DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2015.05.024

黑龙江海伦市农田土壤重金属与磷素含量的特征研究①

陈玉东[1,2]，周健民[2]，邢 璐[2]，冯彦房[3]，杭小帅[1]，王火焰[2*]

(1 环境保护部南京环境科学研究所，南京 210042；2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所)，南京 210008；3 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所，南京 210014)

摘 要：海伦市是以农业为主导产业的黑龙江省县级市，为了解该市土壤重金属及磷素现状，2008 年采集了农田耕层土样 95 个、亚耕层土样 95 个和土壤剖面分层土样 92 个，分析了其中的 Cu、Zn、Cr、Ni 等重金属全量和磷的含量。在前期结果的基础上，2009 年又选取 8 个土壤剖面来进一步研究磷在垂直深度上的分布特征。结果表明，该市耕层土壤重金属含量总体较低，与松嫩平原土壤元素背景值相比较，出现一定程度的富集。与第二次土壤普查结果相比较，有效磷的富集趋势明显。从空间分布图上可以看出总磷和有效磷的分布与重金属的分布呈现了完全不同的趋势，重金属主要来源可能来自土壤母质，化学磷肥对重金属的含量有一定影响，但不是主要因素。大量施加磷肥也是该地区有效磷大幅增加的主要原因之一。重金属和磷含量随着土层的加深都呈现先下降再上升的趋势，有效磷的含量在各发生层差异比较明显。进一步的磷剖面结果显示：有效磷和水溶磷含量总体趋势是随着深度的增加都先急剧下降，表层磷富集趋势明显，并有向下迁移的趋势，随后呈现含量稳定、缓慢上升或者巨大波动 3 种趋势，这与耕作历史、耕作方式及所种植的作物类型等有关。

关键词：重金属；磷；空间分布；剖面

中图分类号：X 82

重金属在土壤中累积可直接和间接地影响到人体的健康安全，土壤重金属污染已成为环境科学与土壤科学等研究领域的热点[1–3]。当前，在经济较为发达地区土壤重金属研究较多，由工业引起的土壤重金属污染也相对比较严重[4–5]。但是农业生产对土壤重金属的污染也不容忽视，含重金属的化肥和农药的不合理施用、养殖业的发展，也增加了土壤对重金属等污染物的富集[6]。如张民等[7]研究发现，我国菜园和粮田中，随着耕作历史的延长，表层土壤的 Zn、Cu 含量有增加趋势。长期且过量地施用磷肥，不仅使部分农田重金属含量增加；更为严重的是，施入的磷肥远远超过了植物生长的需求，农田磷素不断积累，这不仅造成了资源的浪费也为面源污染埋下了伏笔。

海伦市是以农业为其主导产业的东北城市，土壤肥沃，是我国重要的商品粮基地，土壤环境质量直接影响其粮食生产安全。当地重金属土壤背景值较低，远低于全国土壤背景值，近期也有学者对该地区重金属进行了研究，结果并不完全一致，但是总体来讲土壤重金属的污染较轻[8–10]。笔者此前已经通过综合污染指数法对该地区耕层土壤重金属进行评价，结果显示总体污染较轻[11]，但没有进一步研究垂直面上重金属的分布情况，对重金属的可能来源也没有进行比较详细的探讨。随着磷肥的大量施用，该地区农田的磷素含量是否已经快速增长，超过了环境的承载范围，是否对土壤中重金属的含量有影响，尚不清楚。因此，本研究对海伦市重金属和磷素的含量及其时空变化特征进行全面调查，并探讨重金属与磷之间可能的相互关系，为当地的粮食安全生产及环境保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

海伦市位于黑龙江省中部 (46°58′ ~ 47°52E′，126°14′ ~ 127°45′N)，全境从东北到西南 150 km，南北 78 km，面积 4 551 km^2。属大陆性季风气侯，冬季漫长寒冷，夏季短促温润。年平均气温为 1℃ ~

①基金项目：中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-09-02)、环保公益性行业科研专项(201309035)、中央级公益性科研院所基本科研业务专项和国家自然科学基金青年基金项目(41401345)资助。

* 通讯作者(hywang@issas.ac.cn)

作者简介：陈玉东(1984—)，男，江苏响水人，博士，助理研究员，主要从事农田磷素循环及农村面源污染控制研究。E-mail: dongzi1225@sina.com

2℃，最高 37.7℃，最低 –40.3℃，年降水量为 500 ~ 600 mm 之间。地貌为由小兴安岭山地向松嫩平原的过渡地带，属松嫩平原的一部分，植被类型有森林、灌丛、草甸和沼泽。母质大部分为河湖相冰水沉积物。境内无高山峻岭，除少量残丘外，大部分为波状起伏的高平原，但坡度均不大，且耕地连片。地势从东北到西南，由低丘陵、高平原、河阶地、河漫滩依次呈阶梯形逐渐降低。海拔高度最高 471 m，最低 147 m，一般为 200 m 上下。同肯河、克音河等 5 条河流横贯东西，5 座大中型水库和 30 多座小型水库分布全市。土壤类型以黑土为主，占土地总面积 63.4%，是世界三块黑土地之一，俗有“粮仓”之称[12]，主要种植植物为大豆和玉米。

