北京市菜地土壤和蔬菜的锌含量及其健康风险评估

黄泽春[1], 宋 波[1,2], 陈同斌[1,*], 郑袁明[1], 杨 军[1,2]
(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复研究中心, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过 97 种蔬菜、454 个样品的调查表明, 北京市菜地土壤锌明显高于北京市土壤锌背景值, 其含量范围、算术均值、中值和几何均值分别为 24.9～308、79.2、63.8 和 70.7 mg/kg。北京市蔬菜锌含量范围、中值和算术均值分别为 0.005～25.6、2.24 和 3.11 mg/kg 鲜重。叶菜类蔬菜锌含量显著高于瓜果类蔬菜, 其余各类型间差异均不显著。北京市市售外地产蔬菜锌含量显著高于本地产蔬菜; 裸露地蔬菜与设施蔬菜锌含量差异不显著。冬瓜、西红柿、茄子、黄瓜、辣椒和大葱和部分特菜的锌富集系数最低, 抗土壤锌污染的能力较强。北京市居民从蔬菜中摄入锌的量为 4.04 mg/人·d, 蔬菜锌对北京市居民不会构成健康风险。

关 键 词: 北京市; 蔬菜; 锌; 健康风险; 抗污染品种
文章编号: 1000-0585(2006)03-0439-10

锌是人体、动物和植物所必需的微量元素[1,2]。施用锌肥、污水灌溉和污泥的施用可能使锌在土壤及蔬菜等农产品中积累[3,4], 但是并不一定会产生污染问题。

本研究组已对北京市菜地和蔬菜中砷、镉、铬和镍含量状况及其健康风险[5~8]、不同土地利用方式对土壤重金属含量的影响[9~14]、污水灌溉对土壤和粮食作物重金属积累的影响[15~17]和北京市蔬菜重金属信息系统[18]等问题进行过较系统的研究, 其他学者也对北京市大兴区土壤中重金属空间分布[19]和北京市东郊污灌土壤重金属污染评价[20]进行过研究。但对于北京市菜地土壤和蔬菜锌含量状况及其健康风险等问题仍缺乏了解。本文根据蔬菜生产和消费特点, 系统探讨北京市主要蔬菜和菜地土壤的锌含量及其健康风险, 并筛选出抗锌污染能力较强的蔬菜品种, 以便为蔬菜产业发展规划提供依据。

1 材料与方法

1.1 蔬菜样品的采集与分析

为了保证各蔬菜品种的采样代表性, 每种蔬菜的样本数主要根据其产量进行确定。考虑到各品种不应因产量差异太大而造成样本数分配差异过大, 采用每种蔬菜的样本数与其生产量的平方根成正比的原则确定每种蔬菜的样本数。样本数按方程 (1) 计算:

$$n_i = \frac{\sqrt{a_i}}{\sum_{i}^{m} \sqrt{a_i}} \times N \qquad (1)$$

收稿日期: 2005-12-21; **修订日期**: 2006-03-22
基金项目: 国家杰出青年基金项目 (40325003) 和北京市自然科学基金重大项目 (6990002)
作者简介: 黄泽春 (1974-), 福建福安人, 博士。主要从事区域土壤环境质量与植物修复研究。
*责任作者: 陈同斌 (1963-), 研究员, 博士生导师。E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

式中，n_i为每种蔬菜的样品数，a_i为每种蔬菜的年生产量，m为蔬菜品种数，N为蔬菜样本总数。

本文调查的 19 种蔬菜的产量之和占北京市 2001 年蔬菜生产总量（5.23 ×10^6 t）的 74.9 %[5,21]。此外，还根据蔬菜消费特点采集了其他常见蔬菜和特种蔬菜，并从北京市岳各庄、大钟寺、新发地三大批发市场和超市采集市售蔬菜。市售外地产蔬菜主要来自山东、广东、内蒙古、天津和河北等地。采集的样品包括叶菜类、根茎类、瓜果类蔬菜和设施大棚栽培的特种蔬菜。

采样时摘取新鲜蔬菜的可食部分。采集蔬菜鲜样后装入塑料袋密封。用自来水和去离子水反复清洗，晾干，切碎，在 60 ℃条件下烘箱中烘 48 h，粉碎备用。蔬菜样品采用 HNO_3-$HClO_4$方法消煮，火焰原子吸收光谱法测定锌[2]。分析过程加入国家标准植物样品（GSV - 3）进行分析质量控制。

1.2 土壤样品的采集与分析

在采集蔬菜样品时还同步采集土壤样品。土壤采样点主要在集中蔬菜生产基地（图 1）。土壤样品为 5 个点组成的混合样品。样品在室内风干，过 100 目尼龙筛后备用[5]。土壤采用美国国家环保局推荐的 USEPA 3050B 方法消煮[22]，火焰原子吸收光谱法锌测定[2]。分析过程加入国家标准土壤样品（GSS - 1）进行分析质量控制。

