

李裕瑞, 王志炜, 门大威, 等. 平原农区空心村典型土壤的重金属污染评价——以山东省禹城市为例[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 328-334.
LI Yu-rui, WANG Zhi-wei, MEN Da-wei, et al. Consolidation and Using Oriented Evaluation of Heavy Metal Pollution in Typical Soils of Hollowed Villages of Plain Agricultural Zones: A Case Study of Yucheng City, Shandong Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 328-334.

平原农区空心村典型土壤的重金属污染评价 ——以山东省禹城市为例

李裕瑞^{1,2}, 王志炜³, 门大威⁴, 曹智¹, 范朋灿¹, 李峰³, 龙花楼^{1,2}, 刘彦随^{1,2*}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 北京 100101; 3.山东省土地综合整治服务中心, 山东 济南 250014; 4.山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要:空心村整治是农村土地综合整治的重要内容,在以土地可持续利用为核心的目标导向下,揭示空心村内典型土壤重金属污染情况是整治工作特别是构建耕层土体的先导环节。本文以黄淮海平原农区的禹城市为例,分析典型空心村在整治时可能涉及的村内道路、晾晒场院、坑塘底泥、林地表土、院落农地、院落实土、土墙墙体等7种土壤的As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn含量,利用单项污染指数和综合污染指数,按照有关国家标准,评价其重金属污染程度,为空心村改造中土壤的安全、合理利用提供依据。结果表明:前述7类参试土壤中,除院落农地的污染指数为0.85(污染等级为II,属“较清洁”土壤)外,其余6类的综合污染指数均<0.7(污染等级为I,属“清洁”土壤),可直接用于空心村整治中的耕层土体重构。本研究基于整治利用导向进行了平原农区空心村典型土壤类型划分,揭示了其重金属污染状况,对于科学开展空心村整治、建设更加安全的高标准农田具有重要参考价值。

关键词:平原农区;空心村整治;不同类型土壤;重金属污染;综合评价

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)04-0328-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0079

Consolidation and Using Oriented Evaluation of Heavy Metal Pollution in Typical Soils of Hollowed Villages of Plain Agricultural Zones: A Case Study of Yucheng City, Shandong Province, China

LI Yu-rui^{1,2}, WANG Zhi-wei³, MEN Da-wei⁴, CAO Zhi¹, FAN Peng-can¹, LI Feng³, LONG Hua-lou^{1,2}, LIU Yan-sui^{1,2*}

(1.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Beijing 100101, China; 3.Center for Comprehensive Land Consolidation and Relative Service of Shandong Province, Jinan 250014, China; 4.College of Resources and Environment of Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Hollow village renovation is an important content of rural land comprehensive consolidation. Under the core goal of sustainable utilization of land, revealing heavy metal pollution in typical soils of hollow village is the guiding link of the consolidation work, especially the reconstruction of farmland. Taking Yucheng City of Huang-Huai-Hai Plain as an example, this paper aims to analyze the content of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in seven kinds of typical soils, namely the village roads, sunning grounds, pit-pond sediments, woodland topsoils, courtyard farmlands, courtyard soils and clay wall soils which may be involved in the reconstruction of typical hollow village. Individual pollution index and comprehensive pollution index were used to evaluate the degree of heavy metal pollution according to the relevant national standards in order to provide the basis for safe and rational soil utilization during the hollow village consolidation. The results showed that in the above 7 types of tested soils, except for the pollution index of courtyard farmland was 0.85 (pollution level II, belong to "less

收稿日期:2017-01-03

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAL01B05)

作者简介:李裕瑞(1983—),男,四川隆昌人,博士,副研究员,研究方向为土地利用、区域农业与农村发展。E-mail:lyr2008@163.com

*通信作者:刘彦随 E-mail:liuys@igsnr.ac.cn

clean" soil), other six types were <0.7 (pollution level I, belong to "clean" soil), which could be directly used in the hollow village consolidation for reconstruction of topsoil for agriculture. This study revealed the heavy metal pollution condition in the typical soils of plain agricultural areas. It has important reference value to the consolidation of hollow villages scientifically and the reconstruction of safe and high standard farmland.