1.2 样品采集

考虑到海伦市土壤类型及其耕作制度相对较为单一，采用随机布点采样，每个土种至少包含一个采样点，采样点基本覆盖整个海伦市。土壤耕层(0 ~ 20 cm)和亚耕层(20 ~ 40 cm)采样地点分布如图 1 所示，所有土壤样品采集地全部为耕地。耕层和亚耕层土样于 2008 年 9 月采集，各采集 95 个土样，每个采样点用 GPS 定位，详细记录周围环境及耕作历史。耕层和亚耕层土样均采用多点混合法采样，采用“梅花”型方式各在周边采取 5 个子样品，混合均匀后按四分法获 1 kg 左右的样品，装入布袋。同时，根据土壤类型及实际采样周边环境，在以上采样点中选取 25 个点，采集土壤剖面分层样，每一剖面由 3 ~ 4 个分层(发生层)土样组成，共采集 92 个分层土样。为了了解磷的纵向分布特征，根据前期分析结果，于 2009 年 10 月，在原采样点中选取 8 个有代表性的点位，按 10 cm 间隔采集剖面分层样品，每一剖面各采集 12 个分层样品，共计 96 个样品。所有土样经室内自然风干，剔除植物残体和石块，研磨，分别过 10 目和 100 目筛，保存以备用。

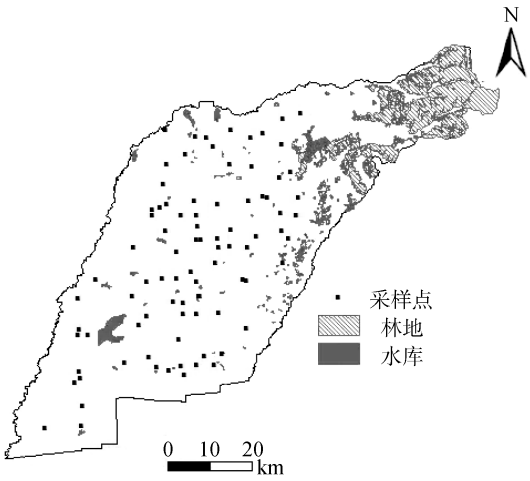


图 1 采样点分布图
Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 分析方法

土壤重金属 Cu、Zn、Cr、Ni 全量及总磷采用 HNO_3-$HClO_4$-HF-HCl 混酸消化[13]，采用高频耦合电感等离子体原子发射光谱法(ICP-AES Thermo Elemental)[14–16]测定待测液中各元素。土壤水溶磷采用水土比 1∶10 震荡 1 h 提取；土壤有效磷采用 0.5 mol/L 的 $NaHCO_3$ (pH 8.5) 浸提 (土水比 1∶20)，水溶性磷和有效磷提取液中磷采用钼锑抗比色测定。所用试剂均为优级纯，整个土壤分析过程中均以空白样和国家地球化学标准物质 GSS-3 标准样品进行质量控制。数据采用 Excel 和 SPSS 统计软件进行处理。

2 结果与讨论

2.1 耕层、亚耕层土壤重金属含量的特征

研究区内耕层、亚耕层土壤中 4 种重金属含量如表 1 所示，各重金属的含量总体较低。其中，耕层土壤 Cu 的平均含量 22.3 mg/kg，变化范围为 16.4 ~ 46.4 mg/kg；Zn 的平均值为 61.69 mg/kg，变化范围为 42.5 ~ 77.8 mg/kg；Cr 的平均值为 58.5 mg/kg；Ni 的平均值为 25.7 mg/kg。亚耕层土壤中重金属含量略高于耕层，Cu 的平均值为 22.3 mg/kg，变化范围为 17.9 ~ 30.8 mg/kg；Zn 的平均值为 62.5 mg/kg，变化范围为 49.0 ~ 96.7 mg/kg；Cr 的平均值为 58.8 mg/kg，变化范围为 46.9 ~ 155.3 mg/kg；Ni 的平均值为 26.5 mg/kg，变化范围为 19.5 ~ 71.5 mg/kg。与广州、上海等其他地区[17–19]相比，海伦地区土壤重金属总体含量较低。与松嫩平原背景值相比较，耕层土壤中 4 种金属的含量都有一定程度的增加，其中 Cr 和 Cu 的增幅最大，分别增加了 37.6% 和 25.3%，但与国家土壤环境质量标准的二级标准进行比较，没有达到污染水平。

