[17]

等级 Grade	综合污染指数 Integrated pollution index	污染评价 Pollution assessment
Ⅰ	$P_N\leqslant0.7$	安全级 Security level
Ⅱ	$0.7<P_N\leqslant1.0$	警戒级 Alert level
Ⅲ	$1.0<P_N\leqslant2.0$	轻度污染级 Slightly polluted level
Ⅳ	$2.0<P_N\leqslant3.0$	中度污染级 Moderately polluted level
Ⅴ	$P_N>3$	重度污染级 Severely polluted level

1.4　生态风险评价法

Hakanson指数是一种多方位评价生态风险的指数，能够从重金属各种效应、含量等各个方面对其进行评价[29]，综合评价重金属对环境造成的生态风险，使评价更侧重于毒理方面，能为环境改善和人们健康生活提供科学依据。

1.4.1 单污染物潜在生态风险指数 其计算公式为：

$E^i_r = P^i_r \times T^i_r$

式中：E^i_r为i元素的潜在生态风险指数；P^i_r为i元素的单因子污染指数；T^i_r为单个污染物的毒性响应参数[27]。其评价标准见表2。

表2 单污染物潜在生态风险指数评价标准[29]

Table 2 Evaluation criteria of single factor potential ecological risk index[29]

潜在生态风险参数E^i_r范围 Range of potential ecological risk index	单因子污染物生态风险程度 The degree of single factor pollutant ecological risk
E^i_r≤40	低度 Low
40<E^i_r≤80	中度 Medium
80<E^i_r≤160	较重 Heavy
160<E^i_r≤320	重度 Serious
E^i_r>320	严重 Severe

1.4.2 多污染物潜在生态风险指数 其计算公式为：

$$RI=\sum_{i=1}^{n} E^i_r=\sum_{i=1}^{n}(T^i_r \times P^i_r)$$

式中：RI为某个区域的潜在生态风险指数（区域多因子生态风险指数），E^i_r为i元素潜在生态风险指数，T^i_r为i元素的毒性响应参数，P^i_r为i元素的单因子污染指数；评价标准见表3。

表3 潜在生态风险指数RI评价标准[29]

Table 3 Evaluation criteria of potential ecological risk index RI[29]

潜在生态风险指数RI范围 Range of potential ecological risk index RI	总的潜在生态风险指数 Index of potential ecological risk
RI≤150	低度 Low
150<RI≤300	中度 Medium
300<RI≤600	重度 Serious
RI>600	严重 Severe

1.5 统计分析

本研究采用Excel 2016软件和SPSS 20.0软件进行统计分析，不同郊区间土壤重金属的相互比较采用Duncan单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 常规施药梨园土壤重金属含量分析

北京5个郊区46个常规施药（每年8~10次）梨园的各土层重金属镉（Cd）元素含量均有不同程度的超标（表4），超出了北京市土壤背景值（0.12 mg·kg^{-1}），大部分地区还超过了国家的重金属含量标准（0.6

表4 北京市常规施药梨园土壤重金属含量（*n*=46）

Table 4 Soil heavy metal contents in pear orchard with normal use pesticides in Beijing（*n*=46） ω/(mg·kg^{-1})

地区 Area	土层 Soil layer/cm	pH	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	砷 As	汞 Hg
平谷 Pinggu	0~20	6.37	0.12~1.21	20.03~38.80	0.00~7.84	2.07~6.10	0.01~0.07
	20~40	6.33	0.00~0.83	13.99~43.01	0.00~5.45	2.80~6.28	0.00~0.08
	40~60	6.50	0.02~0.31	8.68~15.32	0.05~0.30	2.26~6.11	0.00~0.04
密云 Miyun	0~20	6.56	0.15~4.85	2.51~43.37	0.00~6.34	1.60~5.43	0.01~0.04
	20~40	6.57	0.05~0.84	14.16~32.90	0.00~7.54	0.19~6.22	0.00~0.07
	40~60	6.61	0.03~1.04	9.26~22.92	0.03~1.01	0.16~5.49	0.00~0.04
顺义 Shunyi	0~20	7.07	0.15~0.76	18.51~38.74	0.99~16.83	2.01~5.33	0.02~0.07
	20~40	7.22	0.08~1.57	20.41~36.59	0.68~11.33	1.18~4.79	0.01~0.11
	40~60	7.47	0.00~6.88	1.84~10.42	0.03~5.84	1.47~4.83	0.01~0.02
大兴 Daxing	0~20	7.93	0.00~0.78	19.88~35.58	0.78~2.17	1.16~4.84	0.01~0.03
	20~40	8.05	0.00~1.72	20.54~40.33	0.73~4.75	1.40~4.70	0.01~0.04
	40~60	8.14	0.00~0.77	11.78~18.15	0.00~2.14	1.77~5.86	0.00~0.03
房山 Fangshan	0~20	7.98	0.00~0.31	11.04~27.00	0.00~2.09	1.62~5.44	0.01~0.20
	20~40	8.25	0.09~1.15	11.21~36.93	0.43~4.56	1.48~5.55	0.00~0.12
	40~60	8.37	0.00~0.18	11.17~28.89	0.00~2.66	0.08~5.61	0.00~0.03
国家标准[a] National Standard[a]		<6.5	0.30	150.00	250.00	40.00	0.30
		6.5~7.5	0.30	200.00	300.00	30.00	0.50
		>7.5	0.60	250.00	350.00	25.00	1.00
北京市土壤重金属含量背景值[27] Background concentrations of soil heavy metal in Beijing[27]			0.12	29.80	24.60	7.09	0.08
检出限 Detection limit			0.001	0.001	0.005	0.005	0.001

