晋中盆地土壤重金属分布特征及生态风险

郭 星，王应刚，曹霄霄，张 婷
（山西大学 环境与资源学院，山西 太原 030006）

摘 要：[目的] 对晋中盆地土壤重金属分布特征影响及生态风险进行研究和评价，旨在了解该地区土壤污染现状以及为土壤重金属综合治理与防治提供科学依据。[方法] 对晋中盆地表层土壤进行采样，测定 208 个土壤样品中 Pb，Cr，Cd，As 和 Hg 这 5 种重金属的含量，采用单因子污染指数、综合污染指数和潜在生态危害指数对盆地污染进行评价，并利用 GIS 空间分析技术对污染现状进行分析。[结果] 重金属 Pb，Cd，Cr，As 和 Hg 的平均含量分别为 20.87，0.316，68.226，10.457 和 0.129 mg/kg，分别为山西省土壤背景值的 1.42，3.16，1.23，1.15，5.61 倍；单因子污染指数结果显示，Hg 和 Cd 为盆地污染的主要贡献因子，Pb，Cr 和 As 对盆地污染的贡献较少；综合污染指数和潜在生态危害指数结果显示，盆地污染程度较为严重，达到中等污染和重度污染的样点占比共达到 95%以上；污染空间分析显示，盆地整体污染程度较深，在盆地北部太原地区和南部孝义、介休市存在明显的污染突出地区。[结论] 受人类活动影响，晋中盆地土壤重金属污染已较为严重，应引起足够重视。

关键词：城市化；土壤重金属；生态风险；空间分布；晋中盆地
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)02-0053-05 **中图分类号**：X53

文献参数：郭星，王应刚，曹霄霄，等. 晋中盆地土壤重金属分布特征及生态风险[J]. 水土保持通报，2018，38(2)：53-57. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.009. Guo Xing，Wang Yinggang，Cao Xiaoxiao，et al. Effects and ecological risk of urbanization on heavy metal accumulation in soil of Jinzhong basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(2)：53-57.

Effects and Ecological Risk of Urbanization on Heavy Metal Accumulation in Soil of Jinzhong Basin

GUO Xing，WANG Yinggang，CAO Xiaoxiao，ZHANG Ting
（*College of Environment and Resources*，*Shanxi University*，*Taiyuan*，*Shanxi* 030006，*China*）

Abstract：[Objective] To study the distribution of soil heavy metals and evaluate its ecological risk in Jinzhong basin so as to understand the status of soil pollution in this area and to provide a scientific basis for the comprehensive control and prevention of soil heavy metals. [Methods] The heavy metals contents of Pb，Cr，Cd，Hg and As in 208 surface soil samples were tested in Jinzhong basin. The single factor pollution index，integrated pollution index and potential ecological hazard index were used to evaluate basin pollution，and the status of pollution was analyzed using GIS spatial analysis technology. [Results] The average contents of heavy metals Pb，Cd，Cr，As and Hg were 20.87，0.316，68.226，10.457 and 0.129 mg/kg respectively，which were 1.42，3.16，1.23，1.15 and 5.61 times of the soil background in Shanxi Province. The results of single factor pollution index showed that Hg and Cd were the main contributors to basin pollution，and Pb，Cr and As contributed less to the basin pollution. The results of the comprehensive pollution index and the potential ecological hazard index showed that the basin pollution level was more serious，over than 95% of the sample points reached medium pollution and heavy pollution levels. The spatial analysis of pollution showed that the overall pollution of the basin was severe，and there were obvious polluted areas in the northern of basin，Taiyuan，and in the southern of basin，Xiaoyi and Jiexiu area. [Conclusion] Due to the influence of human activities，heavy metals in soils of Jinzhong basin have been

收稿日期：2017-10-20 **修回日期**：2017-11-20
资助项目：国家自然科学基金项目“区域城市化发展对植物物种多样性影响的定量化研究”(31070424)
第一作者：郭星(1992—)，男(汉族)，山西省临汾市人，硕士研究生，主要研究方向为土壤重金属污染。E-mail：guoxsld@163.com。
通讯作者：王应刚(1962—)，男(汉族)，山西省寿阳县人，博士，教授，主要从事区域生态学方面的研究。E-mail：wangyg@sxu.edu.cn。

seriously polluted and should be paid enough attention.