变异系数可反映各采样点间观察对象的平均变异程度，在一定程度上可以描述该元素污染状况的特征，变异系数越大，说明受到外界影响越大。按照变异系数的划分，CV<10%，属于弱变异性；CV 10% ~ 100%，属于中等变异；CV>100%，属于强变异性。本研究中耕层土壤各重金属元素变异系数变化范围为 9.1% ~ 17.7%。亚耕层土壤各元素变异系数变化范围为 10.4% ~ 22.0%，除了耕层土壤中 Zn 属于弱变异性，其他的都属于中等变异程度，说明土壤中的金属元素受到了外界一定程度的影响。

表 1　海伦市农田耕层、亚耕层土壤中重金属含量的统计结果
Table 1　Contents of heavy metals of topsoil and subsoil in farmland of Hailun City

耕作层	统计项目	Cu	Zn	Cr	Ni
耕层	均值 (mg/kg)	22.3	61.5	58.5	25.7
	标准差	3.95	5.60	10.1	2.78
	最小值 (mg/kg)	16.4	42.5	40.4	18.2
	最大值 (mg/kg)	46.4	77.8	97.9	34.1
	变异系数(%)	17.7	9.1	17.3	10.8
	松嫩平原背景值 (mg/kg)	17.8	52.1	42.5	23.7
亚耕层	均值 (mg/kg)	22.3	62.5	58.8	26.5
	标准差	2.31	7.07	12.9	5.29
	最小值 (mg/kg)	17.9	49.0	46.9	19.5
	最大值 (mg/kg)	30.8	96.7	155.3	71.5
	变异系数(%)	10.4	11.3	22.0	19.9

2.2　耕层、亚耕层土壤磷含量的特征

海伦市农田耕层、亚耕层土壤中磷的含量如表 2 所示，耕层土壤中总磷的平均值为 873 mg/kg，最大值高达 1 960 mg/kg。亚耕层土壤中总磷平均值含量为 914 mg/kg，含量变化范围为 423 ~ 1 825 mg/kg。耕层土壤和亚耕层土壤中总磷平均含量相差不大，但耕层、亚耕层的总磷都达到了中等变异。黑土耕层有效磷含量非常高，平均值达到 39.60 mg/kg，最大值达到了 135 mg/kg。亚耕层土壤中有效磷含量的平均值为 16.43 mg/kg，最小值为 4.08 mg/kg，最大值为 113.9 mg/kg。耕层与亚耕层中有效磷含量比值的平均值高达 3.15。极高的耕层有效磷含量及耕层/亚耕层值说明该地区土壤中磷有比较明显的富集趋势。耕层与亚耕层有效磷含量的相关分析表明，两者有极显著的相关性($r = 0.569^{**}$)，说明有效磷存在向下迁移的可能。第二次土壤普查(1980 年)结果表明，当时该地区的土壤有效磷平均含量为 22.64 mg/kg。可见，目前研究区土壤有效磷比 1980 年增长了 65%，有一定的累积趋势。较高的有效磷含量及其较大的变异系数，说明不同耕作管理措施(施肥方式和结构)等人为因素的干扰对有效磷的影响很大。

表 2　海伦市农田耕层、亚耕层土壤中磷含量**(mg/kg)**
Table 2　Phosphorus contents of topsoil and subsoil in farmland of Hailun City

磷	耕作层	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数(%)
总磷	耕层	873	256	410	1960	29.3
	亚耕层	914	253	423	1825	27.7
	耕层/亚耕层	1.01	0.3	0.39	2.35	30.0
有效磷	耕层	39.60	20.85	10.24	134.50	51.9
	亚耕层	16.43	14.99	4.08	113.90	92.5
	耕层/亚耕层	3.15	1.97	0.52	9.96	62.6

根据全国第二次土壤普查对土壤养分的分级标准，将土壤有效磷分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ 5 个等级，分别代表很高、高、中、低、很低等磷素状况(表 3)。从耕层土壤有效磷构成来看，Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ级的田块分别占 40%、50% 和 10%，无Ⅳ级和Ⅴ级的田块。总体而言，海伦地区土壤有效磷的等级较高，Ⅱ级所占的比例最大，其次为Ⅰ级，Ⅰ和Ⅱ等 2 个等级所占的比例总和约 90%。一般耕层土壤有效磷平均含量在 5 ~ 30 mg/kg 之间[20]，而该地区的有效磷平均含量高达 40 mg/kg，明显高于其他地区，大于 40 mg/kg 的样点数占总样点比例接近 40%。这是因为：一方面，黑土非常肥沃，开垦年限较短，本身含有较高的磷素；另一方面，黑土区早春低温导致磷有效性较低，需磷量较其他区域高，导致磷肥的大量施用[20]。