注：a.土壤环境质量标准（GB15618—1995）。

Note：a. The standard of soil environmental quality (GB15618—1995).

mg·kg^{-1})，已经造成了污染，其中北京顺义区梨园40~60 cm土层中镉的含量最高(6.88 mg·kg^{-1})，超出国家标准11.33倍；铬(Cr)与汞(Hg)元素含量超出北京市土壤背景值，但未超出国家土壤环境质量标准，说明已在北京地区土壤中已有一定程度的蓄积，出现了富集现象；其余两种检测元素的北京市土壤背景值和国家土壤环境质量标准均未超标。

2.2　梨园土壤重金属污染评价

2.2.1　单因子污染指数评价　单因子污染指数显示，除镉(Cd)元素外，其他4种元素在北京市5个郊区常规施药梨园3个土层的污染指数均小于1，说明这4种重金属元素尚未污染相应地区的梨园土壤。镉(Cd)元素的污染指数均大于1(表5)，表明镉(Cd)元素已经对北京郊区梨园造成了污染；其中顺义区常规施药梨园40~60 cm土层的单因子污染指数最高，达到了15.31，污染比较严重。

表5　北京郊区常规施药梨园土壤重金属单因子污染指数
Table 5 The single factor pollution index of heavy metal in soils of pear orchards with conventional use pesticides in suburbs of Beijing

地区 Area	土层 Soil layer/cm	单因子污染指数 Single factor pollution index				
		镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	砷 As	汞 Hg
平谷 Pinggu	0~20	2.50	0.83	0.14	0.55	0.38
	20~40	2.26	0.86	0.11	0.64	0.37
	40~60	1.32	0.38	0.01	0.61	0.24
密云 Miyun	0~20	6.15	0.80	0.10	0.43	0.29
	20~40	1.68	0.78	0.13	0.38	0.25
	40~60	1.63	0.38	0.01	0.38	0.25
顺义 Shunyi	0~20	2.99	0.93	0.26	0.44	0.46
	20~40	3.13	0.94	0.17	0.44	0.54
	40~60	15.31	0.27	0.08	0.39	0.18
大兴 Daxing	0~20	2.58	1.03	0.05	0.28	0.25
	20~40	5.25	1.02	0.08	0.35	0.25
	40~60	2.25	0.48	0.02	0.27	0.13
房山 Fangshan	0~20	1.17	0.69	0.05	0.50	0.51
	20~40	2.05	0.72	0.09	0.57	0.34
	40~60	1.01	0.54	0.04	0.43	0.26

2.2.2　综合污染指数评价　运用内梅罗综合污染指数法对5种重金属元素评价其综合效应，并参照表1综合污染指数分级标准，5个郊区综合污染指数大小排列依次为：顺义>密云>大兴>平谷>房山；顺义区梨园40~60 cm土层、密云区梨园0~20 cm土层的综合污染指数达到11.1、4.50，均为重度污染水平，对比单因子污染指数大致可推断主要污染原因是由于重金属镉元素严重超标(表6)。

表6　北京郊区常规施药梨园土壤重金属综合污染指数
Table 6 The integrated pollution index of soil heavy metal in pear orchards with conventional use pesticides in suburbs of Beijing

地区 Area	土层 Soil layer/cm	综合污染指数 P_N Integrated pollution index P_N	等级 Grade	污染评价 Pollution assessment
平谷 Pinggu	0~20	1.88	III	轻度污染级 Slightly polluted level
	20~40	1.78	III	轻度污染级 Slightly polluted level
	40~60	1.04	III	轻度污染级 Slightly polluted level
密云 Miyun	0~20	4.50	V	重度污染级 Severely polluted level
	20~40	1.45	III	轻度污染级 Slightly polluted level
	40~60	1.27	III	轻度污染级 Slightly polluted level
顺义 Shunyi	0~20	2.24	IV	中度污染级 Moderately polluted level
	20~40	2.35	IV	中度污染级 Moderately polluted level
	40~60	11.12	V	重度污染级 Severely polluted level
大兴 Daxing	0~20	1.92	III	轻度污染级 Slightly polluted level
	20~40	3.84	V	重度污染级 Severely-polluted level
	40~60	1.65	III	轻度污染级 Slightly-polluted level
房山 Fangshan	0~20	0.98	II	警戒级 Alert level
	20~40	1.56	III	轻度污染级 Slightly polluted level
	40~60	0.96	II	警戒级 Alert level