Keywords: urbanization; soil heavy metal; ecological risk; spatial distribution; Jinzhong basin

土壤是生态环境重要的组成部分,也是人类生产生活的物质基础[1]。近年来,随着经济的发展、城市规模的扩张以及人口数量的增多,城市化水平越来越高,与之相伴的是人类活动对区域土壤环境更为直接的影响[2-4]。土壤中的重金属很难通过自然过程分解和迁移,并会随着时间的累计不断增多,农业生产过程中化肥的广泛使用,农田的污水灌溉都会导致残留于土壤中的重金属不断累积[5],而工业活动中产生大量的"三废"更加重了土壤重金属的累计速率[6-7]。这导致土壤中微生物活性和养分的有效供给受到抑制,影响土壤理化性质[8-9],从而造成生态环境恶化继而使食品质量降低,危害人类健康[10]。重金属对土壤的污染已成为中国重要的环境问题[11],因此受到学者们的广泛关注。目前,有关学者对工矿地区、重要城市、农田湿地和交通沿线的土壤重金属污染进行了很多研究,如陈秀瑞等[12]研究发现,西安市二环内土壤中 Co,Cr,Cu,Pb 和 Zn 的富集受人类活动影响明显;谷蕾等[13]对连霍高速周边土壤调查表明,较长运营时间道路周边的土壤重金属含量高于其他地区,说明交通运输对土壤重金属的积累具有一定影响;李晋昌等[14]对汾河水库周边土壤重金属含量研究显示,Cu,Ni 和 Zn 主要来源于城市生产生活的废弃物,Cd 和 Pb 则来源于农业活动和交通运输。

晋中盆地城市化发展迅速,从解放初期到 21 世纪初期,城镇化率由 21.26%增长到 60.33%,增长接近 3 倍[15]。另一方面,研究区内的能源供给仍以燃烧矿石燃料为主,且重工业体系依然围绕"煤"为核心发展,这必然会加重土壤中重金属的累积,造成土壤污染。有关晋中盆地土壤重金属的研究也有相关报道,如刘勇等[16]对汾河太原段沿岸土壤中 Cr 和 Hg 进行研究,发现受工业活动影响 Hg 含量超标明显。高鹏等[17]对太原市城区周边土壤调查显示,土壤重金属的整体危害已达到中等危害程度,Cd 和 Hg 最为严重。但已有的研究大多针对城市和湿地等局部范围,而对完整自然地理区域晋中盆地的研究还鲜有报道。因此,本研究采用多种重金属评价方法和 GIS 空间插值技术分析了晋中盆地 5 种重金属的污染特征及污染程度,旨在了解该地区土壤污染现状以及为土壤重金属综合治理与防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

晋中盆地位于山西省中部汾河谷地,地理坐标为 111°36′—112°49′E,36°59′—38°17′N,总面积约 5 000 km^2,海拔 750～850 m,属于大陆性季风气候,降水为 450～550 mm,盆地光照资源充足,年均日照时数在 2 650 h 左右,冬季昼夜温差大,有显著的干湿季节交替特点。主要土壤类型为褐土及潮土。盆地包括太原市、榆次区、孝义市、阳曲县、介休市、汾阳市、太谷县、平遥县、文水县、清徐县、交城县和祁县 12 个县市部分地区,是山西省人口最为稠密的区域。作为山西省主要的粮食产区,耕地为该地区主要的土地利用类型,同时该地区又是重要的煤炭能源化工基地,工业用地与耕地的交错分布,使土壤质量受到影响。