2.3　土壤重金属和磷空间分布特征及来源分析

ArcGIS 是解释空间分布和环境监测的重要工具[21]，克里格插值法是对离散变量进行连续无偏插值的可靠方法，插值结果可以直观地呈现出元素的空间分布特征[22]。通过 ArcGIS 的插值法得出海伦土壤耕层重金属及磷的空间分布图 (图 2)。土壤中 Cu、Cr 含量分布规律极其相似，在西南部含量比其他区域高，土壤中 Cu 和 Cr 在中部有些岛状的高浓度点，

表 3 耕层土壤有效磷的等级划分
Table 3 Grade classification of available P in topsoil

项目	I	II	III	IV	V
有效磷含量(mg/kg)	>40	20 ~ 40	10 ~ 20	5 ~ 10	<5
样点数	40	50	10	0	0
比例(%)	40.0	50.0	10.0	0.0	0.0

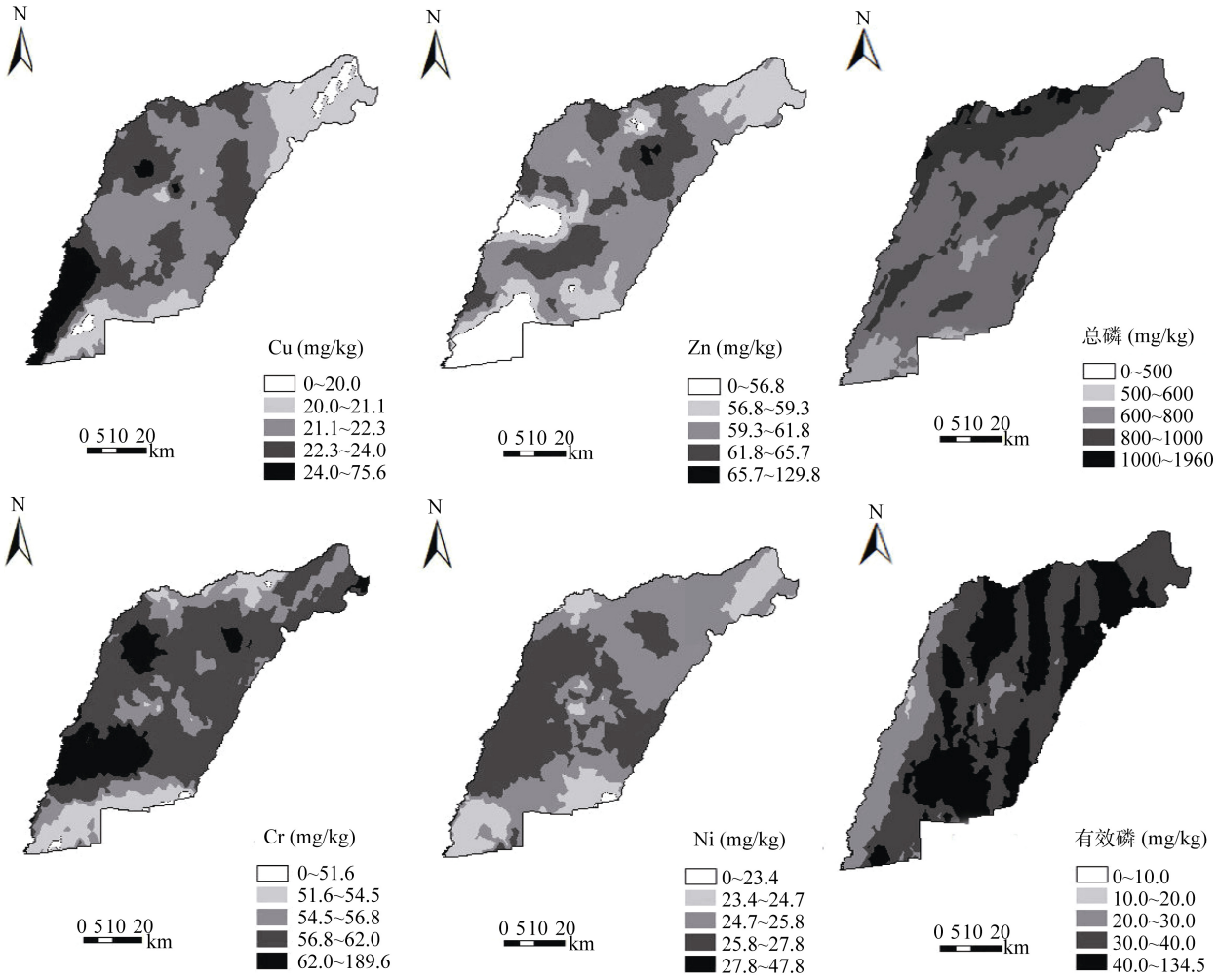


图 2 耕层土壤重金属及磷的空间分布
Fig. 2 Content spatial distributions of heavy metals and phosphorus in topsoil

可能有小范围的污染点源；Zn 在中西部以及南部地区含量较低，中东部有少量低含量点。Ni 的含量分布相对均匀，中西部含量略高一些，南部和北部的含量相对较低一些；总体上，海伦地区重金属含量西部比东部要高，南部比中部和北部高。

