2011 年 11 月 地 球 学 报 Nov. 2011
第 32 卷 第 6 期: 732-738 Acta Geoscientica Sinica Vol.32 No.6: 732-738
www.cagsbulletin.com www.地球学报.com

华北平原土壤环境重金属元素分布规律及其意义

谭科艳, 刘晓端, 汤奇峰, 刘久臣, 袁 欣, 杨永亮
中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘 要: 为全面深入掌握华北平原的重金属元素分布状况, 本文以 2002 年以来在华北平原范围内的 3 省 2 市开展的区域土壤地球化学调查数据为基础, 制得华北平原区域内 As、Hg、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等 7 种重金属元素的土壤环境地球化学图。本文分析了该 7 种重金属元素在华北平原的分布规律, 并分析了成因。在 7 种重金属元素的基础上, 本文还制得华北平原土壤环境重金属元素的综合评价图。本文对该土壤环境综合评价图进行了分析, 综合表达了重金属元素在华北平原的总体分布状况。土壤环境元素地球化学图与综合图共同分析得出的结论可以为农业、环保、医疗及相关政府决策部门提供重要依据。

关键词: 重金属; 地球化学图; 元素; 华北平原
中图分类号: X53; X131.3; P595 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2011.06.11

Distribution Regularity of Heavy Metals in North China Plain and Its Significance

TAN Ke-yan, LIU Xiao-duan, TANG Qi-feng, LIU Jiu-chen, YUAN Xin, YANG Yong-liang
National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: In order to detect the distribution of heavy metals in the North China Plain, the authors drew element geochemical maps of As, Hg, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn on the basis of geochemical investigation data obtained from 3 provinces and 2 cities in the North China Plain since 2002. Distribution regularity of these heavy metals was discussed in this paper, and causes were analyzed too. Based on geochemical maps of these 7 heavy metal elements, the authors further compiled a comprehensive evaluation map of heavy metal elements, which intergratedly expresses the distribution of heavy metal elements in the North China Plain. An analysis of the comprehensive evaluation map was also made. The conclusions drawn from the comprehensive evaluation map in combination with the element geochemical maps can provide scientific basis for agricultural, environmental, medical and other policy-making departments of the government.

Key words: heavy metal; geochemical map; element; North China Plain

华北平原是中国第二大平原, 位于黄河下游。西起太行山脉和豫西山地, 东到黄海、渤海和山东丘陵, 北起燕山山脉, 西南到桐柏山和大别山, 东南至苏、皖北部, 与长江中下游平原相连。延展在北京市、天津市、河北省、山东省、河南省、安徽省和江苏省等 5 省、2 直辖市地境域(吴忱, 2008; 费宇红等, 2007)。由于地球化学调查数据所限, 在本文中, "华北平原"是指包括北京市、天津市、河北省、山东省、河南省部分区域(3 省 2 市), 见图 1。

华北平原是我国社会经济快速发展的地区, 同

本文由中国地质调查工作项目"污染土壤和水体的环境控制与地球化学修复技术项目"(编号: 1212011120286)和国土资源部公益性行业科研专项"金属矿山重金属污染土壤的地球化学工程控制修复技术开发与示范"(编号: 2002350900136)联合资助。
收稿日期: 2011-09-08; 改回日期: 2011-11-07。责任编辑: 张改侠。
第一作者简介: 谭科艳, 女, 1979 年生。助理研究员, 在读博士。主要从事环境地球化学与环境修复技术方向的研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号国家地质实验测试中心。E-mail: tankeyan@263.net。

万方数据

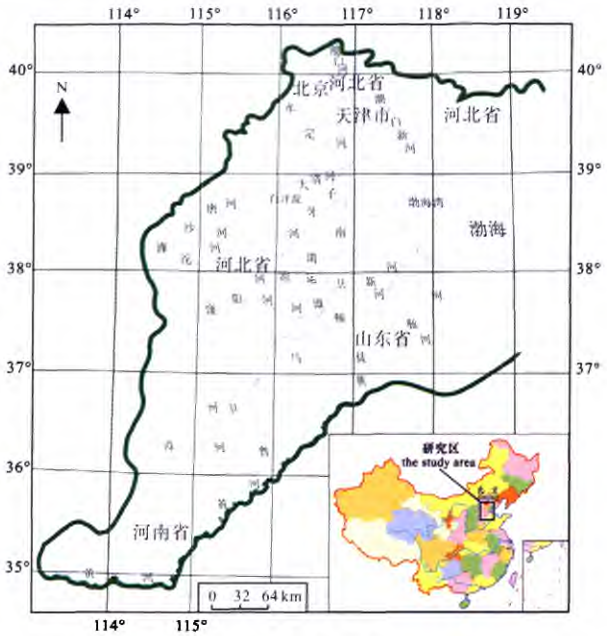

图 1　华北平原示意图
Fig. 1　Map of the North China Plain

时作为我国主要的粮食产区，年粮食产量占全国粮食总产量的 30%(Liu et al., 2005; 陈淑峰等, 2011)，土壤环境问题的变化对地区乃至全国的粮食安全生产和社会经济发展都具有重要影响。因此综合研究华北平原土壤环境的总体特征和演化规律，能够为国土规划管理和本地区社会经济可持续发展提供科学支撑和理论依据，有重大的现实意义(Lin et al., 2000; Jiang, 2000; 侯春堂等, 2010)。