Keywords: plain agricultural areas; hollowed village consolidation; different kinds of typical soils; heavy metal pollution; comprehensive evaluation

改革开放以来,中国工业化和城市化快速发展,对农村经济和社会发展产生深刻影响^[1]。随着农村人口非农转移与就业增多,农民收入持续增加,农村住房需求不断增长,在农村建设规划缺失、严格土地管理缺位的情况下,形成了新房建设村外扩张、村内闲置的农村空心化现象,造成土地资源的严重破坏和浪费^[2-3]。空心村是农村经济社会转型发展期出现的一种乡村地域系统退化性演变的结果,造成了农村土地资源的浪费和低效利用,严重阻碍了农村经济社会的可持续发展^[2]。开展“空心村”治理工作,不仅是实施城乡建设用地增减挂钩的有效手段,而且对增加耕地面积、改善农村布局、优化村民居住环境、提高土地节约集约利用水平和促进农村经济可持续发展更具有重要意义^[4-6],也是美丽乡村建设的应有内涵^[7]。

工农业生产和城乡生活往往带来污染排放,污染物以直接或间接的方式进入土体,影响到土壤理化性质与清洁程度,进而影响食物安全和健康风险^[8]。土壤重金属含量作为土壤化学性质的一个重要指标,可有效地反映土壤污染状况。空心村土壤理化性质特别是清洁程度对新增耕地的生产能力和产品健康具有重要影响。对空心村土壤重金属污染损失现状进行合理的评价,可有效地指导空心村土壤重金属污染治理和复垦后耕地土壤改良与培肥,对于高标准基本农田建设及土地资源可持续利用具有重要意义。

农村环境污染、保护与治理特别是重金属污染问题已得到学界广泛关注^[9-11],重点涉及污染时空分析、来源解析、污染评价、生态修复及相关法律和体制机制问题^[12-17]。从关注的区域来看,主要集中在近郊区、骨干交通沿线、集约化农区及养殖集中区等^[11,18-20],而对乡村聚落空间内的相关研究则相对较少^[11]。近年来有学者开始关注采煤塌陷地复垦中土壤重金属含量及环境风险分析,对复垦村庄土壤重金属污染潜在生态风险评价^[21-22]、污染损失评价^[23]等开展了先导研究。但是,关于以农业生产为主导的传统平原农区村庄内不同类型土壤的重金属含量分析的研究仍然薄弱,难以为空心村整治中的土壤综合利用与后续清洁生

产提供直接支撑。

鉴于此,本研究以位于黄淮海平原典型农区的山东省禹城市为例,对典型空心村的不同类型土体进行取样,测试分析其 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量,利用单项污染指数和综合污染指数,按照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)和《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332—2006)对其重金属污染状况进行综合评价,以充分了解空心村整治中构建耕层土体所需土壤的重金属污染状况,进而更好地建设高标准、无污染的复垦农田,营造乡村生产、生活新空间。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

禹城市位于山东省西北部黄河冲积平原,气候属暖温带季风气候区,四季分明,光照充足,年均气温 13℃,年均降水 610 mm,土壤类型以潮土和盐化潮土为主,是我国黄淮海传统农区的典型代表。伦镇地处禹城南部,同样为农业型乡镇,其村庄普遍以农业生产为主,主要种植玉米、小麦等农作物,灌溉主要为引黄灌溉及机井灌溉,乡村地区的非农企业较少,是传统农区没有明显外源性污染的典型乡村。20 世纪八九十年代以来该地区的乡村聚落大多急速外扩,空心化问题突出^[2]。

1.2 样品采集

根据利用现状和理化特性的可能差异,传统农区的空心村整治通常主要涉及表 1 所示第 1~7 类土体,本研究还取了第 8~10 类土壤样品作为比较,基本涵盖了空心村整治中可能涉及的土体类型。2015 年 4 月,选取牌子、杨桥、朱王 3 个典型空心村,在典型土体区域随机采集表 1 所示相关土体的样本,取 0~20 cm 表层土壤。每个样品由 3~5 个分样组成,各分样混合后用四分法取 1.5 kg。经除杂、风干后研磨,过 200 目筛备用。10 类土壤共采集样品 70 个,每类 7 个样品。

1.3 分析项目与方法

将土样混匀后抽取其中适量样品进行砷、镉、铬、

表 1 传统农区空心村整治涉及的典型土壤类型

Table 1 Types of soils may be involved in rural residential land consolidation of traditional agricultural areas