1.3 数据统计分析

采用 Arc GIS 制作样点分布图，SPSS 进行统计分析，Minitab 进行数据的 Box-Cox 转换[23]，Shapiro-Wilk 法检验数据频率分布状况（$P_{S\text{-}W}$）。蔬菜 Zn 含量的 Box-Cox 平均值是采用 Box-Cox 转换的逆运算而得，即 $z = \sqrt[\lambda]{y \cdot \lambda + 1}$，式中 z 为 Box-Cox 平均值，y 为 Box-Cox 转换后的平均值，λ 为最优转换系数。

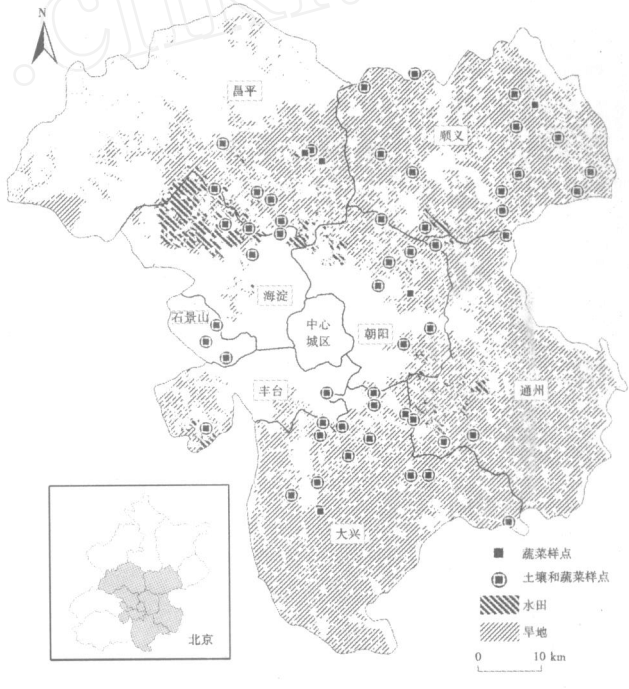


图 1 北京市蔬菜采样点区域分布图

Fig. 1 A sketch map showing sampling sites of vegetables taken from Beijing

1.4 蔬菜锌摄入量和综合超标率的计算

由于设计蔬菜样本数时是根据其生产量的平方根成正比的原则来确定的，因此计算蔬菜的消费量权重时，应将其样本数进行平方。其计算方法如方程（2）所示：

$$Zn_{摄入} = Q \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\overline{X_{B\text{-}G}} \cdot \frac{N_i^2}{\sum_{i=1}^{n} N_i^2} \right) \quad (2)$$

式中，$Zn_{摄入}$为居民从蔬菜中摄入锌的总量；Q为蔬菜人均日消费量；$\overline{X_{B\text{-}G}}$为各品种

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

蔬菜锌含量的 Box-Cox 均值; N 为各品种蔬菜的样本数; n 为蔬菜品种数。

蔬菜锌总超标率计算方法如方程 (3) 所示:

$$A = \sum_{i=1}^{n}\left(a_i \cdot \frac{N_i^2}{\sum_{i=1}^{n} N_i^2}\right) \quad (3)$$

式中, A 为蔬菜锌总超标率, a_i 为各种蔬菜锌超标率, N_i 为各品种蔬菜的样本数; n 为蔬菜品种数。

2　结果与讨论

2.1　菜地土壤锌含量特征

在本研究中的 52 个菜地土壤样品中, 菜地土壤锌含量呈正偏度分布 (偏度为 2.86), 数据服从弱对数正态分布 (p = 0.015) (表 1)。经过 Box-Cox 转换, 可以使数据符合正态分布 (p = 0.277), 其最优化转换系数 λ 为 - 0.41。与北京市土壤锌的背景值 (算术均值 59.6 mg/kg 和几何均值 57.5mg/kg[24]) 比较, 二者差异极显著 (P = 0.000)。可见, 北京市菜地土壤锌明显高于背景值。但是, 除顺义区一个样点较高 (307 mg/kg) 而可能受到较明显的锌污染外, 北京市菜地土壤锌含量均低于《土壤环境质量标准》中[25] 碱性土壤 (pH > 7.5) 的 II 级 (适合蔬菜种植的农业土壤) 标准 (300mg/kg) (图 2)。

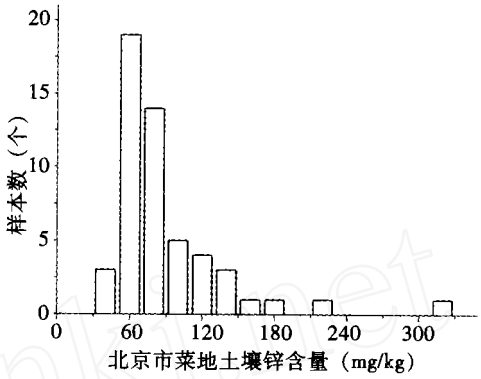


图 2　北京市菜地土壤锌含量频率分布图

Fig. 2　Distribution characteristics of soil Zn in farm fields of Beijing

施用锌肥和含锌农药可能是导致其土壤中锌含量升高的原因[26]。某些禽畜粪便等的锌含量可达 100～207 mg/kg, 长期施用有机肥可使土壤锌提高 5 %～30 %[27]。施用过磷酸钙、含锌化肥和含锌农药 (如代森锌) 也会使土壤锌含量升高[28]。污水灌溉可能也是导致土壤锌含量升高的原因之一[3,19]。