从结果上看，虽然上述结果中重金属镉的单因子污染指数均大于1，已造成了污染，但由于其他4种元素含量相对较低，对应元素的单因子污染指数很小，用综合污染指数评价的过程中，减轻了重金属元素Cd污染的作用，因此综合评价过程中部分地区Cd的单因子污染指数虽达到污染的水平，但整体上处于警戒级，未造成土壤重金属污染。

2.3　梨园土壤重金属潜在生态风险评价

2.3.1　单污染物潜在生态风险指数评价　根据单污染物潜在生态风险评价标准(表2)，除重金属镉外，各郊区测试梨园各土层其余4种重金属单污染物潜在生态风险指数均为低度风险水平(表7)。

因存在较高的单因子污染指数，重金属镉的潜

表7 北京市郊区常规施药梨园土壤重金属单污染物潜在生态风险评价

Table 7 The single pollutant potential ecological risk index and degree of soil heavy metals in pear orchards with conventional use pesticides in Beijing suburbs

地区 Area	土层 Soil layer/cm	单污染物潜在生态风险指数与程度(n=46) Single pollutant potential ecological risk index and degree				
		镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	砷 As	汞 Hg
平谷 Pinggu	0~20	75.09 中度 Medium	1.65 低度 Low	0.70 低度 Low	5.50 低度 Low	15.10 低度 Low
	20~40	67.91 中度 Medium	1.73 低度 Low	0.55 低度 Low	6.38 低度 Low	14.64 低度 Low
	40~60	39.50 低度 Low	0.77 低度 Low	0.03 低度 Low	6.11 低度 Low	9.56 低度 Low
密云 Miyun	0~20	184.56 重度 Serious	1.60 低度 Low	0.49 低度 Low	4.26 低度 Low	11.59 低度 Low
	20~40	50.28 中度 Medium	1.38 低度 Low	0.65 低度 Low	3.76 低度 Low	10.10 低度 Low
	40~60	48.83 中度 Medium	0.77 低度 Low	0.05 低度 Low	3.82 低度 Low	10.08 低度 Low
顺义 Shunyi	0~20	89.66 较重 Heavy	1.86 低度 Low	1.29 低度 Low	4.43 低度 Low	18.57 低度 Low
	20~40	93.76 较重 Heavy	1.89 低度 Low	0.85 低度 Low	4.37 低度 Low	21.45 低度 Low
	40~60	459.41 严重 Severe	0.53 低度 Low	0.41 低度 Low	3.95 低度 Low	7.28 低度 Low
大兴 Daxing	0~20	60.50 中度 Medium	1.83 低度 Low	0.32 低度 Low	3.92 低度 Low	10.55 低度 Low
	20~40	114.38 较重 Heavy	1.83 低度 Low	0.36 低度 Low	4.56 低度 Low	8.27 低度 Low
	40~60	19.73 低度 Low	0.55 低度 Low	0.03 低度 Low	3.88 低度 Low	4.46 低度 Low
房山 Fangshan	0~20	35.14 低度 Low	1.38 低度 Low	0.25 低度 Low	4.99 低度 Low	20.34 低度 Low
	20~40	61.49 中度 Medium	1.45 低度 Low	0.45 低度 Low	5.73 低度 Low	13.67 低度 Low
	40~60	30.13 低度 Low	1.08 低度 Low	0.20 低度 Low	4.26 低度 Low	10.40 低度 Low

注：表中数据为指数值。

Note: The data in the form are the index values.

在生态风险指数较高，最高的为顺义区梨园40~60 cm土层，该指数为459.41，达到了严重污染水平，其次为密云区梨园0~20 cm土层，潜在生态风险指数为184.56，达到了重度风险水平；顺义区两个土层(0~20 cm及20~40 cm)、大兴区20~40 cm土层的镉元素潜在生态风险指数依次为89.66、93.76、157.50，处于较重度风险水平；其他区梨园的则为中低度风险水平(表7)。

2.3.2 多污染物潜在生态风险指数 采用多污染物潜在生态风险指数对5种重金属的综合风险进行评价，各郊区梨园多污染物潜在生态风险指数大小排列依次为：顺义>密云>大兴>平谷>房山，其中顺义区梨园40~60 cm土层总风险指数为471.57，为重度风险水平，密云区梨园0~20 cm土层总风险指数为202.5，大兴区20-40 cm土层总风险指数为129.41，均为中度风险水平，而其他郊区梨园的3个土层则均为低度风险水平(表8)。

表8 北京市郊区常规施药梨园土壤重金属多污染物潜在生态风险指数

Table 8 The multiple potential ecological risk index RI of soil heavy metal in pear orchards with contentional use pesticides in Beijing suburbs