海伦市耕层土壤总磷在北部的含量相对较高，除了中部有部分低浓度点，其他的低浓度点都集中在南部地区。土壤有效磷在西部的含量偏低，中东部的含量偏高，有效磷含量高的区域基本上呈现条状分布在中东部。耕层总磷能反映该地区的磷储备情况，而有效磷可以反映作物实际可利用的养分状况，更具有实际意义。海伦市土壤有效磷遵循随质地由砂至黏含量相应增加的基本规律，含量较高的地区主要分布于土壤粉粒含量较高的地区。从空间分布图上可以看出总磷和有效磷的分布与重金属的分布呈现了完全不同的趋势，说明磷的施用对土壤中重金属含量的提高无显著影响，重金属主要来源可能来自土壤母质或者其他外源物质。

从研究土壤中重金属全量之间及与磷的相关性可以推测它们的来源是否相同，若含量有显著的相关性，说明有相同来源的可能性较大。Cu 和 Cr、Ni，Cr 和 Ni 之间有很好的相关性(表 4)，说明这些金属之间具有相同来源的概率较大，可能与成土母质相关，也有可能来之相同的污染源，以复合型污染存在；

表 4　重金属和不同形态磷之间的相关性
Table 4　Correlation coefficients between contents of heavy metals and phosphorus

	Cu	Zn	Cr	Ni	总磷
Zn	0.086				
Cr	0.278**	0.078			
Ni	0.317**	0.107	0.548**		
总磷	0.137	0.127	–0.001	–0.218*	
有效磷	–0.003	0.068	–0.104	–0.112	0.049

注：* 表示相关性达到 $P < 0.05$ 显著水平，** 表示相关性达到 $P < 0.01$ 显著水平。

总磷除了与 Ni 有一定的显著性负相关外，与其他元素没有显著相关性；有效磷与所有重金属都没有相关性，说明重金属与磷具有相同来源的可能性较小。农田重金属来源非常广泛，除了受成土作用外，工业影响及农业行为本身也会带入一定量的重金属。大量的化肥、农药及杀菌剂、除草剂的运用会造成某些元素的累积，因为这些化学试剂在原材料或者生产过程中都或多或少会带入一些重金属[2]。该地区重金属含量总体偏低，区域内没有大型的工业企业，来源于工业的重金属进入土壤的可能性较小。化学磷肥可能伴随着一些重金属，但是本研究中磷与重金属之间几乎没有相关性，说明这些重金属主要来源于化学磷肥的可能性较小。重金属也可能来自有机肥，含有重金属的添加剂被广泛运用于养殖，高 Cu 高 Zn 的饲料，会刺激猪体内的微生物的生长和脂肪酶的分泌用以提高动物免疫力，增强疾病预防能力，大量的重金属以动物粪便形式排出，再经有机肥带入农田，造成土壤重金属累积。另外，海伦地区处于我国的东北地区，冬天气候寒冷，农村地区没有集中取暖，烧煤取暖也可以通过大气沉降的方式使土壤中的重金属含量增大[21]。该地区重金属含量及分布特征是成土母质与其他外界诸多因素共同影响的结果。该地区磷除了受土壤本身特性影响外，由于该地区特殊的气候条件，大量施加磷肥也是该地区有效磷大幅增加的主要原因之一。

2.4　不同土壤发生层中重金属及磷的分布特征

根据土壤发生学特征，将土壤剖面从上往下分成 A_1、A_2、B、C 4个发生层(表 5)。Cu 在前 3个发生层上含量是由高到低的，其中 A_1 最高(23.8 mg/kg)，最低为 B 层(20.9 mg/kg)，C 层的含量又上升，达到 22.2 mg/kg。Zn 和 Ni 的趋势很相似，A_1 层和 A_2 层含量没有差别，在 B 层含量稍微下降，然后在 C 层含量又上升，在 C 层的含量最高，Zn 最大含量值为 62.6 mg/kg，Ni 为 27.0 mg/kg。Cr 的 A_1 层含量略高于 A_2 层，B 层含量最低，为 51.4 mg/kg。总磷的含量在A_1 层略高于 A_2 层，随着深度的增加含量急剧下降，B 层和 C 层含量只有 860 mg/kg 左右。有效磷的含量在各层次差异比较明显，A_1 层含量高达 47.1 mg/kg，而 A_2 层只有 13.3 mg/kg，随着深度的增加含量升高，B 层为 15.7 mg/kg，C 层

表 5　不同发生层中重金属及磷含量
Table 5　Contents of heavy metals and phosphorus in different genetic layers