表 1　北京市菜地土壤锌含量及其分布特征

Tab. 1　Concentrations and distribution characteristics of soil Zn from farm fields in Beijing

数据转换方法	n	菜地土壤锌含量 (mg/kg)				偏度	峰度	P_{S-W}
		范围	中值	均值	标准差			
原数据	52	24.9～308	63.8	79.2	46.8	2.86	10.9	0.00
对数转换	52	24.9～308	63.8	70.7	1.57	0.90	1.69	0.02
Box-Cox 转换	52	24.9～308	63.8	68.0	1.08	0.15	1.16	0.28

2.2　蔬菜锌含量特征

北京市各种蔬菜的锌平均含量以及各样本的锌含量 (表 2) 均低于《食品中锌限量卫生标准》规定的限量值 (20 mg/kg 鲜重[29]) 以及新西兰 (40.0 mg/kg) 和加拿大 (50.0 mg/kg) 蔬菜中锌限量标准[2], 蔬菜中锌总超标率为 0 %。我国《农产品安全质量无公害

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

表 2 北京市各种蔬菜的锌含量

Tab. 2 Contents of Zn in vegetables collected from farm fields and markets of Beijing

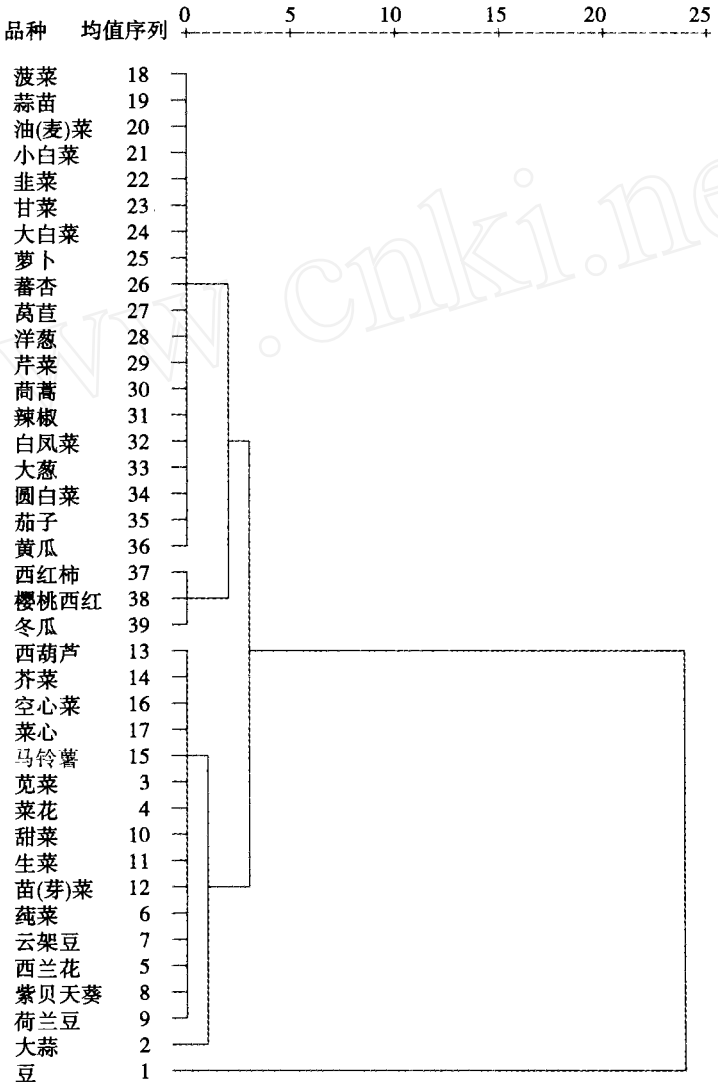
蔬菜种类	n	蔬菜锌含量 (mg/kg, 鲜重)				蔬菜锌含量 Box-Cox 转换结果	
		范围	中值	平均值 (标准差)	Ps-w	平均值 (标准差)	Ps-w
大白菜	46	0.37～7.42	2.45	2.71 (1.27)	0.01	2.52 (1.80)	0.95
甘蓝[A]	20	1.18～10.0	2.03	3.09 (2.54)	0.00	2.68 (2.23)	0.000
大葱	17	0.30～5.37	1.77	2.16 (1.59)	0.05	1.81 (2.31)	0.72
油 (麦) 菜[B]	15	1.64～5.80	2.82	3.11 (1.31)	0.00	2.96 (1.69)	0.000
小白菜[C]	13	0.86～6.23	3.30	3.20 (1.69)	0.57	2.92 (2.07)	0.88
菜花	11	3.68～7.70	5.45	5.57 (1.48)	0.30	5.45 (1.56)	0.36
苗 (芽) 菜[D]	9	2.74～4.99	4.82	4.38 (0.79)	0.01	4.33 (1.36)	0.01
芹菜	8	0.91～2.49	1.15	1.42 (0.64)	0.01	1.35 (1.53)	0.02
圆白菜	7	1.10～2.30	1.86	1.80 (0.40)	0.71	1.77 (1.32)	0.51
菠菜	7	1.53～5.94	3.13	3.18 (1.51)	0.50	2.99 (1.84)	0.86
芥菜[E]	5	2.37～5.02	4.17	4.00 (0.99)	0.37	3.93 (1.50)	0.18
西兰花	4	1.66～9.74	5.78	5.74 (3.62)	0.78	5.07 (2.90)	0.72
生菜	4	1.95～16.0	2.74	5.87 (6.81)	0.01	4.42 (4.11)	0.05
大蒜	4	5.80～11.2	6.37	7.42 (2.55)	0.06	7.23 (1.77)	0.09
菜心	4	2.13～5.27	3.84	3.77 (1.74)	0.06	3.56 (1.95)	0.07
茼蒿	3	0.91～1.85	1.8	1.52 (0.53)	0.09	1.47 (1.51)	0.07
甜菜	2	3.70～5.29	4.49	4.49 (1.13)	-	4.45 (1.48)	-
空心菜	2	3.36～3.90	3.63	3.63 (0.38)	-	3.62 (1.17)	-