1　土壤元素地球化学图的编制

1.1　数据来源

自 2002 年以来，国土资源部采取部省合作的方式，先后在全国 31 个省(区、市)开展了多目标区域地球化学勘查即农业地质调查，获取了土壤、水系沉积物、水、生物、矿产等地球化学方面的大量数据，为全国地球化学填图、基础地质研究、农业、林业、生态、环境、生物、矿产资源等科学研究提供了宝贵的第一手数据与资料。

区域土壤地球化学调查通过采集表层土壤样品和深层土壤样品进行数据采集。表层土壤采样深度 0~20 cm，采样密度为 1 点/km^2，4 个样组成 1 个分析样；深层土壤采样深度为 150 cm 以下，采样密度为 1 点/4 km^2，16 km^2 组合一个分析样。采用以 X-射线荧光光谱仪、等离子体质谱仪和等离子发射光谱仪等大型精密分析仪器分析样品中 54 种元素指标。要求分析准确度(ΔlgC)控制在 0.10 ~ 0.12，精密度(RSD)控制在 10% ~ 20%，报出率达到 98%以上，并采用全国质量监控制度控制分析质量(奚小环等, 2009; 谢学锦等, 2009)。本研究以此为基础，编制了华北平原土壤环境重金属元素地球化学图组。

1.2　数据检查与统计分析

编图数据经过极值检查与缺失情况检测，核实后进入作图程序。元素数据均由 SPSS 软件进行统计分析，分别计算原始数据的特征值，包括样品数(n)、平均值(x)、标准差(s)、变异系数(Cv)、最小值(min)和最大值(max)。在制图时，特征值均以文本形式展示在成图上。元素分析时，异常下限一般采用平均值加一倍标准离差(x+s)加以界定(姚文生等, 2011; 程志中等, 2007; 谢学锦等, 2010)。

1.3　制图软件及标准

本研究的编图采用 Mapgis 软件，采用坐标系类型：投影平面直角；选用椭球参数：北京 54/克拉索夫斯基(1940 年)椭球；选择投影类型：高斯-克吕格(横切椭圆柱等角)投影；比例尺分母：160 万；坐标单位：mm；投影中心点经度(DMS)：117°，投影区任意点的纬度(DMS)：36°；主图比例尺为 1：1600000，镶图比例尺为 1：4000000。

每个元素的作图数据均做了频度分析，以 5%、10%、25%、50%、75%、90%、95%所对应的数值作为作图色阶分级的依据，以体现数据的整体分布状况。色阶的分级同时参考了中国土壤环境质量标准(GB15618—1995)(国家环境保护局, 1995)，在国标的数值处进行了靠近处理，即凡是分级色阶值接近土壤环境标准值的，都作靠近该标准值处理，做到对土壤环境现状值最客观的表达。

色阶色度均采用由冷色系渐变到暖色系，即随着数值变大，颜色由蓝-绿-黄-红逐级过渡。

2　成图与分析

2.1　重金属元素分布图

以多目标区域地球化学数据为基础绘制成华北平原土壤环境重金属元素 As、Hg、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的地球化学分布图，见图 2 至图 8。

2.2　重金属元素的空间分布

由图 2 可以看出，华北平原表层土壤砷平均含量低于国家土壤环境质量标准，表明总体安全。其分布特征呈现南高北低、山前低、中部滨海高、中部北东向展布的特点。高值区主要分布在天津海河下游流域、天津静海区南运河两岸、河北省献县和泊头市以北地区、山东乐陵市以东、滨州以南和保定周边地区。砷的低值区分布在研究区北部唐山以东以及太行山山前、石家庄北部地区。深层土壤砷