1.2 样品采集与测试

将研究区分为 1 250 个 2 km×2 km 的正方形单元格,采用随机抽样的方法选取 208 个网格,在各网格的东北角布设面积为 10 m×10 m 的样点。土壤样品的采集深度为 0—20 cm,沿样地对角线等间距依次采集 5 个土样,将其均匀混合作为一个土样,然后沿另一对角线以相同的方法采集土样作为平行样。实际采样过程中运用 GPS 对采样点进行精确定位。样品经自然风干,用木棒磨碎后过 100 目尼龙筛,剔除石砾、植物根系等杂物,利用四分法缩减至 100 g,装入塑料瓶待测。采用微波消解法(MARS 微波消解仪)进行土壤样品测定:称取 0.200 g 土壤样品,加入 8 ml 硝酸、4 ml 氢氟酸、4 ml 盐酸置于微波消解仪,按微波程序进行消解,结束后冷凝,放入 50 ml 瓶中,定容。样品中重金属 Pb,Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法进行测定,Cr 采用火焰原子吸收法测定,As 和 Hg 采用原子荧光光谱法测定。选用国家标准物质样品 GSS-2 进行分析质量控制,测定结果显示 5 种元素均处于国家标准参比物质的误差范围内。

1.3 土壤重金属污染评价方法

1.3.1 *单因子污染指数法* 单因子污染指数为最简易的环境质量评价方法,同时也是多种环境质量评价方法的基础。其公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中:P_i——单因子污染指数;C_i——各重金属实测浓度值(mg/kg);S_i——各重金属参考评价标准(mg/kg)。

1.3.2 *内梅罗综合污染指数法* 单因子污染指数虽然可以直观反映各重金属的污染程度,但不能客观体现研究区污染情况,而内梅罗综合污染指数则兼顾样点内各重金属的最大值及平均值,可以较好地反映实际污染状况。其计算公式为:

$$I=\sqrt{(\bar{P}_i)^2+(P_{i\max})^2/2} \quad (2)$$

式中:I——综合污染指数;$\bar{P}_i$——第 i 个样点单因子污染指数平均值;$P_{i\max}$——第 i 个样点单因子污染指数最大值。两种污染评价标准详见表 1。

表 1　土壤重金属污染评价标准

污染等级	单因子污染指数评价标准		内梅罗综合污染指数评价标准	
	污染指数	污染水平	污染指数	污染水平
Ⅰ	$P_i<1$	清洁	$I<0.7$	清洁
Ⅱ	$1\leqslant P_i<2$	轻污染	$0.7\leqslant I<1$	尚清洁
Ⅲ	$2\leqslant P_i<3$	中污染	$1\leqslant I<2$	轻污染
Ⅳ	$P_i\geqslant 3$	重污染	$2\leqslant I<3$	中污染
Ⅴ			$I\geqslant 3$	重污染

1.3.3　*潜在生态危害指数法*　由于每种重金属对生物均存在不同程度的毒性,而潜在生态危害指数法,结合毒理响应系数更能反映重金属对生态的危害。其计算公式为:

$$\mathrm{RI}=\sum_{i=1}^{n}E_f^i=\sum_{i=1}^{n}T_f^iC_f^i=\sum_{i=1}^{n}T_f^iC_{\text{实测}}^i/C_n^i \quad (3)$$

式中:$C_{\text{实测}}^i$——土壤沉积物重金属的实测值(mg/kg);C_n^i——该重金属的参考标准(mg/kg);C_f^i——重金属的单因子污染指数;T_f^i——每种重金属的毒性响应系数[18],分别为:Cr=2<Pb=5<As=10<Cd=30<Hg=40;E_f^i——样点各重金属潜在生态危害指数;RI——样点的重金属综合潜在生态污染指数。其评价标准详见表 2。

表 2　潜在生态危害指数级别标准

生态危害等级	E_f^i	单种重金属生态危害程度	RI	综合生态危害程度
Ⅰ	$E_f^i<40$	轻度生态危害	RI<150	轻度生态危害
Ⅱ	$40\leqslant E_f^i<80$	中度生态危害	150≤RI<300	中度生态危害
Ⅲ	$80\leqslant E_f^i<160$	强烈生态危害	300≤RI<600	强烈生态危害
Ⅳ	$160\leqslant E_f^i<320$	很强烈生态危害	RI≥600	很强力生态危害
Ⅴ	$E_f^i\geqslant 320$	极强烈生态危害		

2　结果与分析

2.1　土壤重金属含量分析

盆地土壤重金属 Pb,Cd,Cr,As 和 Hg 的含量水平详见表 3,其含量范围分别为 12.48～440.16 mg/kg,0.06～0.69 mg/kg,51.48～201.51 mg/kg,6.2～15.335 mg/kg,0.021～0.478 mg/kg,各重金属平均含量均高于研究区土壤背景值[19],分别为背景值的 1.42,3.16,1.23,1.15,5.61 倍,可见各重金属在盆地均有不同程度的富集。