叶菜类	181	0.30～16.0	2.71	3.26 (2.16)	0.00	2.88 (2.18)	0.05
萝卜[F]	24	1.01～8.88	2.15	2.86 (1.77)	0.00	2.59 (2.00)	0.04
马铃薯	7	1.62～8.86	3.56	4.09 (2.35)	0.17	3.77 (2.12)	0.79
洋葱	5	0.06～2.89	1.85	1.76 (1.05)	0.72	1.38 (2.78)	0.03
蒜苗	3	2.86～3.05	3.05	2.98 (0.11)	-0.00	2.98 (1.05)	0.00
莴苣	2	0.92～1.99	1.46	1.46 (0.76)	-	1.39 (1.74)	-
藕	1	3.33	3.33	3.33	-	3.33	-
根茎类	42	0.06～8.88	2.32	2.89 (1.79)	0.00	2.56 (2.15)	0.10
西红柿[G]	24	0.16～1.84	1.13	1.10 (0.44)	0.65	1.02 (1.60)	0.01
黄瓜	22	0.36～3.28	1.43	1.54 (0.59)	0.00	1.46 (1.53)	0.15
云架豆[H]	21	0.60～12.7	5.28	5.36 (2.48)	0.03	4.93 (2.25)	0.02
辣椒[I]	15	0.12～8.91	2.13	2.66 (1.99)	0.00	2.26 (2.36)	0.44
冬瓜	15	0.16～1.50	0.64	0.65 (0.39)	0.10	0.58 (1.60)	0.66
茄子	12	0.01～8.97	1.83	2.76 (3.08)	0.00	1.72 (3.83)	0.57
荷兰豆	5	2.29～6.15	5.32	4.76 (1.52)	0.33	4.60 (1.76)	0.15
豆	4	10.7～25.6	17.5	17.8 (6.33)	0.97	17.2 (2.30)	0.99
西葫芦	3	3.91～4.40	3.91	4.07 (0.28)	-	4.07 (1.11)	-
丝瓜	1	3.89	3.89	3.89	-	3.89	-
瓜果类	122	0.01～25.6	1.70	3.01 (3.70)	0.00	2.12 (3.14)	0.00
彩椒[J]	6	0.47～3.79	1.42	1.61 (1.21)	0.25	1.39 (2.11)	0.81
特种萝卜[K]	5	1.14～4.00	1.87	2.14 (1.09)	0.10	2.02 (1.73)	0.34
圣女西红柿	4	0.63～1.90	1.31	1.29 (0.56)	0.81	1.22 (1.60)	0.75
荷兰黄瓜	4	1.50～4.73	2.91	3.01 (1.32)	0.67	2.86 (1.81)	0.70
莼菜	2	4.18～5.86	5.02	5.02 (1.18)	-	4.98 (1.47)	-
白凤菜	2	1.15～2.91	2.03	2.03 (1.24)	-	1.90 (2.04)	-
苋菜	2	4.54～6.90	5.72	5.72 (1.67)	-	5.64 (1.63)	-
紫贝天葵	2	3.11～6.97	5.04	5.04 (2.73)	-	4.79 (2.31)	-
韭菜	2	2.15～3.39	2.77	2.77 (0.88)	-	2.72 (1.52)	-
蕃杏	2	1.46～3.45	2.46	2.46 (1.40)	-	2.32 (2.03)	-
洋葱	1	1.39	1.39	1.39	-	1.39	-
特种茄子	1	1.44	1.44	1.44	-	1.44	-
其他特菜[L]	24	0.24～9.69	3.13	3.57 (2.63)	0.08	2.91 (2.774)	0.90
特菜类	57	0.24～9.69	2.15	3.02 (2.18)	0.00	2.54 (2.44)	0.54
全部蔬菜	402	0.01～25.6	2.24	3.11 (2.69)	0	2.55 (2.54)	0.19