万方数据

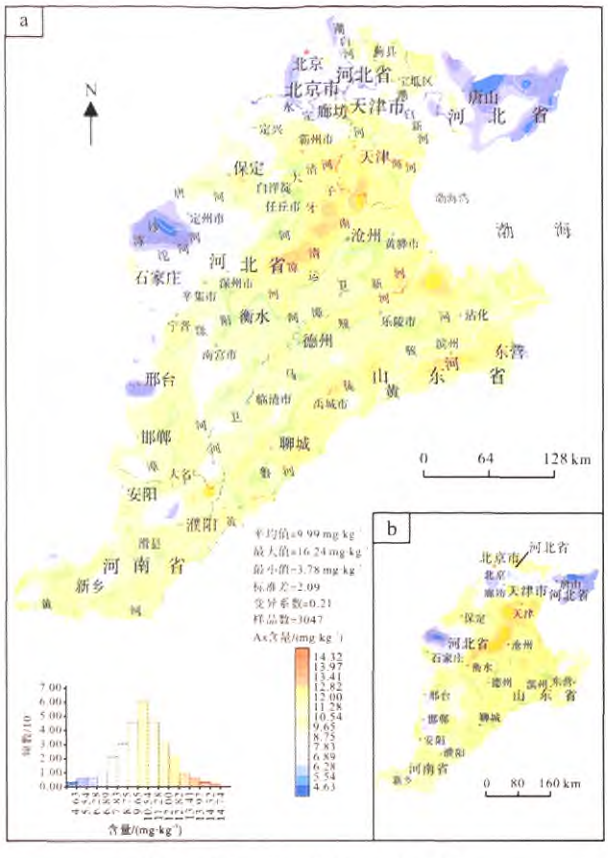

图 2 华北平原砷地球化学图

Fig. 2 Geochemical map of As of North China Plain

a-华北平原表层土壤环境砷地球化学图;
b-华北平原深层土壤环境砷地球化学图

a-Geochemical map of As in surface soil of North China Plain;
b-Geochemical map of As in deep soil of North China Plain

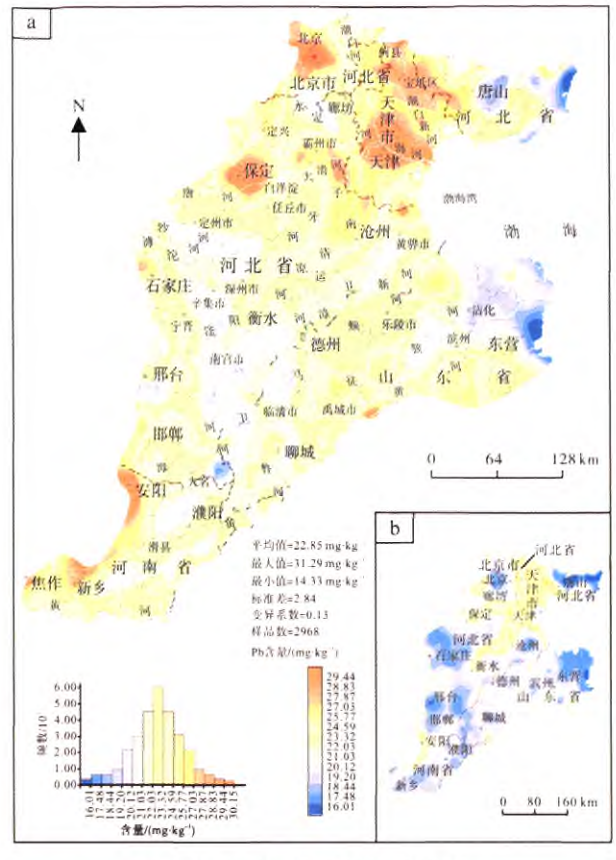

图 3 华北平原铅地球化学图

Fig. 3 Geochemical map of Pb of North China Plain

a-华北平原表层土壤环境铅地球化学图;
b-华北平原深层土壤环境铅地球化学图

a-Geochemical map of Pb in surface soil of North China Plain;
b-Geochemical map of Pb in deep soil of North China Plain

的分布特征基本与表层土壤一致，高值区略有扩大。深层土壤砷的高值扩大区分布在天津-沧州-衡水一带，结合华北平原表层土壤环境 pH 分布情况，上述地区的土壤呈碱性(pH=8.00~8.60)。砷在偏碱性的土壤环境中具有一定的迁移能力，其迁移速率受到雨水和地表径流的影响。该地区的表层土壤中的砷被淋滤后滞留在深层土壤中，使深层土壤中砷的高值区范围比表层土壤中范围略大。

由图 3 可以看出，华北平原地区表层土壤铅低于国家土壤环境质量标准，总体安全，大部分地区表层不让铅含量处于中等偏低水平。高值区主要分布在天津、北京西部地区、河北保定、河南安阳、新乡地区。低值环境位于河北唐山以东和山东沾化-东营地区。深层土壤铅除天津及周边地区处于中等含量水平外，其它地区铅含量均很低。在北京西部、天津市及保定市周边范围内分布有大量的冶炼、制造和使用铅制品的工矿企业，因此该地区的高含量铅主要来自上述企业所排出的含铅废水、废气和废渣。汽车在汽油燃烧过程中，铅随汽车排出的废气进入大气，又通过大气沉降进入表层土壤，因此在北京、天津、保定、安阳等大城市辖区范围内形成了铅的高值区。表层土壤与深层土壤中铅含量差异较大，说明表层土壤中的铅污染主要受人类生产生活的影响。