地区 Area	土层 Soil layer/cm	多污染物潜在生态风险指数RI The multiple potential ecological risk index RI	总的潜在生态风险指数 The potential adverse effects of heavy metal
平谷 Pinggu	0~20	98.06	低度 Low
	20~40	91.21	低度 Low
	40~60	55.97	低度 Low
密云 Miyun	0~20	202.50	中度 Medium
	20~40	66.16	低度 Low
	40~60	63.55	低度 Low
顺义 Shunyi	0~20	115.81	低度 Low
	20~40	122.32	低度 Low
	40~60	471.57	重度 Serious
大兴 Daxing	0~20	92.64	低度 Low
	20~40	173.40	中度 Medium
	40~60	76.22	低度 Low
房山 Fangshan	0~20	62.11	低度 Low
	20~40	82.78	低度 Low
	40~60	46.07	低度 Low

3 讨 论

3.1 土壤重金属来源及其污染的原因

农田土壤中的Cd、Cr等重金属主要来源于化肥(尤其磷肥)、农药(有机磷等)、城市污泥肥田、大气Cd沉降等[5,27,30]。

化肥容易造成重金属污染，尤其是磷肥在其制作过程中含有较多的Cd[31]。经调查发现，法国的农田Cd主要来源于磷肥[32]。许多研究表明，过多施用

化肥、复合肥等，会导致土壤中Cd的大量积累，种植在土壤中的作物也就会增加对Cd的吸收量。上海地区菜园土中Cd含量(ω，后同)在施用磷肥之后增加0.19 mg·kg^{-1}[33]，美国某橘园连续施用磷肥36 a后，土壤中Cd含量增加0.93 mg·kg^{-1} [34]。建议梨园减少含磷化肥使用。

化学农药分子会与土壤中的Cd、Cr等重金属元素络合，形成难以分解的磷酸盐[35-37]，使其在土壤中进一步富集，导致重金属含量超标。土壤中的重金属铬(Cr)的最初来源于岩石风化，在自然条件下，转移到土壤中[30]。过多施用化学农药或增加用药次数，会增加土壤中Cd、Cr等重金属元素的含量[27]。梨园施用化学农药次数增加，土壤中重金属含量明显增加，每年施3次药的梨园与每年施8次药的相比，深层土壤中镉含量明显降低，每年施用8次药的梨园，Cd含量为0.8 mg·kg^{-1}，而每年施用3次药的梨园，Cd含量仅为0.24 mg·kg^{-1}[27]。由此看来，减少化学农药的施药次数可以降低土壤重金属的污染程度。因此建议梨园减少含磷化学农药使用量和使用频次。

城市污泥肥田[30]。废旧电池等城市垃圾、工业开采冶炼等镉、铬污染源产生的粉末和粉渣随降雨入地下水形成污泥污水，生活用洗涤剂、洗衣液、洁厕灵等化学用品随生活污水排出，形成含有少量重金属的污泥污水，随灌溉入果园、农田。

大气中含镉的粉尘颗粒物沉降到土壤中，造成镉元素积累[30]。

土壤pH与土壤重金属含量也有很大关系。土壤酸碱度对土壤胶体吸附Cd的量有一定影响。一般随着土壤pH值的下降，土壤胶体上吸附Cd的溶出率增加，Cd的溶解度增大，从而加速了Cd在土壤中的迁移和转化。相反，随着土壤pH值的增大，土壤胶体上吸附Cd的溶出率下降，Cd的溶解度也随之降低，导致土壤中的Cd在原地沉积，并向深层土壤迁移[38]。因而，土壤酸碱度是影响土壤重金属元素迁移和转化的重要因子。本研究结果显示，北京密云地区土壤的pH主要为6.56~6.61，属于弱酸性的土壤，Cd不易沉积，主要集中在土壤表层，深层土壤较少。北京顺义地区的土壤pH值都超过了7.00，呈弱碱性，Cd不易发生迁移，而是逐渐向深层土壤积累沉积。

3.2 北京市郊区梨园土壤重金属污染

北京郊区部分梨园土壤中虽然Cr和Hg的平均含量尚未超过国家标准值，但Cd、Cr、Hg的平均含量已超过北京市土壤背景值，存在所谓的“累积”问题[39]。从重金属含量水平分布上看，这些重金属在不同郊区梨园累积程度不同。

北京顺义区Cd含量最高，其原因是该梨园(意大利农场梨园)地处马坡镇白各庄村，该村曾被记载Cd长期累积，是镉元素污染区[40]。

密云区梨园Cd含量富集，处于高风险状态，并且已经造成了污染，原因可能有二：一是梨园周围有金铁矿，黄兴星等[41]研究发现密云地区金铁矿区周围的Cd含量明显高于北京市土壤重金属背景值和国家标准值；二是该区长期用生活污水和工业污水灌溉农田[42]。

铅元素(Pb)和汞元素(Hg)是构成地壳的元素，主要分布于岩石、土壤中[43]。一般Pb在土壤中含量较高。有研究报道，地壳中的平均含量一般为10.00 mg·kg^{-1}。Hg在地壳中的平均含量约为0.07 mg·kg^{-1} [44]。该两种元素含量在不同地区、不同土壤类型的含量差异较大。北京有些地区土壤中Pb含量多至95.24 mg·kg^{-1} [45]，四川一些农村地区Pb多至235.17~261.30 mg·kg^{-1} [46]，但有些地区含量却很少，少至2.22 mg·kg^{-1}，甚至无检出[47]。本研究检测的北京地区各梨园Pb含量一般为0~16.83 mg·kg^{-1}，各梨园Hg含量为0~0.20 mg·kg^{-1}。