“-”表示无数据; A 羽衣甘蓝、紫甘蓝、元白菜和抱子甘蓝; B 油麦菜、油菜和小油菜; C 小白菜、奶油白菜和小白菜苔; D 萝卜苗、豆瓣菜、豌豆苗、黑豆苗、黑豆芽、黄豆芽、豌豆苗和绿豆芽; E 芥蓝、芥菜和野生芥菜; F 萝卜、白萝卜、水萝卜和胡萝卜; G 西红柿、樱桃西红柿和香蕉西红柿; H 云架豆、豇豆和豆角; I 辣椒、尖椒、大椒和青椒; J 黄彩椒和红彩椒; K 樱桃萝卜、卞萝卜和钢笔萝卜; L 乌塌菜、茴香、香杏、香菇 (猴头菇)、羌、水晶菜、紫三地、马兰菜、香椿、球茎茴香、黑果、京舟一号、长琪、珍珠菜、牛蒡、香葱、珍珠菇、芦笋、人参果、软化菊苣、凉瓜、金珠、葵白。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

蔬菜安全要求》[30]则未限制蔬菜的锌含量。全部蔬菜样本和各大类蔬菜样本的锌含量经过 Box-Cox 转换[23]后服从正态分布或准正态分布 (瓜果类)。从 Box - Cox 平均值来看, 蔬菜的平均含锌量存在以下趋势: 叶菜类 > 根茎类 > 特菜类 > 瓜果类 (表 3)。叶菜类蔬菜锌含量显著高于瓜果类蔬菜 ($P = 0.001$), 其余各类型间差异均不显著。

根据对主要蔬菜品种锌含量的 Box-Cox 均值 (表 2) 进行层级聚类分析, 可将蔬菜分为三类: 豆类蔬菜划为 I 类, 其锌含量最高; 大蒜、苋菜、菜花、西兰花、莼菜、云架豆、紫贝天葵、荷兰豆、甜菜、生菜、苗 (芽) 菜、西葫芦、芥菜、马铃薯、空心菜和菜心为 II 类, 其锌含量稍低; 其余为 III 类, 锌含量最低 (图 3)。Spearman 分析表明, 菜地土壤锌含量与蔬菜锌含量没有显著相关性 ($R = 0.003$, $P = 0.967$)。



注: 均值序列为蔬菜锌含量的 Box-Cox 均值的自大而小序列

图 3　基于蔬菜中锌 Box-Cox 均值的层级聚类分析结果

Fig. 3　Hierarchical cluster analysis based on Box-Cox means of Zn concentrations in vegetables from Beijing

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

2.3 不同来源的蔬菜锌含量差异

表 3 的结果显示，经过 Box-Cox 转换后，本地产蔬菜（$\lambda = 0.31$）和外地产蔬菜（$\lambda = -0.50$）锌含量数据基本符合正态分布（外地产蔬菜锌含量经过转换后符合弱正态分布）。统计分析表明，本地产蔬菜锌含量显著低于市售外地产蔬菜（$P = 0.009$）。正态检验表明，北京市裸露地和设施蔬菜锌含量数据经 Box-Cox 转换（$\lambda = 0.34$）后符合正态分布，但二者差异不不显著（$P = 0.314$）（表 4）。

表 3 不同蔬菜产地和不同栽培条件下蔬菜的锌含量比较

Tab. 3 Comparison of Zn contents in vegetables produced from Beijing and other provinces of China, and cultured under field conditions and greenhouse

蔬菜区域来源		n	蔬菜锌含量（mg/kg，鲜重）				蔬菜锌含量 Box-Cox 转换结果	
			范围	中值	平均值(标准差)	P_{S-W}	平均值(标准差)	P_{S-W}
蔬菜产地	本地产	316	0.005～16.0	2.16	2.92 (2.25)	0.000	2.38 (2.5)	0.965
	外地产	86	1.07～25.6	2.55	3.87 (3.97)	0.000	2.56 (1.54)	0.003
栽培条件	裸露地	224	0.005～25.6	2.32	3.26 (3.01)	0.000	2.64 (2.63)	0.196
	设施栽培	178	0.062～16.0	2.18	2.92 (2.22)	0.000	2.45 (2.43)	0.919

2.4 不同蔬菜锌富集系数的差异

蔬菜锌的富集系数是指植物中锌含量与土壤中锌含量的比值，它可以大致反映蔬菜在相同土壤锌含量条件下植物对锌的吸收能力。锌富集系数越小，则表明其吸收锌的能力越差，抗土壤锌污染的能力则较强。蔬菜锌的富集系数符合 Box-Cox 正态分布(表 4)。从其

表 4 北京市几种主要蔬菜锌的富集系数

Tab. 4 Bioconcentration factors (BCF) of Ni in major vegetables collected from farms of Beijing