由图 4 可以看出，华北平原表层土壤汞含量大部分处于中等偏低水平，低于国家土壤环境质量标准，总体上安全。高值区主要分布在北京市、天津市、河北省石家庄市、保定市、邢台、邯郸市和河南省新乡市周边地区，这些地区均为大城市及其周边地区。局部地带超标，如北京周边地区。山前高于滨海、太行山山前高于燕山山前。低值区多分布在除天津以外的滨海地带及滦县-滦南一带。深层土壤中汞元素除在北京市和山东省垦利县沿海有极小范围高值区外，其他地区汞含量都很低。在汞的高值区范围内存在大量的氯碱、塑料、电池、电子等工业企业，这是造成汞高值的主要原因。深层土壤与表层土壤中汞含量差异较大，这说明表层土壤的汞主要来源于生产生活等人类行为。

万方数据

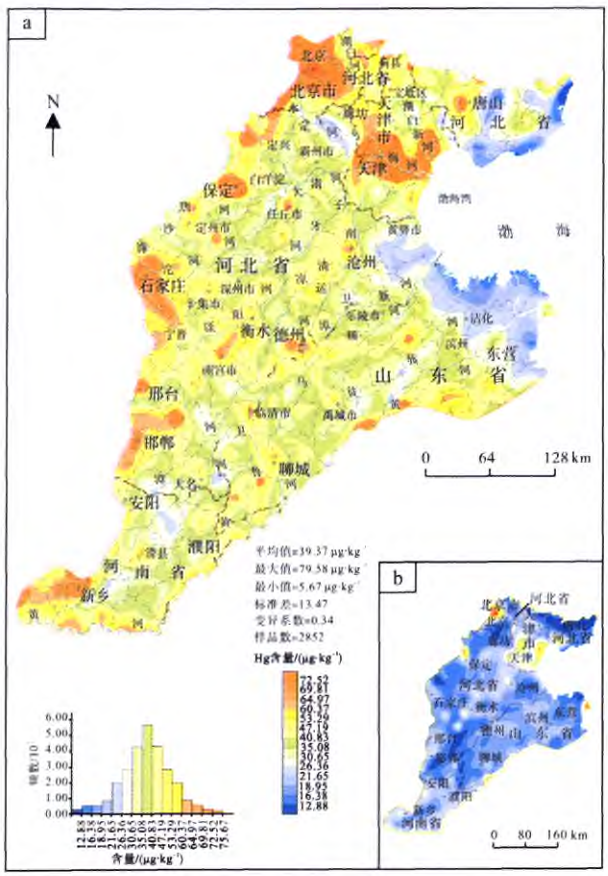

图 4　华北平原汞地球化学图

Fig. 4　Geochemical map of Hg of North China Plain

a-华北平原表层土壤环境汞地球化学图；
b-华北平原深层土壤环境汞地球化学图

a-Geochemical map of Hg in surface soil of North China Plain;
b-Geochemical map of Hg in deep soil of North China Plain

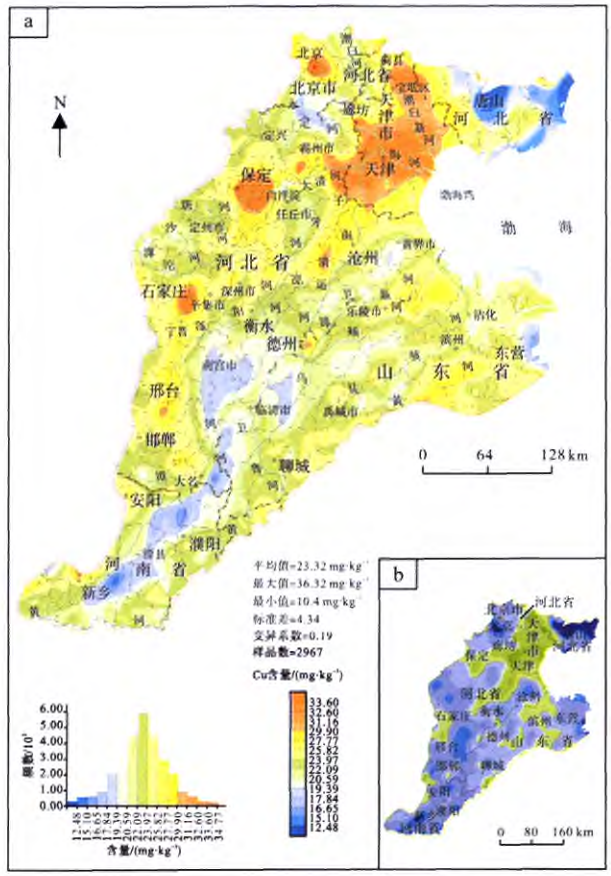

图 5　华北平原铜地球化学图

Fig. 5　Geochemical map of Cu of North China Plain

a-华北平原表层土壤环境铜地球化学图；
b-华北平原深层土壤环境铜地球化学图

a-Geochemical map of Cu in surface soil of North China Plain;
b-Geochemical map of Cu in deep soil of North China Plain