3.3 土壤中重金属的垂直分布

土壤类型与土壤质地是影响重金属含量垂直分布的原因之一[46]。砂壤土质，土壤淋溶速度较快，Cd污染物下渗速度快，黏壤土、壤土等较黏重的土壤镉元素向下迁移速度缓慢，易在土壤表层沉积。本研究结果显示，北京顺义区梨园土壤为砂壤土，镉元素随土层加深含量逐渐增高，至40~60 cm土壤层Cd元素含量最高；密云区梨园为黏壤土，镉元素含量在0~20 cm土层最高，随土层加深而减少，说明该郊区梨园中的镉元素在土壤中迁移缓慢，容易累积，不借助人为农事活动较难向下迁移。

人为的农事活动是土壤中重金属含量分布的另一个影响因素。精耕、翻地、施肥、灌水都会影响重金属含量的垂直分布。

3.4 土壤重金属超富集植物

有研究报道，牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)、碎米荠(*Cardamine hirsuta* Linn.)可以从土壤中吸附Cd[48-49]；遏蓝菜 (*Thlaspi arvense* L.)可以从土壤中

吸附Zn、Cd、Pb等重金属元素[50]；蜈蚣草[*Eremochloa ciliaris* (Linn.) Merr.]可以从土壤中吸附As[51]。因此，建议北京大多数梨园种植牛膝菊、碎米荠等镉元素超富集植物或其他重金属元素超富集植物。

4 结 论

经测定北京多数梨园土壤Cd含量超国家标准值和北京市土壤背景值，Cr、Hg含量超北京背景值。Cd、Cr等重金属来源和含量分布与化肥、农药、土壤类型、pH有关。建议梨园种植牛膝菊等镉元素超富集植物，减少含磷化肥农药使用量和使用频率。

参考文献 References：

[1] 路超，王金政 . 山东省苹果园梨园土壤肥力状况及改良技术措施[J]. 落叶果树，2008，40(2)：24-28.
LU Chao，WANG Jinzheng. Fertility status in apple and pear orchard soils in Shandong province and improving measures[J]. Deciduous Fruits，2008，40(2): 24-28.

[2] 庞奖励，黄春长，孙根年 . 西安污灌区土壤重金属含量及对西红柿影响研究[J]. 土壤与环境，2001，10(2)：94-97.
PANG Jiangli，HUANG Chunchang，SUN Gennian. Heavy metal content of sewage irrigated soil in Xi'an and its influence to tomato[J]. Soil and Environmental Sciences，2001，10(2)：94-97.

[3] WONG C S，WU S C，DUZGOREN-AYDIN N S，AYDIN A，MING H W. Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China[J]. Environmental Pollution，2007，145(2)：434-442.

[4] 杨景辉 . 土壤污染与防治[M]. 北京：科学出版社，1995.
YANG Jinghui. Soil pollution and control[M]. Beijing：Science Press，1995.

[5] 曹正亚 . 大棚黄瓜中多次施用代森锰锌后对土壤中锰、锌累积的影响[D]. 杭州：浙江大学，2013.
CAO Zhengya. Accumulation of manganese and zinc in cucumber planted soil with the successive applications of Maneozeb[D]. Hangzhou: Zhejiang University，2013.

[6] 单正军，王连生，蔡道基，朱忠林，石利利，果园土壤铜污染状况及其对作物生长的影响[J]. 农业环境保护，2002，21(2)：119-121.
SHAN Zhengjun，WANG Liansheng，CAI Daoji，SONG Zhonglin，SHI Lili. Pollution of Copper in orchard soil and its effects on plant growth[J]. Journal of Agro-Environment Science，2002，21(2): 119-121.

[7] 北京市统计局，国家统计局北京调查总队 . 北京统计年鉴[2017][M]. 北京：中国统计出版社，2017.
Beijing Municipal Bureau of Statistics and NBS Survey Office in Beijing. Statistical yearbook of Beijing[2017] [M]. Beijing: China Statistics Press，2017.

[8] 刘奇志，付占芳，王玉柱，张丽娟，李振茹，亓丽萍，陈梅香 . 中国北方有机果园害虫防治建议[J]. 中国农学通报，2008，24(6)：296-300.
LIU Qizhi，FU Zhanfang，WANG Yuzhu，ZHANG Lijuan，LI Zhenru，QI Liping，CHEN Meixiang ，Suggestion on insect pest control of organic orchards in northern China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2008，24(6): 296-300.