从变异系数来看,Hg 的变异系数最高,为 65.89%,属于高强度变异,Pb,Cd,Cr 和 As 分别为 20.17%,25.63%,21.38%和 21.31%,均属于中等强度变异。高重金属含量值以及较大的变异系数通常显示重金属积累受更多的人为因素影响[20],可以看出,Cd 和 Hg 在研究区整体含量远高于其背景值,说明 Hg 含量的积累受外部影响强烈。而 Cd 的变异系数虽属于中等变异程度,但其均值已经超过国家土壤质量二级标准(GB15618-1995),显示 Cd 在一定程度上受到较大尺度的人为活动影响。

表 3　晋中盆地土壤重金属的土壤特征值

重金属	最小值/(mg·kg^{-1})	最大值/(mg·kg^{-1})	均值/(mg·kg^{-1})	标准差/(mg·kg^{-1})	变异系数/%	背景值/(mg·kg^{-1})	二级标准/(mg·kg^{-1})
Pb	12.48	40.16	20.87	4.21	20.17	14.7	250
Cd	0.06	0.69	0.316	0.081	25.63	0.1	0.3
Cr	51.48	201.51	68.226	14.586	21.38	55.3	250
As	6.2	15.335	10.457	2.228	21.31	9.1	30
Hg	0.021	0.478	0.129	0.085	65.89	0.023	0.3

2.2　土壤重金属污染评价

2.2.1　*单因子污染指数评价*　研究区土壤各重金属单因子污染评价结果见表 4。以山西省土壤背景值作为参考,5 种重金属单因子污染指数均值从大到小依次为:Hg(5.605)>Cd(3.161)>As(1.432)>Pb(1.419)>Cr(1.374)。从各重金属对每个土壤样点的污染等级来看,Pb,Cr 和 As 总体表现为轻度污染,清洁及轻度污染程度的样点占比分别为 95.2%,98.1%和 100%,中度和重度污染样点很少;Cd 为轻—中度污染,样点主要集中在中度污染和轻度污染,分别占比 50.9%和 34.1%,其中重度污染样点占比达到 10.6%;Hg 为重度污染,样点重度污染占比最高,为 74.5%,中度污染占比 11.1%,未污染及轻度污染仅占比 13.6%,显示在研究区 Hg 的污染最为严重。

表 4 晋中盆地单因子污染评价结果

重金属	各重金属单因子指数变化范围	单因子污染指数均值	污染程度/%			
			清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
Pb	0.849～2.732	1.419	2.9	92.3	4.8	0
Cd	0.600～6.900	3.161	4.4	34.1	50.9	10.6
Cr	1.184～3.644	1.374	13.5	84.6	1.4	0.5
As	0.849～2.732	1.432	28.4	71.6	0	0
Hg	0.913～20.783	5.605	0.1	13.5	11.1	74.5

2.2.2 *内梅罗综合污染指数评价* 通过计算样点中各重金属的平均及最大单因子污染指数得到综合污染指数。结果表明，各样点综合污染指数平均值为4.56，已经远高于重度污染阀值，其中达到重度污染和中度污染的土壤样点个数分别为 156，53 个，占比 73.1%和 25.5%，共计占比 98.6%，这反映出研究区重金属污染程度已非常严重，对土壤重金属的治理需求已经十分迫切。

2.2.3 *潜在污染指数评价* 综合考虑各重金属的毒性响应系数，计算出每个样点中单因子潜在生态污染指数及综合潜在生态危害指数。如图 1 所示，As，Cr 和 Pb 所有样点生态危害等级都为Ⅰ级轻度危害；Cd 样点中占比最大的为Ⅲ级强烈生态危害，其次为Ⅱ级中度生态危害；Hg 在Ⅳ级很强烈生态危害样点占比超过 50%，Ⅱ级中度危害与Ⅴ级极强烈危害样点占比相似，均为 25%左右。5 种重金属表现出的潜在生态危害等级差异较大，产生这一现象的可能有两方面的原因：一方面是由于各种重金属的毒性差异所致，毒性较强的重金属对 RI 值具有更大的贡献，另一方面则是由于研究区 Cd 和 Hg 的含量相对于背景值超标比较严重，这导致单因子污染指数相对其他重金属较大，因此使得 Cd 和 Hg 潜在生态危害指数突出。从综合潜在生态指数 RI 来看，潜在生态危害表现为中—强度，Ⅱ级和Ⅲ级生态危害占比最高。可以看出，研究区潜在生态危害风险比较严重，Cd 和 Hg 为主要的贡献因子。