由图 5 可以看出，华北平原表层土壤中铜含量均低于国家土壤环境质量标准，呈现出大部分地区含量中等、燕山山前表层土壤中铜含量低于太行山山前、天津一带为面状高值区、大名-滑县以北北东向带状较低的总体格局。华北平原土壤铜含量较低与成土母质有关。高值区主要分布在天津市及周边地区，河北保定、北京西部地区呈片状分布。高值区范围内的城市周边分布着金属加工、机械制造、钢铁生产等企业，这些企业所排放的废渣、废气和废水是造成铜在表层土壤中富集的主要原因。深层土壤中铜分布特征与表层差异较大，高值区面积缩小，含量明显低于表层土壤，说明人类的生产生活等行为已经大大影响了表层土壤的铜分布。

由图 6 可以看出，华北平原表层土壤中镍含量低于国家土壤环境质量标准，大部分地区处于中等含量水平，呈太行山山前高于燕山山前、蓟县-天津面状高值区、中部平原北东向展布较低的空间分布格局。高值区主要分布在天津蓟县-宝坻一带，低值环境主要分布在河北唐山及以东部分区域。深层土壤镍的分布与表层土壤镍的分布基本一致，含量也基本一致，深层土壤中镍略低于表层土壤，这说明人类活动对土壤中镍的影响不大。

由图 7 可以看出，华北平原表层土壤中锌的含量低于国家土壤环境质量标准，大部分地区为中等含量，表明总体安全。在分布上表现出南高北低，太行山前高，燕山山前低，天津、北京、石家庄、安阳、保定等城市含量高的格局。华北平原的北部有大面积的高值区，主要分布在天津市、北京西部、河北保定、衡水、沧州等地。石家庄、河北省邯郸市、河南省安阳市周边也出现点状高值区。在上述高值区范围内分布着冶炼加工、机械制造以及镀锌、仪器仪表、有机合成和造纸等工业企业，这些企业的废物排放会造成当地土壤中锌的富集。另外，北方城市冬季均采用燃煤燃气取暖，燃烧过程中产生的粉尘、烟尘中含锌化合物的沉降也是造成上述地区土壤中锌富集的主要原因。低值区主要分布在河北省北部与东部地区。深层土壤中锌含量在天津市附

万方数据

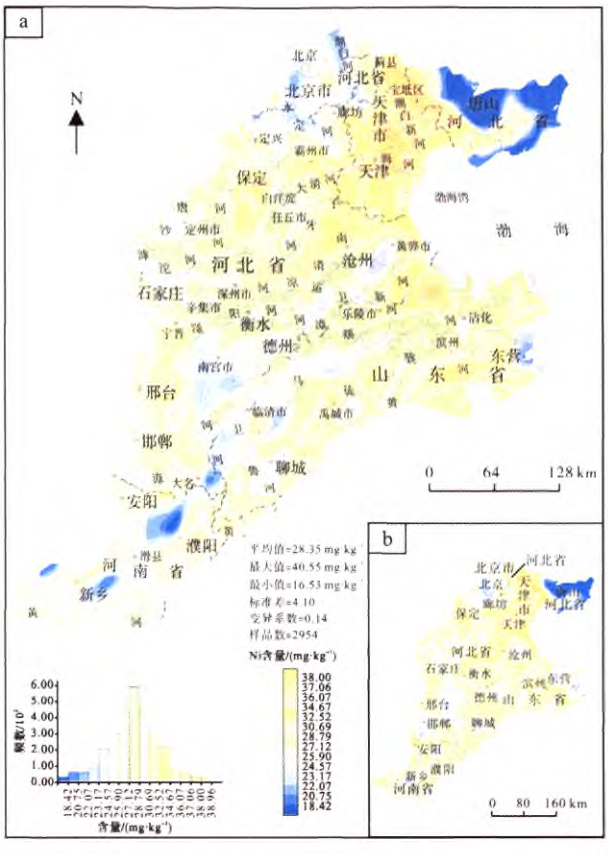

图 6 华北平原镍地球化学图

Fig. 6 Geochemical map of Ni of North China Plain

a-华北平原表层土壤环境镍地球化学图;
b-华北平原深层土壤环境镍地球化学图

a-Geochemical map of Ni in surface soil of North China Plain;
b-Geochemical map of Ni in deep soil of North China Plain