[9] 张婷，刘奇志，郭黄萍，王洁雯，张晓伟 . 物候温度与梨园梨木虱出蛰及发育关系研究[J]. 北方园艺，2015(20)：102-104.
ZHANG Ting，LIU Qizhi，GUO Huangping，WANG Jiewen，ZHANG Xiaowei. Research on the relation between development and post-hibernant of *Cacopsylla chinensis* and phenology temperature[J]. Northern Horticulture，2015(20): 102-104.

[10] 路晓楠，刘奇志，乐文全，王洁雯，徐金涛 . 梨树树形与梨木虱种群发生关系研究[J]. 北方园艺，2015(4)：116-118.
LU Xiaonan，LIU Qizhi，LE Wenquan，WANG Jiewen，XU Jintao. Study on the relationship between pear trees structure and population of *Cacopsylla chinensis*[J]. Northern Horticulture，2015(4): 116-118.

[11] 刘艳斌，刘奇志，石旺鹏，李红旭，白鹏华，赵明新，刘志龙，周海鹰，王玮，王玉玲 . 梨园根际土壤线虫对土壤养分及叶片黄化的响应[J]. 果树学报，2013, 30（6）：998-1004.
LIU Yanbin, LIU Qizhi, SHI Wangpeng, LI Hongxu, BAI Penghua, ZHAO Mingxin, LIU Zhilong, ZHOU Haiying, WANG Wei, WANG Yuling. Response of nematodes to soil nutrient and leaf yellowing in pear trees[J]. Journal of Fruit Science，2013，30(6): 998-1004.

[12] TIAN B L，LIU Q Z，LIU Z L，LI P，WANG J W. Insecticidal potential of clove essential oil and its constituents on *Cacopsylla chinensis* (Hemiptera: Psyllidae) in laboratory and field[J]. Journal of Economic Entomology，2015，108(3): 957-961.

[13] 刘奇志，张丽娟，王玉柱，李振茹，杜小引，陈梅香 . 从德国有机农业看我国有机果园的病虫防治[J]. 北方园艺，2010(7)：230-231.
LIU Qizhi，ZHANG Lijuan，WANG Yuzhu，LI Zhenru，DU Xiaoyin，CHEN Meixiang. From German organic agriculture considering China organic orchard in pest control[J]. Northern Horticulture，2010(7): 230-231.

[14] 王洁雯，刘奇志，郭黄萍，张晓伟 . 梨园物候及温度与中国梨喀木虱发生期关系研究[J]. 北方园艺，2015(14)：118-121.
WANG Jiewen，LIU Qizhi，GUO Huangping，ZHANG Xiaowei. Research on the relation between the occurrence dynamic of *Cacopsylla chinensis* (Hemiptera: Psyllidae) and phenology and temperature[J]. Northern Horticulture，2015(14): 118-121.

[15] 刘奇志，张丽娟，杜小引，李振茹，亓丽萍，谢娜，梁林琳 . 梨园地被植物与天敌的种类及其数量关系[J]. 中国农学通报，2010，26(12)：209-215.
LIU Qizhi，ZHANG Lijuan，DU Xiaoyin，LI Zhenru，QI Liping，XIE Na，LIANG Linlin，The relationship between groundcover plants and natural enemies of species and quantity in a pear orchard[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2010，26(12):

209-215.

[16] 王洁雯，郭黄萍，刘奇志，石旺鹏，郝国伟，刘志龙，周海鹰. 黑麦草对梨园梨木虱种群数量影响初探[J]. 中国果树，2013(4)：54-56.
WANG Jiewen，GUO Huangping，LIU Qizhi，SHI Wangpeng，HAO Guowei，LIU Zhilong，ZHOU Haiying，Effect of ryegrass on the number of pear Psylla groups[J]. China Fruits，2013(4): 54-56.

[17] 张航，刘奇志，石旺鹏，刘志龙，周海鹰. 北京地区梨园土壤线虫群落组成与多样性研究[J]. 中国果树，2013(2)：20-24.
ZHANG Hang，LIU Qizhi，SHI Wangpeng，LIU Zhilong，ZHOU Haiying. Composition and diversity of soil nematode community in pear orchards in Beijing[J]. China Fruits，2013(2): 20-24.

[18] 刘奇志，张丽娟，王玉柱，杜小康，孙浩元，Zdeneck Mrá(c)ek. 昆虫病原线虫(*Steinernema longicaudum* BPS 品系)生物学测定[J]. 中国农学通报，2009，25(2)：236-239.
LIU Qizhi，ZHANG Lijuan，WANG Yuzhu，DU Xiaokang，SUN Haoyuan，Zdeneck Mrá(c)ek. Bio-analysis on EPNs of *Steinernema longicaudum* BPS strain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2009，25(2): 236-239.

[19] 刘军，刘松忠，鲁韧强，魏钦平，王小伟. 北京地区梨园土壤养分状况调查与分析[J]. 山东农业科学，2014(1)：73-75.
LIU Jun，LIU Songzhong，LU Renqiang，WEI Qinping，WANG Xiaowei. Investigation and analysis of soil nutrient in pear orchards in Beijing area[J]. Shandong Agricultural Sciences，2014(1): 73-75.