蔬菜品种及类别	n	蔬菜锌的富集系数				Box-Cox 转换结果	
		均值（标准差）	中值	范围	P_{S-W}	均值（标准差）	P_{S-W}
大白菜	22	0.053 (0.029)	0.050	0.006 - 0.144	0.02	0.048 (1.21)	0.16
大葱	17	0.030 (0.018)	0.026	0.006 - 0.073	0.47	0.026 (1.19)	0.93
小白菜	17	0.039 (0.021)	0.033	0.016 - 0.081	0.07	0.035 (1.18)	0.07
叶菜类	56	0.041 (0.025)	0.042	0.006 - 0.144	0.00	0.037 (1.20)	0.55
根茎类（萝卜）	13	0.053 (0.062)	0.033	0.016 - 0.247	0.00	0.042 (1.30)	0.01
辣椒	16	0.035 (0.039)	0.024	0.002 - 0.165	0.00	0.026 (1.29)	0.46
云架豆	18	0.077 (0.036)	0.077	0.008 - 0.137	0.94	0.071 (1.23)	0.24
西红柿	8	0.010 (0.007)	0.009	0.002 - 0.024	0.40	0.009 (1.14)	0.99
冬瓜	4	0.007 (0.005)	0.006	0.002 - 0.012	0.68	0.006 (1.12)	0.80
黄瓜	11	0.021 (0.013)	0.021	0.006 - 0.051	0.32	0.019 (1.16)	0.84
茄子	11	0.036 (0.045)	0.024	0.0001 - 0.149	0.00	0.022 (1.40)	0.97
瓜果类	68	0.040 (0.04)	0.026	0.0001 - 0.165	0.00	0.028 (1.33)	0.23
特菜类①	12	0.023 (0.022)	0.014	0.002 - 0.079	0.01	0.018 (1.23)	0.45
全部蔬菜	149	0.040 (0.037)	0.031	0.0001 - 0.247	0.00	0.031 (1.28)	0.91

①包括芥菜、黑果、软化菊苣、长琪、香葱、京舟一号、白凤、金珠和蕃杏等

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

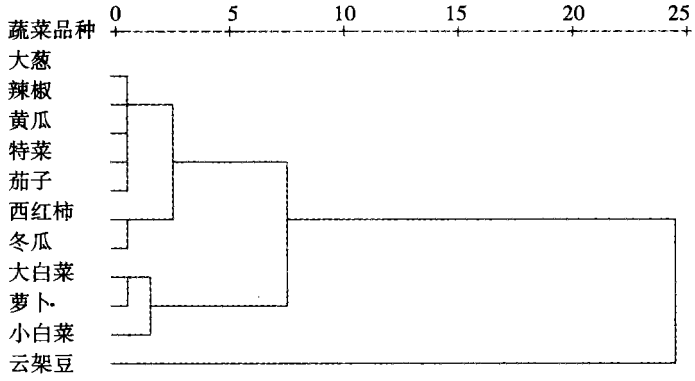


图 4　基于蔬菜锌富集系数 Box-Cox 均值的层级聚类分析结果

Fig. 4　Hierarchical cluster analysis on Box-Cox means of BCF of Zn concentrations in vegetables from Beijing

Box-Cox 均值为基础的层级聚类分析结果来看，云架豆的富集系数最高；大白菜、小白菜和萝卜次之；而大葱、辣椒、黄瓜、茄子、西红柿和冬瓜等的蔬菜锌富集系数较低，即使种植在土壤锌含量稍高的菜地中，其锌含量也可保持在较低的水平（图 4）。

2.5　北京市居民蔬菜锌摄入量的健康风险分析

据推算，北京市人均蔬菜消费量约为 1.6 kg/（人·d）[5]。结合各种蔬菜占北京市蔬菜总量的百分比所确定的蔬菜样本数和各种蔬菜锌含量的 Box-Cox 均值（表 2）等参数，按照方程（2）所示的方法计算出北京市居民从蔬菜中摄入锌的量为 4.04 mg/（人·d）。

锌是人体必需的微量元素。FAO/WHO[2]和 EPA[31]暂定的每人每日膳食中锌的需要量为 0.3 mg/（kg·d）。FAO/WHO 暂定的人体对锌最大允许量为 1 mg/（kg·d）。EPA 规定的无作用剂量或未观察到效应的最大剂量（NOAEL）为 0.91 mg/（kg·d）。以成年人平均体重 60 kg 计，北京市居民从蔬菜中摄取的锌约占锌需求量的 22.4%，占锌允许摄入量的 6.7%（FAO/WHO）和 7.4%（EPA）。在锌的来源中，植物锌约占 76%；而在植物锌中，蔬菜锌是其主要组成部分[32]。照此推断，北京市居民锌摄入水平较低，应引起关注。

从农业生产的角度来看，我国土壤缺锌比较普遍[33]。根据第二次全国土壤普查的资料，我国有 0.49×10^8 hm^2 耕地缺锌，占总耕地面积的 51.1%[34]。缺锌土壤的分布与石灰性土壤的分布模式基本相同[35]。在中国北方的碱性土壤中，作物缺锌问题比较突出，水稻、豆类、小麦和玉米等都需要施用锌肥[1]，合理的施用锌肥能使蔬菜平均增产 15%～25%，而且还能改善蔬菜的品质[26][36]。