编号	类型	典型特征	可能污染源	
所涉土壤	1	村内道路	多为素土路面或碎石路面,由于长期用于村民和车辆同行,压损程度较高;村庄聚落内部道路占地面积通常不足 0.6 hm ²	土路可能受到外源污染的影响;水泥路面下的土壤受污染的概率较小
	2	晾晒场院	主要用于小麦、玉米及其秸秆的晾晒;其规模因村庄而异,有的多达数公顷	可能受到外源污染的影响
	3	坑塘底泥	当地坑塘多因取土建房形成,后来主要用于雨水和生活污水汇集,底泥可能具有较好的肥力;其规模不等,多则数公顷	雨水、生活污水在坑塘汇集的过程中,污染物可能沉淀在底泥中
	4	林地表土	村内和村边林地的表土,通常具有较好的土壤特性;其规模不等,多则数公顷	可能因垃圾堆放而受外源污染的影响
	5	院落农地	民宅院落内的菜园土壤,通常具有较好的土壤理化特性;其规模不等,户均约 50~200 m ²	可能因为灌溉、农药和化肥使用等而受到污染
	6	院落实土	民宅院落内的空地土壤,已被一定程度压实;其规模不等,户均约 60 m ²	可能因为生活污水、垃圾等而受到污染
	7	土墙墙体	土坯房的土墙墙体,多为数十年前从农田或坑塘取土压实而成;整治时涉及大量土方的转移	受污染的可能性不大
其他土壤	8	普通农田	长期用于小麦、玉米等大宗作物种植的现状耕地	可能因为灌溉、农药和化肥使用等而受到污染
	9	复垦农田	前期通过常规原土复垦形成的新增耕地,并经过 1 年的种植	可能因为灌溉、农药和化肥使用等而受到污染
	10	大棚土壤	通过大量化肥投入并多年连续种植的设施蔬菜大棚内的土壤	可能因为灌溉、农药和化肥使用等而受到污染

铜、镍、铅、锌 7 项元素的测定。关于镉、铬、铜、镍、铅、锌的测定,首先各称取 0.05 g 样品,加入 6 mL 硝酸、3 mL 氰氟酸、2 mL 盐酸,在微波炉消解后,2 mL 高氯酸赶酸,定容 25 mL;借助 ICP-OES(电感耦合等离子体光谱仪,美国 PE 公司 PerkinElmer,5300DV)测定分析铬、铜、镍、铅、锌含量;借助 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪,美国 PE 公司 PerkinElmer,ELAN DRC-e)测定分析镉含量。对于砷(As)元素则另行分析,前处理 7 mL 硝酸,1.2 mL 高氯酸,120 ℃以下加热,定容 75 mL,用氰化物发生法,借助原子荧光光度计(北京海光仪器公司,AFS-9780 双道原子荧光光度计)进行测定。测试工作委托中国科学院地理科学与资源研究所理化分析中心完成。

1.4 评价方法

本研究采用土壤重金属污染状况评价研究常用的对比分析法进行评价分析。先将污染负荷与区域背景值比较,分析其差异和变异特征;然后将污染负荷与国家土壤环境质量标准进行比较,计算单因子污染指数和综合指数,评判其污染程度。

1.4.1 单因子指数法

通过单因子评价,可以确定主要的重金属污染物及其危害程度。一般以污染指数来表示,以重金属含量实测值和评价标准相比除去量纲来计算污染指数。计算方法如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为某污染物 i 的单项污染指数; C_i 为污染物 i 的实测值; S_i 为污染物 i 的评价标准。若 $P_i > 1$ 表明土壤受到污染物 i 的污染; $P_i \leq 1$ 则表示未受到污染物 i 的污染; P_i 值越高则污染程度越高。

1.4.2 综合指数法

单因子指数只能反映各重金属元素各自的污染程度,不能全面地反映土壤的污染状况,综合污染指数兼顾了单因子污染指数平均值和最高值,可以突出污染较重的重金属污染物的作用。计算方法如下:

$$P_{\text{综}} = [(P_{i\text{平均}}^2 + P_{i\text{最大}}^2) / 2]^{1/2} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为土壤重金属综合污染指数; $P_{i\text{平均}}$ 为各土壤重金属单项污染指数的平均值; $P_{i\text{最大}}$ 为各土壤重金属单项污染指数中的最大值。