[20] 白鹏华，刘奇志，李红旭，刘艳斌，石旺鹏，王玮，刘志龙，周海鹰，赵明新. 梨树叶片黄化与根际土壤微生物及养分关系[J]. 浙江农业学报，2013，25(6)：1332-1336.
BAI Penghua，LIU Qizhi，LI Hongxu，LIU Yanbin，SHI Wangpeng，WANG Wei，LIU Zhilong，ZHOU Haiying，ZHAO Mingxin. Relationships between leaf yellowing and soil microorganisms/nutrients in pear orchards[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis，2013，25(6): 1332-1336.

[21] 张林森，梁俊，武春林，段敏，王西玲，赵政阳，赵锁劳. 陕西苹果园土壤重金属含量水平及其评价[J]. 果树学报，2004，21(2)：103-105.
ZHANG Linsen，LIANG Jun，WU Chunlin，DUAN Min，WANG Xiling，ZHAO Zhengyang，ZHAO Suolao. Evaluation and concentration of soil heavy metals in appleorchards of Shaanxi province[J]. Journal of Fruit Science，2004，21(2): 103-105.

[22] 范拴喜，甘卓亭，李美娟，张掌权，周旗. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报，2010，26(17)：310-315.
FAN Shuanxi，GAN Zhuoting, LI Meijuan, ZHANG Zhangquan，ZHOU Qi. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2010，26(17): 310-315.

[23] 方晓波，史坚，廖欣峰，楼中，周侣艳，余海霞，姚林，孙立苹. 临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 应用生态学报，2015，26(6)：1883-1891.
FANG Xiaobo，SHI Jian，LIAO Xinfeng，LOU Zhong，ZHOU Lüyan，YU Haixia，YAO Lin，SUN Liping. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in Phyllostachys praecox stands of Lin'an[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2015，26(6): 1883-1891.

[24] 樊新刚，米文宝，马振宁，王婷玉. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学，2013，34(5)：1887-1894.
FAN Xingang，MI Wenbao，MA Zhenning，WANG Tingyu. Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan northwest China[J]. Environmental Science，2013，34(5): 1887-1894.

[25] 郭伟，孙文惠，赵仁鑫，赵文静，付瑞英，张君. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学，2013，34(4)：1561-1567.
GUO Wei，SUN Wenhui，ZHAO Renxin，ZHAO Wenjing，FU Ruiying，ZHANG Jun. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot[J]. Environmental Science，2013，34(4): 1561-1567.

[26] 刘春早，黄益宗，雷鸣，郝晓伟，李希，铁柏清，谢建治. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学，2012，33(1)：260-265.
LIU Chunzao，HUANG Yizong，LEI Ming，HAO Xiaowei，LI Xi，TIE Baiqing，XIE Jianzhi. Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River Basin[J]. Chinese Journal of Environmental Science，2012，33(1): 260-265.

[27] 乔晓芳，刘奇志，刘军，刘松忠. 施药次数与梨园土壤重金属污染程度及潜在风险的关系[J]. 果树学报，2016，33(增刊)：196-202.
QIAO Xiaofang，LIU Qizhi，LIU Jun，LIU Songzhong. The relations of application frequency of pesticides to heavy metal pollution in soils of pear orchards and potential risk evaluation[J]. Journal of Fruit Science，2016，33(suppl.): 196-202.

[28] 郭笑笑，刘丛强，朱兆洲，王中良，李军. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志，2011，30(5)：889-896.
GUO Xiaoxiao, LIU Congqiang，ZHU Zhaozho，WANG Zhongliang，LI Jun. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: A review[J]. Chinese Journal of Ecology，2011，30(5): 889-896.

[29] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control，a sedimentological approach[J]. Water Research，1980，14(8): 975-1001.

[30] 穆克热木•阿布利孜. 浅谈作物土壤中6种重金属元素来源及检测[J]. 中国计量，2015(12)：85-87.
Mukeremu Abulizi. The source of 6 kinds of heavy metal elements in crop soil and the detection methods[J]. China Metrology，2015(12): 85-87.

[31] 王真辉，林位夫. 农田土壤重金属污染及其生物修复技术[J]. 海南大学学报(自然科学版)，2002，20(4): 386-393.
WANG Zhenhui，LIN Weifu. Heavy metal pollution in farmland soil and the technology of its bioremediation[J]. Natural Science Journal of Hainan University，2002，20(4): 386-393.

[32] BELON E, BOISSON M, DEPORTES I Z. An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils[J]. Science of the Total Environment, 2012, 439(15): 87-95.

[33] 马耀华，刘树应 . 环境土壤学[M]. 西安：陕西科学技术出版社，1998: 178-207.
MA Yaohua, LIU Shuying. Environmental soil science[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1998: 178-207.

[34] TAYLOR M D. Accumulation of cadmium derived from fertilizers in New Zealand[J]. Science of the Total Environment, 1997, 208(1/2): 123-126.