土壤发生层	项目	Cu	Zn	Cr	Ni	总磷	有效磷
A_1	平均值	23.8 a	61.7 a	58.9 a	25.5 a	963 a	47.1 a
	标准差	3.67	6.73	11.80	2.27	224	22.9
	变异系数(%)	15.4	10.9	20.0	8.91	23.3	48.8
A_2	平均值	21.9 ab	61.7 a	56.1 ab	25.4 a	939 a	13.3 c
	标准差	2.31	4.24	7.35	2.41	253	6.79
	变异系数(%)	10.6	6.9	13.1	9.5	27.0	51.2
B	平均值	20.9 b	57.8 a	51.4 b	24.2 a	859 a	15.7 bc
	标准差	3.53	7.03	6.24	4.67	268	8.38
	变异系数(%)	16.9	12.2	12.1	19.3	31.2	53.4
C	平均值	22.2 ab	62.6 a	56.9 ab	27.0 a	866 a	21.8 b
	标准差	3.37	4.44	6.72	4.85	260	10.27
	变异系数(%)	15.2	7.1	11.8	18.0	30.0	47.1

注：同列数据小写字母不同表示土壤发生层间差异达到 $P<0.05$ 显著水平。

为 21.8 mg/kg。总体而言，各指标含量随着深度的增加都呈现先下降再上升的趋势，除了有效磷，4 种重金属及总磷含量都是 B 层最低。4 种重金属各层次的含量变化范围较小，农田土壤没有明显富集的迹象。总磷在上两层土壤中含量较高，有效磷含量 A_1 层远高于其他 3 层，磷的富集趋势非常明显。

2.5 土壤剖面中有效磷和水溶磷的变化趋势

虽然该地区不同发生层总磷含量变化不大，但是有效磷的富集趋势比较明显。为了进一步了解磷在垂直状态的分布，我们根据 2008 年耕层土壤有效磷的含量结果，选取了代表不同含量范围的 8个点(2 个高值点、4 个中值点、2 个低值点)，在原相应采样点附近开挖剖面，分析了剖面中有效磷和水溶磷的分布。因为有效磷不仅是表征土壤供磷能力和确定磷肥用量的重要指标，同时也是反映农田磷环境风险的主要参数。水溶磷作为活性最强的磷形态，更能直观地反映磷在实际生产中对环境的影响。

从图 3 中可以看出，这 8 个剖面的有效磷和水溶磷含量总体趋势是随着深度的增加都先急剧下降，随后呈现含量稳定、缓慢上升或者巨大波动 3 种趋势。剖面 1 在 0 ~ 10 cm 处有效磷含量最高，随着深度的增加，含量也急剧下降，当到达 40 ~ 50 cm 时，含量最低，随后出现上升后又开始呈现缓慢下降趋势。剖面 2、剖面 3 和剖面 4 这 3 个剖面在前 30 cm 的规律极其相似，都是呈现直线型下降，但是 40 cm 以下，剖面 3 和剖面 4 的含量趋于稳定，没有太大的波动，剖面 3 含量在 15 mg/kg 左右，剖面 4 在 10 mg/kg 左右。但是剖面 2 的含量呈现巨大的波动性，呈现多次上升下降现象，含量变化范围从 26 mg/kg 到 64 mg/kg。这种剧烈变化说明剖面 2 受到了很大的干扰。剖面 5 和剖面 7 以及剖面 8 虽然 0 ~ 10 cm 处含量有一定差异，但是总体变化趋势比较一致，都是在前 20 cm 急剧下降，随后呈现一个缓慢的上升过程，不过剖面 5 在 60 ~ 70 cm 处有一个较高的值。剖面 6 在前 50 cm 也呈下降趋势，随后在 50 ~ 60 cm 处突然上升，然后再缓慢下降。