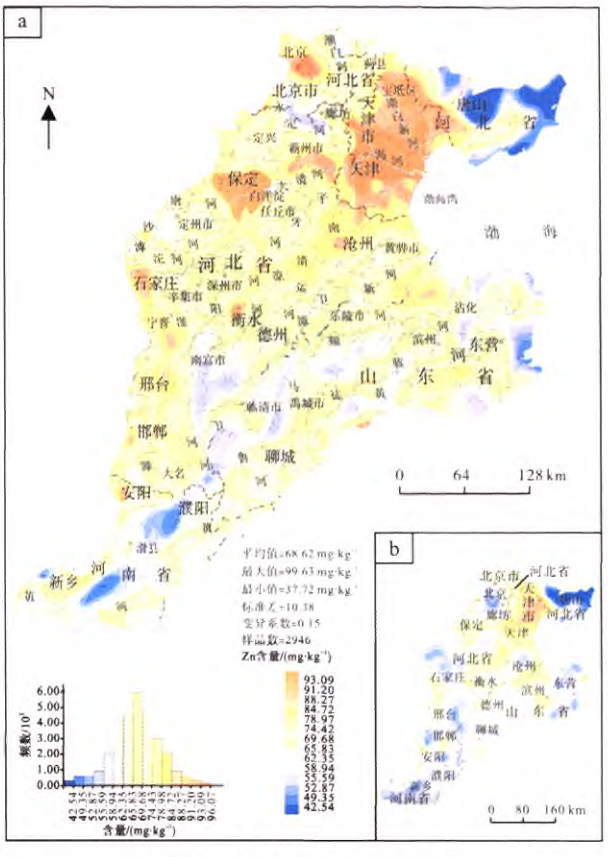

图 7 华北平原锌地球化学图

Fig. 7 Geochemical map of Zn of North China Plain

a-华北平原表层土壤环境锌地球化学图;
b-华北平原深层土壤环境锌地球化学图

a-Geochemical map of Zn in surface soil of North China Plain;
b-Geochemical map of Zn in deep soil of North China Plain

近呈较高值，其他地区均很低，说明表层土壤中锌含量与人类活动有关。

由图 8 可以看出，华北平原表层土壤中铬含量大部分地区含量中等，燕山山前低于太行山山前。高值区主要在天津周边和蓟县以南呈面状展布，河北省保定以北、石家庄以南、宁晋-邢台地区有片状高值区，太行山前易县-安新一带为高值区。在铬高值区范围内存在化工原料、皮革制剂、金属部件，工业颜料以及鞣革、橡胶和陶瓷原料等工业企业，这些企业排放的废渣、废水和废气沉降物是导致该地区土壤中铬富集的主要原因。铬的低值区主要分布在河北唐山及以东地区。深层土壤铬含量的分布特征与表层土壤一致，深层土壤比表层土壤的铬含量低，说明表层土壤铬含量受到人类活动影响。

3 重金属元素综合评价图成图及结果分析

在华北平原水土环境现状、演化规律和趋势分析研究的基础上，本文选取土壤环境综合评价指标，通过建立区域土壤环境综合评价模型，编制了土壤环境重金属元素综合评价图来总体评价华北平原的土壤环境质量状况。

华北平原土壤环境重金属元素综合评价指标包括: Cd、Hg、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 和类金属 As。在评价方法的选择上，引用了模糊数学的概念，所有评价指标都转化为[0, 1]区间的数值，从 0 到 1 表示质量水平由低到高，重金属污染程度由高到低。模糊集合[0, 1]由隶属函数描述，隶属函数的确立方法比较多，常用的有正态型、戒上型、戒下型和 Γ 型。为了评价工作的可操作性和易推广性，以线性模型为基础，采用峰值型、戒上型和戒下型隶属函数模型，对评价指标进行隶属度计算。本重金属元素综合评价图采用了戒下型隶属函数模型，对评价进行隶属度计算，形成重金属元素综合评价图(见图 9)。采用频度统计法对参加评价的元素进行综合分级作图，且颜色由浅黄到棕色代表评价指数增加，随评价指数增加，重金属污染随之增加。