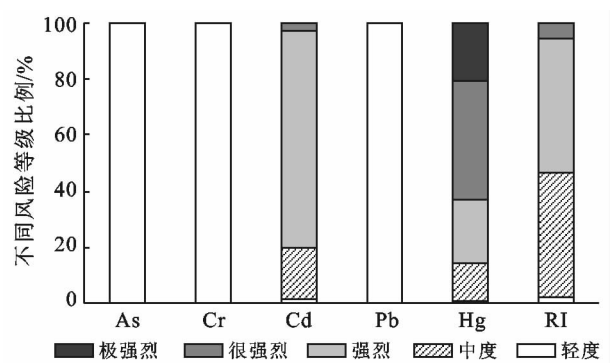


图 1 潜在生态风险指数评价

2.3 土壤重金属的污染空间分布

空间插值是通过对已知样点的特征值及样点间的空间位置拟合得到一个函数方程，进而反映出样点特征值与样点空间位置的数学关系，以此推断出未知区域样点的特征值。对各样点的土壤污染指数进行空间插值可以直观反映出一定范围内的重金属污染程度，因此，基于样点数量以及样点的分布情况，本研究采用 ArcGIS 地统计模块对潜在生态危害指数 RI 及综合污染指数进行 Kriging 插值。如图 2 所示，潜在生态危害指数和综合污染指数的空间分布格局基本相同，在盆地中南地区污染程度相对其他地区较浅，在太原地区、孝义、介休地区存在明显的污染峰值区，并向四周呈递减趋势。污染峰值区均靠近人口密集地区，这会对当地居民的身体健康产生危害，应引起重视。

3 讨 论

从盆地土壤重金属增加的原因看，晋中盆地作为山西省城市化和工业化水平最高的地区之一，目前当地的城市化水平已经达到 68%，不仅包括太原市、汾阳市、介休市、孝义市、太谷县城和平遥县城等 12 城市驻地和县区驻地，而且还建成了包括太原工业园区、榆次工业园区、太原不锈钢产业园区、孝义经济技术开发区、清徐经济开发区和太原高新技术开发区等 12 个经济开发区和工业园区。伴随着城市化水平的快速提高和工业规模的迅速扩大，尤以焦化产业发展最快，以煤炭、石油和天然气为主的能源消耗量也大幅度增加，造成烟气排放量增多，烟气中含有的 Cd，Pb，Cr，As 和 Hg 等重金属通过大气沉降到达地面进入土壤中，自进入 21 世纪以来每年均发生 30 多次覆盖整个盆地的重雾霾天气现象，尤以冬季最为严重，这是造成盆地内土壤重金属含量全面增高的主要原因。另外，长期以来盆地内农业生产在局部地方利用城市生活污水和工业废水进行灌溉，这是使盆地内土壤重金属含量增高的又一个原因。此外，近几十年来农业生产大量使用化肥、农药和除草剂，也是导致土

壤重金属含量增加的原因。在盆地的西南地区分布有众多煤矿,且开采历史悠久,依托丰富的煤炭资源,孝义、介休地区焦化产业最为集中,而在盆地北部工业园区密集分布并且涵盖两座火力发电厂,这可能是两个地区污染较为突出的原因。此外,太原地区以及孝义、介休地区是盆地城市化水平较高的地区,人口也最为稠密,农业生产及生活污水、废水的排放也加重了两地的土壤污染。