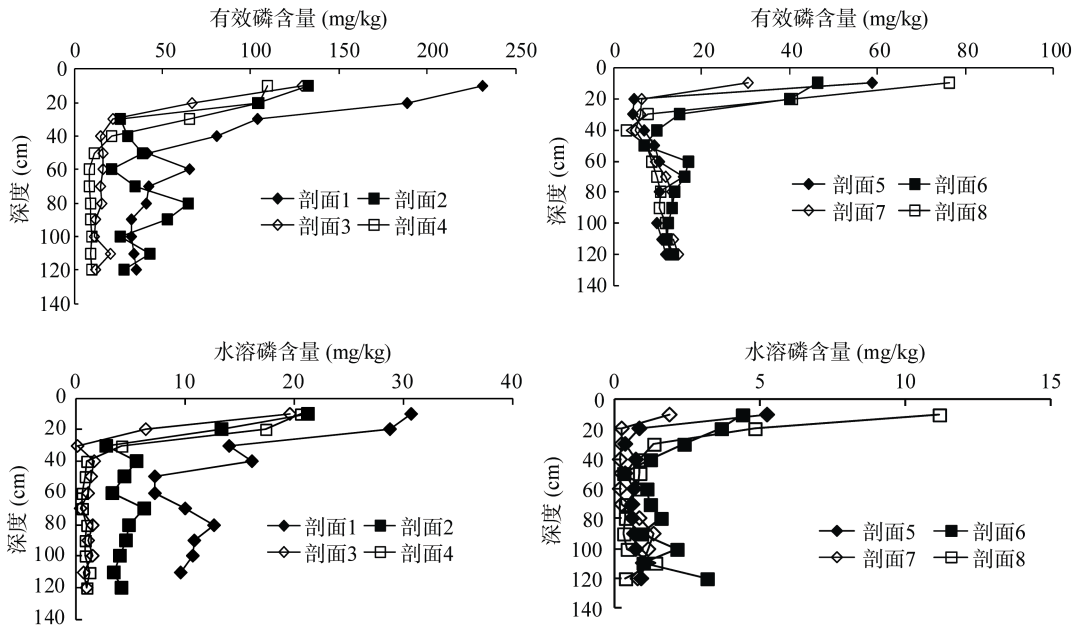


图 3 土壤剖面中有效磷和水溶磷的变化趋势

Fig. 3 Content distributions of available P and water soluble P in soil profiles

剖面 1 和剖面 2 的水溶磷含量趋势极为相似，都是在前 30 cm 急剧下降，随着深度的加大呈现一个波动状态。剖面 3、剖面 4 在前 30 cm下降，随后含量趋于稳定，保持在 1 mg/kg 左右。剖面 5 和剖面 8 趋势比较相似，在 0 ~ 20 cm 急剧下降，随后含量趋于稳定，不过剖面 8 在 100 ~ 110 cm 处有一个异常值。剖面 6 在 0 ~ 50 cm 含量呈现下降趋势，随后含量逐步上升，并且在 80 cm 以下出现了波动。剖面 7 水溶磷含量在 0 ~ 20 cm 快速下降，随后一直保持在一个较低的水平直到 60 cm 处，然后逐步上升到达 90 cm 处再下降。

上层磷富集趋势明显，并有向下迁移的趋势，只是不同剖面受到了外界影响的程度不同，表现出来的现象也不尽相同。剖面 1 所在田块靠近村庄，之前为农户家猪圈，后来覆土种粮，所以出现近地面层含量非常高，随着深度加深急剧下降，并且有一定波动

的现象。剖面 2 所在田块位于道路边，之前种植过大葱，大量施用羊粪作为有机肥，并且经过平整，所以各层次磷含量高而变化巨大。剖面 3 和剖面 4 中两种磷形态在离地表近的几个层次含量非常大并且变化也较大，随着深度的进一步加深，含量没有太大变化，说明只是近地面几层受到了人为的影响，这两个剖面所在田块为普通的大豆田，农户施用了大量的磷肥并且都采用的小型机械耕作，所以下层含量较低且变化不大。剖面 5、6、7、8 所在田块都是玉米田块，玉米的根系发育较大豆而言更加发达，能进入更深的土层吸收更多的磷。尽管大量磷肥的施入，近地面层的磷远远超过了玉米生长的需求，但是随着深度的加大，玉米仍需要吸收部分土壤中固有的磷，因此我们认为这几个剖面磷的含量呈现先下降后缓慢上升的趋势与所种植的作物类型有很大的关系。玉米秸秆中的全磷含量(1 150 mg/kg)是大豆秸秆中全磷含量(517 mg/kg)的 2 倍多，并且玉米的生物量比大豆大很多，随着作物的收割，玉米比大豆从农田带走的磷更多，也应证了这一观点。

3　结论

1) 虽然海伦地区的重金属含量与全国其他地区相比，相对较低，但是与松嫩平原背景值相比较，还是有一定程度的富集。发生层中各指标含量随着土层的加深都呈现先下降再上升的趋势，4 种重金属含量都是 B 层最低。重金属之间较好的相关性，说明它们来自相同源的概率较大。从空间分布图上可以看出总磷和有效磷的分布与重金属的分布呈现了完全不同的趋势，说明磷的施用对土壤中重金属含量的提高无显见影响。该地区没有大型的工业企业，化肥、有机肥、农药的施用以及燃煤等活动共同造成了该地区重金属的富集。

2) 与第二次土壤普查的结果比较，耕层土壤有效磷的富集趋势非常明显。有效磷的含量在各发生层中差异比较明显，A_1 层含量高达 47.1 mg/kg，而 A_2 层只有 13.3 mg/kg，随着深度的进一步增加，含量逐步升高。大量施加磷肥也是该地区耕层有效磷大幅增加的主要原因之一。进一步的磷剖面结果表明：有效磷和水溶磷含量的总体趋势是随着深度的增加都先急剧下降，说明表层磷富集趋势明显，并有向下迁移的趋势；随后呈现含量稳定、缓慢上升或者巨大波动 3 种趋势，这与耕作历史、耕作方式及所种植的作物类型等有很大的关系。