从图 9 中可以看出，华北平原重金属元素含量总体处于中等水平，污染区域主要分布在河北蓟县、宝坻、天津市及沧州一线呈南北向片状分布，另

万方数据

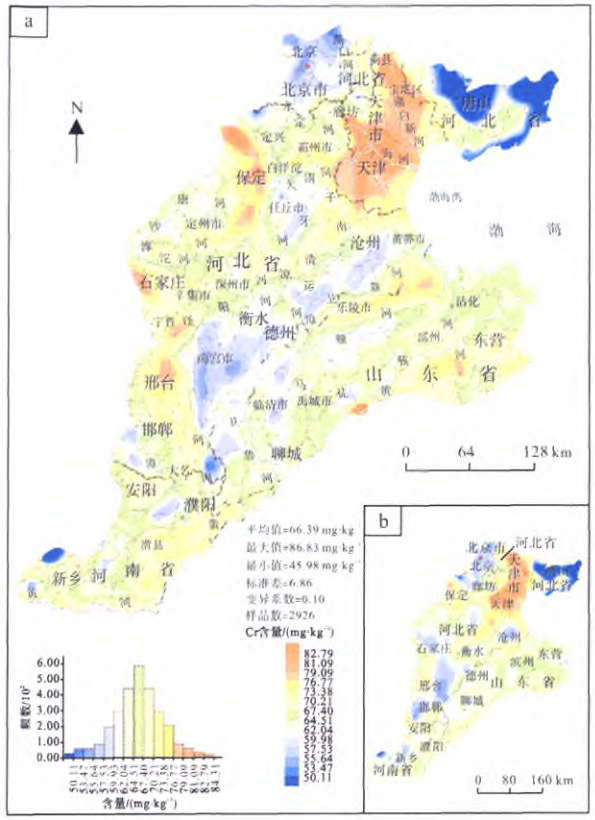

图 8　华北平原铬地球化学图

Fig. 8　Geochemical map of Cr of North China Plain

a-华北平原表层土壤环境铬地球化学图；

b-华北平原深层土壤环境铬地球化学图

a-Geochemical map of Cr in surface soil of North China Plain;
b-Geochemical map of Cr in deep soil of North China Plain

在河北保定、石家庄、宁晋，河南新乡、焦作，山东禹城、乐陵市周边污染也比较严重。结合 2.2 节可以看出单元素重金属的高值区分布和综合图中重金属元素的高值区均分布在城市和工业区周边，上述地区土壤重金属的主要污染源来自污灌、固体废弃物堆放、矿山开采与冶炼、农药与化肥的施用，这表明在华北平原范围内重金属的高值分布与人类的生产生活密切相关。

重金属含量的低值区主要在河北唐山以东地区，廊坊以西地区和华北平原南部的大部分区域。

重金属污染会影响植物对 N、P、K 等营养元素的吸收和利用，而且环境中的重金属通过食品、饮用水和空气进入生态链，随环境条件变化以不同的化学形态存在，它们不易被生物降解，却能在生物放大作用下，成百倍地富集，随着蓄积量的增加，对人体健康造成威胁。笔者认为在土壤重金属元素地球化学图的基础上对华北平原地区重金属的污染状况有了清晰的认识，进而将重金属污染修复技术提到一定高度，对改善土壤环境，提高当地居民的

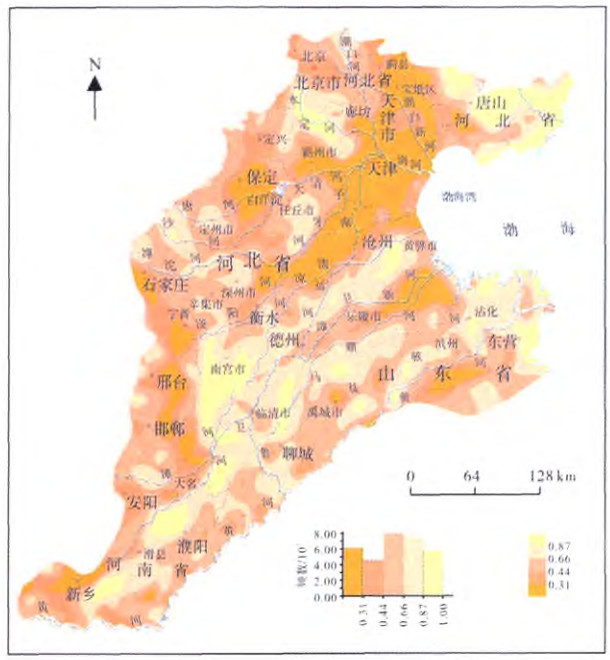

图 9　华北平原土壤环境重金属元素综合评价图(颜色由浅变深，重金属污染依次增加)

Fig. 9　Comprehensive evaluation map of heavy metal elements in the North China Plain(deeper of the color, heavier of the heavy mental pollution)

生活状况有长远意义。

4　结论

华北平原土壤重金属元素综合评价图能够从总体上反映该地区重金属元素分布状况，能够为农业、环保、医学及政府相关决策部门提供服务，增强了该图组的实用性。

华北平原土壤重金属元素总体分布不均，重金属的高值区在天津市周边，河北蓟县、宝坻、沧州一线呈南北片状高值分布，河南新乡、焦作，山东禹城、乐陵市周边含量也较高。高值区多分布在大型城市及工业区周边，表明其分布状况与人类的生产生活密切相关。

综合华北平原地区地质、地貌、资源等资料，本土壤环境重金属元素地球化学图组可以为在重金属元素高值区开展土壤控制修复技术提供重要参考和依据。

参考文献:

国家环境保护局. 1995. GB15618—1995 中华人民共和国国家标准：土壤环境质量标准[S]. 北京：中国标准出版社.