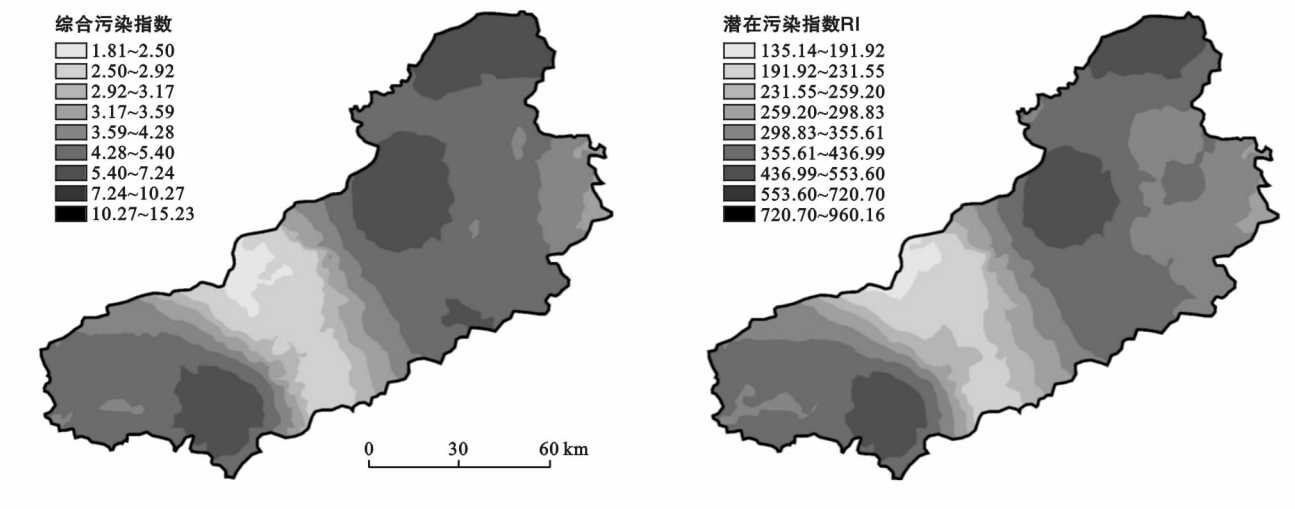


图 2　晋中盆地土壤重金属污染空间分布格局

4　结 论

(1) 晋中盆地土壤中 5 种重金属的平均含量都高于其背景值,表明土壤受到了不同程度的重金属污染。Hg 和 Cd 的含量均值分别高出背景值 5.61 和 3.16 倍,是盆地内土壤重金属污染的主要元素,其他 3 种重金属 Cr,Pb 和 As 的含量相对背景值超标不太严重,污染程度相对较轻。

(2) 单因子污染指数和单因子潜在生态危害指数结果表明:Hg 和 Cd 为最主要的污染因子,Pb,Cr 和 As 次之。综合污染指数和综合潜在生态危害指数结果表明:达中—重度污染的样点占比超过 95%,只有个别地区为轻度污染,盆地整体污染程度已经十分严重,应引起高度重视。

(3) 从土壤重金属的污染空间分布格局可以看出,盆地土壤整体均有不同程度的污染,除平遥、文水地区污染较轻外,其余地区均污染严重。在盆地南部孝义、介休地区及盆地北部太原地区污染突出,这与当地大量的经济活动息息相关。

[参 考 文 献]

[1] 陈晶中,陈杰,谢学俭,等. 土壤污染及其环境效应[J]. 土壤,2003,35(4):298-303.

[2] Chen T, Chang Q R, Liu J, et al. Identification of soil heavy metal sources and improvement in spatial mapping based on soil spectral information: A case study in northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2016,565:155-164.

[3] 刘硕,吴泉源,曹学江,等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 环境科学,2016, 37(1):270-279.

[4] Luo Lei, Ma Yibing, Zhang Shuzhen, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (8):2524-2530.

[5] Hu Yuanan, Cheng Hefa. Application of stochastic models in identification and apportionment of heavy metal pollution sources in the surface soils of a large-scale region[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(8):3752-60.

[6] Zhao Long, Xu Yafei, Hou Hong, et al. Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 2014,468/469:654-662.

[7] Pathak A K, Yadav S, Kumar P, et al. Source apportionment and spatial-temporal variations in the metal content of surface dust collected from an industrial area adjoining Delhi, India[J]. Science of the Total Environment, 2013,443(443C):662-672.