参考文献：

[1] Abderahman N, Abu-Rukah YH. An assessment study of heavy metal distribution within soil in upper course of Zarqa River Basin/Jordan[J]. Environmental Geology, 2006, 49(8): 1 116–1 124

[2] Huang SS, Liao QL, Hua M, Wu XM, Bi KS, Yan CY, Chen B. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong District, Jiangsu Province, China[J]. Chemosphere, 2007, 67(11): 2 148–2 155

[3] Morton-Bermea O, Hernandez-Alvarez E, Gonzalez- Hernandez G, Romero F, Lozano R, Beramendi-Orosco LE. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 101(3): 218–224

[4] Lim HS, Lee JS, Chon HT, Sager M. Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned songcheon au-ag mine in Korea[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, 96(2–3): 223–230

[5] Hang XS, Wang HY, Zhou JM, Ma CL, Du CW, Chen XQ. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa*) in a typical area of the Yangtze River Delta[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(8-9): 2 542–2 549

[6] Micó C, Recatalá L, Peris M, Sánchez J. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis[J]. Chemosphere, 2006, 65(5): 863–872

[7] 张民, 龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 85–93

[8] 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 巴音. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987

[9] 雷国平, 黄金荣, 宋戈, 白明华, 王杨. 黑龙江省黑土区重金属元素对黑土质量变化的影响与评价——以哈尔滨市和海伦市黑土区为例[J]. 农业技术经济, 2008(4): 101–106

[10] 王铁宇, 汪景宽, 周敏, 边振兴, 关连珠, 颜丽. 黑土重金属元素局地分异及环境风险[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 272–276

[11] 陈玉东, 王火焰, 周健民, 赵永存. 黑龙江省海伦市农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 土壤, 2012, 44(4): 613–620

[12] 海伦县土壤普查办公室，海伦土壤志[M]. 黑龙江海伦县: 海伦县土壤办公室, 1985

[13] 师荣光, 周启星, 刘凤枝, 赵玉杰, 郑向群, 张浩. 天津郊区土壤–蔬菜系统中 Cd 的积累特征及污染风险[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7): 634–639

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000

[15] Li MS, Luo YP, Su ZY. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China[J]. Environmental Pollution, 2007, 147(1): 168-175

[16] Demirak A, Yilmaz F, Levent TA, Ozdemir N. Heavy metals in water, sediment and tissues of leuciscus cephalus from a stream in southwestern Turkey[J]. Chemosphere,

2006, 63(9): 1 451–1 458
[17] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 董汉英, 陈玉娟, 龙祥葆, 罗妙榕, 向运荣, 周毛. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 592–596
[18] 袁大伟, 何七勇, 郑宪清, 吕卫光, 李双喜. 上海松江区蔬菜田土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 上海农业学报, 2013, 29(4): 42–46
[19] 李良忠, 杨彦, 蔡慧敏, 向明灯, 张艳平, 高丹丹, 李定龙. 太湖流域某农业活动区农田土壤重金属污染的风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 60–65
[20] 朱白澍. 黑龙江海伦耕地土壤质量评价研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010
[21] Yang PG, Mao RZ, Shao HB, Gao YF. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China[J]. Comptes Rendus Biologies, 2009, 332(6): 558–566
[22] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006

Characteristics of Heavy Metals and Phosphorus in Farmland of Hailun City, Heilongjiang Province

CHEN Yu-dong[1,2] , ZHOU Jian-min[2], XING Lu[2], FENG Yan-fang[3], HANG Xiao-shuai[1], WANG Huo-yan[2*]

(1 *Nanjing Institute of Environmental Science*, *Ministry of Environmental Protection*, *Nanjing* 210042, *China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture* (*Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*), *Nanjing* 210008, *China*; 3 *Institute of Resources and Environment*, *Jiangsu Academy of Agriculture Sciences*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: In order to study heavy metals and phosphorus characteristics in soil of Hailun City, a typical agricultural region of Heilongjiang Province, 95 topsoil samples, 95 subsoil samples and 92 soil samples of 25 profiles were collected from the farmland, and Cu, Zn, Cr, Ni and phosphorus contents were determined. On the base of the previous results, another 8 profiles were selected to further study phosphorus characteristic in vertical direction. The results showed that the contents of heavy metals of Hailun City were low but showed a certain degree of accumulation compared with the background values of Songnen plains. Available P content was distinctly higher than that of the second soil survey. Spatial distribution of heavy metals and phosphorus in topsoil were significantly different, the heavy metals mainly originated from parent materials instead from phosphate. Phosphate was one of the key factors of the substantial increases of available P. The contents of the heavy metals and phosphorus first decreased then increased as soil deepened, available P contents were significantly different in four soil genetic horizons. The results of 8 profiles indicated that phosphorus content sharply decreased at first then remained stable or slowly increased or fluctuated strongly as soil deepened, which might be correlated with tillage history, tillage method and crop types.

Key words: Heavy metal; Phosphorus; Spatial Distribution; Profile