从人体健康角度来看，我国的人体缺锌问题也比较突出。全国约有 30%的孕妇和 40%的儿童处于缺锌状态[32,37]。有研究指出，低锌的地球化学环境是诱发北京市房山区胎儿神经管畸形较高的重要因素之一[38]。北京市儿童缺锌比例较大[39,40]，尤其是四岁以下的儿童缺锌比例更高（约占 65%～86%）[40]。

本文的调查研究表明，北京市蔬菜的锌平均含量远低于我国《食品中锌限量标准》[29]，极少发现蔬菜锌超标问题。从农业生产和人体健康的角度来看，北京市菜地土壤和人体主要表现为缺锌，而不是锌污染。因此，对北京市来说，目前更多的是要关注其土壤和蔬菜锌含量偏低的问题。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

3 结论

(1) 与北京市土壤锌背景值相比，北京市菜地土壤的锌含量偏高。叶菜类蔬菜锌含量显著高于瓜果类蔬菜，其余各类型蔬菜之间的锌含量差异均不显著。北京市售外地产蔬菜的锌含量显著高于本地产蔬菜，而裸露地蔬菜与设施蔬菜相比锌含量差异不显著。云架豆富集系数最高，大白菜、小白菜和萝卜次之，而大葱、辣椒、黄瓜、茄子、西红柿和冬瓜等的蔬菜锌富集系数较低，其抗锌污染能力最强。

(2) 北京市各种蔬菜的锌含量均低于我国《食品中锌限量卫生标准》，居民从蔬菜中摄入锌的量为 4.04 mg/ (人 ·d)。蔬菜锌对北京市居民不会构成健康风险，而更值得关注的是其缺锌问题。

参考文献:

[1] 陈怀满，林玉锁，韩凤祥，等. 土壤 - 植物系统中的重金属污染. 北京：科学出版社，1996.

[2] 杨惠芬，李明元，沈文. 食品卫生理化检验标准手册. 北京：中国标准出版社. 1998，121～126.

[3] 朱广伟，陈英旭，田光明. 污水污泥土地投放重金属的环境效应研究进展. 生态学杂志，2003，22(4)：49～54.

[4] 陈同斌，李艳霞，金燕，等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响. 生态学报，2002，22(5)：644～649.

[5] 陈同斌，宋波，郑袁明，等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析. 地理学报，2006，61(3)：297～310.

[6] 陈同斌，宋波，郑袁明，等. 北京市菜地土壤和蔬菜镍含量及其健康风险分析. 自然资源学报，2006，21(3)：39～52.

[7] 宋波，陈同斌，黄泽春，等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险分析. 环境科学学报，2006，26. 待刊

[8] 宋波，陈同斌，郑袁明，等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析. 环境科学学报，2006，26. 待刊

[9] 郑袁明，宋波，陈同斌，等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险. 自然资源学报，2006，21(1)：64～72.

[10] 郑袁明，陈同斌，郑国砥，等. 北京市不同土地利用方式下土壤铬和镍的积累. 资源科学，2005，27(6)：162～166.

[11] 郑袁明，陈同斌，陈煌，等. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累. 地理学报，2005，60(5)：791～797.

[12] 郑袁明，罗金发，陈同斌，等. 不同土地利用方式对土壤镉积累的影响. 地理研究，2005，24(4)：542～548.

[13] 郑袁明，陈同斌，郑国砥，等. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响 - 以北京市为例. 自然资源学报，2005，20(5)：690～696.

[14] 陈同斌，郑袁明，陈煌，等. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征. 地理研究，2005，24(2)：229～235.

[15] 杨军，郑袁明，陈同斌，等. 中水灌溉下土壤中重金属的垂直迁移及其对浅层地下水的污染风险. 地理研究，2006，25(3)：449～456.

[16] 杨军，陈同斌，郑袁明，等. 北京市凉凤灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析 ——兼论土壤重金属有效性测定指标的可靠性. 环境科学学报，2005，25(12)：1661～1668.

[17] 杨军，郑袁明，陈同斌，等. 北京市凉凤灌区土壤重金属的积累及其变化趋势. 环境科学学报，2005，25(9)：1175～1181.

[18] 陈煌，郑袁明，陈同斌. 面向应用的土壤重金属信息系统(SHMIS) - 以北京市为例. 地理研究，2003，22(3)：272～280.

[19] 胡克林，张凤荣，吕贻忠，等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征. 环境科学学报，2004，24(3)：463～468.