[35] 国家环境保护局 . 土壤环境质量标准：GB15618—1995[S]. 北京：中国标准出版社，1995.
National Environmental Protection Agency. Soil environmental quality standard: GB15618—1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.

[36] 秦天才，吴玉树，王焕校 . 镉铅及相互作用对小白菜生理生化特性的影响[J]. 生态学报，1994，14(1)：46-49.
QIN Tiancai, WU Yushu, WANG Huanxiao. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physioloigicical and biochemical characteristics of brassica chinensis[J]. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14(1): 46-49.

[37] KAHLE H. Response of roots of trees to heavy metals[J]. Environ&mental & Experimental Botany, 1993, 33(1): 99-119.

[38] 喻凤莲，周成明，邓锐 . 水稻籽实及其根系土壤中镉含量的相关性研究——以几个金土地工程土地整理区为例[J]. 四川地质学报，2012(4): 468-471.
YU Fenglian, ZHOU Chengming, DENG Rui. Study of correlation of Cd contents of rice grain and root soil[J]. Acta Geologica Sichuan, 2012(4): 468-471.

[39] 曾希柏，徐建明，黄巧云，唐世荣，李永涛，李芳柏，周东美，武志杰 . 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报，2013，50(1)：186-194.
ZENG Xibo, XU Jianming, HUANG Qiaoyun, TANG Shirong, LI Yongtao, LI Fangbo, ZHOU Dongmei, WU Zhijie. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 186-194.

[40] 韩平，王纪华，冯晓元，马智宏，陆安祥，魏荔，闫连波 . 北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究[J]. 农业环境科学学报，2015，34(1)：103-109.
HAN Ping, WANG Jihua, FENG Xiaoyuan, MA Zhihong, LU Anxiang, WEI Li, YAN Lianbo. Ecological risk assessment of heavy metals in soils in Shunyi, Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(1)：103-109.

[41] 黄兴星，朱先芳，唐磊，季宏兵 . 北京市密云水库上游金铁矿区土壤重金属污染特征及对比研究[J]. 环境科学学报，2012，32(6): 1520-1528.
HUANG Xingxing, ZHU Xianfang, TANG Lei, JI Hongbing. Pollution characteristics and their comparative study of heavy metals in the gold and iron mine soil of the upstream area of Miyun Reservoir, Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(6): 1520-1528.

[42] 姜菲菲，孙丹峰，李红，周连第 . 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. 农业工程学报，2011，27(8): 330-337.
JIANG Feifei, SUN Danfeng, LI Hong, ZHOU Liandi. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 330-337.

[43] 崔德杰，张玉龙 . 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报，2004，35(3): 366-370.
CUI Dejie, ZHANG Yulong. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 366-370.

[44] 迟清华 . 汞在地壳、岩石和疏松沉积物中的分布[J]. 地球化学，2004，33(6): 641-648.
CHI Qinghua. Abundance of mercury in crust, rocks and loose sediments[J]. Geochimica, 2004, 33(6): 641-648.

[45] 金立坚，李向龙，印悦，秦岭，刘睿聪 . 2011 年四川省农村土壤中铅和镉含量调查[J]. 环境与健康杂志，2012，29(12): 1112-1115.
JIN Lijian, LI Xianglong, YIN Yue, QIN Ling, LIU Ruicong. Investigation of soil lead and cadmium content in rural areas of Sichuan in 2011[J]. Journal of Environment and Health, 2012, 29(12): 1112-1115.

[46] 马智宏，王纪华，陆安祥，潘瑜春，王北洪，闵顺耕 . 京郊不同剖面土壤重金属的分布与迁移[J]. 河北农业大学学报，2007，30(6): 11-15.
MA Zhihong, WANG Jihua, LU Anxiang, PAN Yuchun, WANG Beihong, MIN Shungeng. Distribution and transfer of main heavy metals in different soil section in Beijing suburb[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2007, 30(6): 11-15.

[47] 王海燕，叶芳，王登芝，吴京科 . 北京市土壤重金属污染研究[J]. 城市环境与城市生态，2005(6): 34-36.
WANG Haiyan, YE Fang, WANG Dengzhi, WU Jingke. Soil heavy metal pollution in Beijing City[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2005(6): 34-36.

[48] LIN L, JIN Q, LIU Y, NING B, LIAO M, LUO L. Screening of a new cadmium hyperaccumulator, Galinsoga parviflora, from winter farmland weeds using the artificially high soil cadmium concentration method[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2014, 33(11): 2422-2428.

[49] LIN L, SHI J, LIU Q, LIAO M, MEI L. Cadmium accumulation characteristics of the winter farmland weeds *Cardamine hirsuta* Linn. and *Gnaphalium affine* D. Don.[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2014, 186(7): 4051-4056.

[50] MCGRATH S P, ZHAO F J, LOMBI E. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides[J]. Advances in Agronomy, 2002, 75(2): 1-56.

[51] 韦朝阳，陈同斌 . 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报，2001，21(7): 1196-1203.
WEI Zhaoyang, CHEN Tongbin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in China and abroad[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7): 1196-1203.