[8] Clement O O, Fatoba P O. Contamination and spatial distribution of heavy metals in topsoil surrounding a mega cement factory[J]. Atmospheric Pollution Research, 2014,5(2):270-282.

[9] Ding Qiang, Cheng Gong, Wang Yong, et al. Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions[J]. Science of the Total Environment, 2016,578:577-585.

(下转第 64 页)

硝化及 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2006，12(6)：840-844.

[6] 潘志勇，吴文良，牟子平，等. 不同秸秆还田模式和施氮量对农田 CO_2 排放的影响[J]. 土壤肥料，2006(1)：14-16.

[7] 强雪彩，袁红莉，高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO_2 释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报，2004，15(3)：469-472.

[8] 张电学，韩志卿，李东坡，等. 不同促腐条件下秸秆还田对土壤微生物量碳氮磷动态变化的影响[J]. 应用生态学报，2005，16(10)：1903-1908.

[9] 张电学，韩志卿，刘微，等. 不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应研究[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(6)：36-43.

[10] Sierra J. Temperature and soil moisture dependence of N mineralization in intact soil cores [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997，29(9)：1557-1563.

[11] Balota E L, Machineski O, Matos M A. Soilmircrobial biomass under different tillage and levels of applied pigs lurry [J]. Revista Brasileirade Engenharia Agricolae Ambiental, 2012，16(5)：487-495.

[12] 中国科学院南京土壤研究所 土壤物理研究室编. 土壤物理性质测定法[M]. 北京：科学出版社，1978.

[13] Ning Tangyuan , Han Bin, Jiao Nianyuan, et al. Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system. [J]. Plant Soil & Environment, 2009, 55(8)：327-333.

[14] 慕平，张恩和，王汉宁，等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报，2011，25(5)：81-85.

[15] 李新举，张志国，李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J]. 土壤学报，2001，38(1)：135-138.

[16] Kahlon M S, Lal R, Ann Varughese M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio [J]. Soil & Tillage Research, 2013，126(1)：151-158.

[17] 崔婷婷，窦森，杨轶囡，等. 秸秆深还对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报，2014，51(4)：718-725.

[18] 矫丽娜，李志洪，殷程程，等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J]. 土壤学报，2015，52(3)：665-672.

[19] 武际，郭熙盛，鲁剑巍，等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J]. 生态学报，2013，33(2)：565-575.

[20] 潘剑玲，代万安，尚占环，等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报，2013，21(5)：526-535.

[21] 张亚丽，张娟，沈其荣，等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. 应用生态学报，2002，13(12)：1575-1578.

[22] Nicholson F A, Chambers B J, Mills A R, et al. Effects of repeated straw incorporation on crop fertilizer nitrogen requirements, soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses [J]. Soil Use and Management, 1997，13(3)：136-142.

(上接第 57 页)

[10] Wu Shaoha, Shi Yaxing, Zhou Shenglu, et al. Modeling and mapping of critical loads for heavy metals in Kunshan soil[J]. Science of the Total Environment, 2016，569-570：191-200.

[11] He Binyun, Zhao Jun, Shi Jingbo, et al. Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2)：134-140.

[12] 陈秀端，卢新卫，赵彩凤，等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. 地理学报，2011，66(9)：1281-1288.

[13] 谷蕾，宋博，仝致琦，等. 连霍高速不同运营路段路旁土壤重金属分布及潜在生态风险[J]. 地理科学进展，2012，31(5)：632-638.

[14] 李晋昌，张红，石伟. 汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布[J]. 环境科学，2013，34(1)：116-120.

[15] 王应刚. 晋中盆地城市化发展对区域生态环境影响研究[D]. 山西 太原：山西大学，2007.

[16] 刘勇，张红，尹京苑. 汾河太原段土壤中 Hg，Cr 空间分布与污染评价[J]. 农业工程学报，2008，24(5)：57-60.

[17] 高鹏，刘勇，苏超. 太原城区周边土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报，2015，34(5)：866-873.

[18] 徐争启，倪师军，庹先国，等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术，2008，31(2)：112-115.

[19] 史崇文，赵玲芝，郭新波，等. 山西土壤元素背景值及其特征[J]. 华北地质矿产杂志，1994(2)：188-196.

[20] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy[J]. Science of the Total Environment, 2002，300(1/3)：229-243.