[20] 王学军，席爽. 北京东郊污灌土重金属含量的克立格插值及重金属污染评价. 中国环境科学，1997，17(3)：225～228.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

[21] 北京市统计局. 北京统计年鉴. 北京: 中国统计出版社,2002. 72, 173.
[22] EPA. Acid Digestion of Sediments Sludge and Soils. USEPA 3050B. http://www.epa.gov/SW-846/pdfs/3050b.pdf. 1996. 1～12.
[23] Zhang C S, Zhang S. A robust-symmetric mean: a new way of mean calculation for environmental data. GeoJournal, 1995, 40(1/2): 209～212.
[24] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究. 环境科学, 2004, 24(1): 117～122.
[25] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准(GB15618～95). 北京: 中国标准出版社,1995.
[26] 汪洪, 刘新保, 褚天铎, 等. 锌肥对作物产量、子粒锌及土壤有效锌含量的后效. 土壤肥料, 2003,(1): 3～6,9.
[27] 高明, 车福才, 魏朝富, 等. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 11～17.
[28] 郭观林, 周启星. 中国东北北部黑土重金属污染趋势分析. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(3): 386～392.
[29] 中华人民共和国卫生部. 食品中锌限量卫生标准(GB 13106-1991). 北京: 中国国家标准出版社,1991.
[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 GB18406.1-2001. 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求. 2001.
[31] EPA. Toxicological Review of Zinc and Compounds (Cas No. 7440-66-6) In: Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0426-tr.pdf. 2005.
[32] 辛素贤. 国内锌营养研究的新进展. 中国公共卫生, 1998, 14(12):755～756.
[33] 刘铮. 中国土壤微量元素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996. 177～203.
[34] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势. 环境科学学报, 2003, 23(5): 561～569.
[35] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30～37.
[36] 刘红霞, 张会民, 王定勋, 等. 氮、锌配施对夏玉米的增产效应研究. 吉林农业大学学报, 2004, 26(5): 538～541.
[37] 王旗, 李文杰, 朱明君, 等. 学龄前儿童发锌、发钙水平及相关因素分析. 中国学校卫生, 1999, 20(5): 325～326.
[38] 葛晓立, 曾太文. 影响北京房山地区胎儿神经管畸形的地球化学因素. 长春科技大学学报, 1999, 29(1): 78～81.
[39] 林晓明, 田伟, 郭燕梅, 等. 北京山区学龄儿童机体锌状况及血清锌水平分析. 中国儿童保健杂志, 2002, 10(4): 227～229.
[40] 张完白, 王彤文, 李赛君, 等. 700 例儿童发中锌钙镁铁铜的测定结果及统计分析. 广东微量元素科学, 1997, 4(11): 23～28.

A survey of zinc concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risk

HUANG Ze-chun[1], SONG Bo[1,2], CHEN Tong-bin[1], ZHENG Yuan-ming[1], YANG Jun[1,2]
(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To assess the human health risk posed by elevated concentrations of zinc in vegetables, and to identify pollution-tolerant vegetable varieties, a large scale survey of zinc levels in soils and vegetables planted or sold in Beijing was conducted. Fifty-two soil samples were collected from gardens and fields used to grow vegetable plants. In addition, 97

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

varieties of 402 fresh vegetable samples were obtained from vegetable stalls, supermarkets and wholesale outlets. Zinc concentrations were measured using flame atomic absorption spectrometry.

Zinc concentrations in soils ranged from 24.9 to 307.5 mg kg^{-1}, with arithmetic, median, geometric and Box-Cox means of 79.29, 63.81, 70.7 and 68.01 mg kg^{-1}, respectively. Compared with the background zinc concentrations of soils from Beijing, there appeared a significant accumulation of zinc in soils collected from fields that produced vegetables. Zinc concentrations in the edible plant portions ranged from 0.005 to 25.6 mg kg^{-1} fresh weight, with arithmetic, median and Box-Cox means of 3.11, 2.24 and 2.55 mg kg^{-1} fresh weight, respectively. In all of the samples and vegetable varieties, zinc was less than the Tolerance Limit of Zinc in Foods (TLCF) of 100 mg kg^{-1} fresh weight for pulse and 20 mg kg^{-1} for other vegetables. The TLCF is the maximum permissible concentration of zinc in vegetables that will be consumed by people. The highest level of zinc detected in a vegetable plant was 25.6 mg kg^{-1}, which was measured in a green soybean sample. Statistical analysis showed that the zinc concentration in leaf vegetables was significant higher than that of gourd and fruit vegetable. And the zinc concentration in vegetables from other places of China was significantly higher than the concentration of local vegetables, but there was no significantly difference between field-grown vegetables and those planted in a greenhouse.

Results of hierarchical cluster analysis on the zinc bioconcentration factor (BCF) in vegetables indicated that the plants sampled could be separated into three groups based on BCF. Beans round trellis (*Vigna unguiculata*), the first group, had the highest BCFs, and the following is the second group, including Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*), Pakchoi (*Brassica chinensis*) and radish (*Raphanus*), had higher zinc BCFs while Chinese green onion, chili (*Capsicum annuum*) cucumber (*Cucumis sativus*), eggplant (*Solanum* sp.), tomato (*Lycopersicon esculentum*) and wax gourd (*Beninacasa hispida*) had lower zinc BCFs.

The average ingestion rate of zinc from vegetables was 4.04 mg/individual/day for people of Beijing, making up 22.4% of the quantity demanded (18 mg/individual/day) and 7.4% of No-Observed-Adverse Effect-Level (NOAEL). Consuming vegetables with elevated zinc concentrations may not pose a health risk to local residents.

Key words: Zinc; Beijing; vegetables; soil; bioaccumulation; human health risk; pollutant-resistant plants

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n