陈淑峰，吴文良，胡克林，杜贞栋，褚兆辉. 2011. 华北平原高产粮区不同水氮管理下农田氮素的淋失特征[J]. 农业工程学报，27(2): 65-73.

万方数据

程志中, 谢学锦. 2007. 中国西南地区76种元素地球化学填图[J]. 物探化探计算技术, 29(S1): 174-179.

费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 王昭, 陈宗宇, 陈京生, 钱永, 李亚松. 2007. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J]. 地球学报, 28(6): 567-571.

侯春堂, 刘晓端. 2010. 华北平原水土地质环境图集[M]. 北京: 地质出版社: 1-2.

吴忱. 2008. 华北地貌环境及其形成演化[M]. 北京: 科学出版社: 1-4.

奚小环, 杨忠芳, 夏学齐, 李敏. 2009. 基于多目标区域地球化学调查的中国土壤碳储量计算方法研究[J]. 地学前缘, 16(1): 194-205.

谢学锦, 任天祥, 奚小环, 张立生. 2009. 中国区域化探全国扫面计划卅年[J]. 地球学报, 30(6): 700-716.

谢学锦, 任天祥, 严光生, 奚小环, 刘大文, 王学求, 程志中, 成杭新, 周国华, 迟清华, 孙忠军. 2010. 进入21世纪中国化探发展路线图[J]. 中国地质, 37(2): 245-267.

姚文生, 王学求, 谢学锦. 2011. 国际地球化学填图样品分析方法和数据对比[J]. 地质通报, 30(7): 1111-1118.

References:

CHEN Shu-feng, WU Wen-liang, HU Ke-lin, DU Zhen-dong, CHU Zhao-hui. 2011. Characteristics of nitrate leaching in high yield farmland under different irrigation and fertilization managements in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 27(2): 65-73(in Chinese with English abstract).

CHENG Zhi-zhong, XIE Xue-jin. 2007. Geochemical mapping for 76 elements in Southwest China[J]. Computing Techniques of Geophysics and Geochemistry, 29(S1): 174-179(in Chinese with English abstract).

FEI Yu-hong, ZHANG Zhao-ji, ZHANG Feng-e, WANG Zhao, CHEN Zong-yu, CHEN Jing-sheng, QIAN Yong, LI Ya-song. 2007. An Analysis of the Influence of Human Activity and Climate Change on Water Resources of the North China Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 28(6): 567-571(in Chinese with English abstract).

State Environmental Protection Administration of China. 1995. GB15618—1995 National Standards of P.R.C: Environmental quality standard for soil[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese with English abstract).

HOU Chun-tang, LIU Xiao-duan. 2010. Maps of Water and Soil Geological Environment of the North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-2(in Chinese with English abstract).

JIANG Y F. 2000. Analysis on water scarcity in the North China Plain[J]. Journal of China Water Resources, (1): 23-25.

LIN Yao-ming, REN Hong-zun, YU Jing-jie, YAO Zhi-jun. 2000. Balance between land use and water resources in the North China Plain[J]. Journal of Natural Resources, 15(3): 252-258.

LIU Xiao-ying, LI Yu-zhong, HAO Wei-ping. 2005. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 21(10): 155-159.

WU Shen. 2008. Landform Environment and Its Formation in North China[M]. Beijing: Science Press: 1-4(in Chinese).

XI Xiao-huan, YANG Zhong-fang, XIA Xue-qi, LI Min. 2009. Calculation techniques for soil carbon storage of China based on multi-purpose geochemical survey[J]. Earth Science Frontiers, 16(1): 194-205(in Chinese with English abstract).

XIE Xue-jin, REN Tian-xiang, XI Xiao-huan, ZHANG Li-sheng. 2009. The Implementation of the Regional Geochemistry-National Reconnaissance Program (RGNR) in China in the Past Thirty Years[J]. Acta Geoscientia Sinica, 30(6): 700-716(in Chinese with English abstract).

XIE Xue-jin, REN Tian-xiang, YAN Guang-sheng, XI Xiao-huan, LIU Da-wen, WANG Xue-qiu, CHENG Zhi-zhong, CHENG Hang-xin, ZHOU Guo-hua, CHI Qing-hua, SUN Zhong-jun. 2010. 21st century's roadmap for exploration geochemistry in China[J]. Geology in China, 37(2): 245-267(in Chinese with English abstract).

YAO Wen-sheng, WANG Xue-qiu, XIE Xue-jin. 2011. Analysis methods and data comparison of International Geochemical Mapping samples[J]. Geological Bulletin of China, 30(7): 1111-1118(in Chinese with English abstract).

万方数据