1.5 评价标准

参照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)和《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332—2006)设定评价标准值。根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),土壤质量分 3 个等级:(1)一级标准,为保护区自然生态、维持自然背景的土壤环境质量的限制值,以评价区域土壤诸元素背景值为基准;(2)二级标准,为保障农业生产、维护人体健康的土壤限制值。鉴于多数重金属元素即使在不影响植物生长的浓度下,也易被植物富集,进入食物链危及人类健康,二级主要针对几种毒性较大的元素(如汞、镉、铅等)制定诸元素土壤限制值,保证土壤质量基本上对植物

和环境不造成危害和污染,常被用于环境质量评价,以判别评价区域是否受污染;(3)三级标准,为保障农林生产和植物正常生长的土壤临界值。第三级标准依据生态与环境效应应试结果,制定出不至于明显产生毒害症状的土壤污染物限制浓度。本研究选用二级标准的“ $6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5$ ”段各污染物标准,该标准值与《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332—2006)基本衔接,Pb采用后者提供的更为严格的参数标准。标准值设定情况见表2,污染指数的分级标准见表3。

2 结果与分析

2.1 各类土样的重金属含量总体特征

由于土壤重金属污染的非均匀性,通过对70个样本的490个数据进行初步分析处理,得到7种重金属元素的极大值、极小值、均值、标准差和变异系数,

见表4。由表4可见:(1)Ni的变异系数最大,Cr、Zn和Cu次之,说明此类重金属在样品间的差异性较高,而Pb、Cd和As的变异系数相对更小,说明其样品间的差异性更小;(2)从土壤重金属元素的含量与山东省土壤背景值的比值来看,除Pb外其余6种元素的比值均大于1,尤以Cd和Ni相对较高(>1.7),这表明当地空心村内的土壤中重金属特别是Cd、Ni的积累受外源因素的影响较大。

2.2 土壤环境质量的单因子评价与综合评价

参照表2的计算标准和表3的分级标准,进行各类土壤样品的重金属含量评价(表5)。就不同的重金属类型而言,受试土样仅Ni的污染指数略高于0.7,其他重金属的污染指数均小于0.7,表明总体而言重金属含量尚未达到污染的程度。

由图1可见:(1)10种土壤样品的总体的重金属含量(总体平均值),除Ni为“较清洁”水平外,其余均

表2 土壤环境质量评价标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Soil environmental quality evaluation standard($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

评价标准	重金属类型及相关标准限值						
	As	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Pb
山东省背景值①	8.90	64.30	22.30	24.40	60.90	0.075	24.50
土壤环境质量二级标准(Si)②	≤ 30	≤ 200	≤ 100	≤ 50	≤ 250	≤ 0.3	≤ 80

注:①山东省背景值取自《中国土壤元素背景值》(中国环境监测总站主编,中国环境科学出版社,1990),该背景值仅作参考分析用,不用于污染程度评价测算;②Pb的土壤环境质量标准采用《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332—2006),其余执行《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的二级标准。

表3 土壤污染指数分级标准

Table 3 Soil pollution grading standard

污染指数($P_i, P_{\text{综}}$)区间	污染程度分级	污染程度分类	污染水平
≤ 0.7	I	清洁	安全
(0.7, 1.0]	II	较清洁	安全,但处于警戒区
(1.0, 2.0]	III	轻度污染	土壤污染超标,作物可能受到轻污染
(2.0, 3.0]	IV	中度污染	土壤、作物受到中度污染
≥ 3.0	V	重度污染	土壤、作物受污染已相当严重

表4 测试土样各类重金属含量及其与背景值的比较($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 4 Comparison of heavy metal content of testing soils and its background value($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

重金属	极大值	极小值	均值	标准差	变异系数/%	山东省背景值	平均值/背景值
As	17.59	4.32	9.73	2.81	28.88	8.90	1.09
Cd	0.26	0.07	0.13	0.03	23.08	0.075	1.74
Cr	216.38	53.23	87.43	40.10	45.87	64.30	1.36
Cu	271.75	10.49	30.28	32.99	43.70	22.30	1.36
Ni	155.32	20.88	42.3	25.77	60.92	24.40	1.73
Pb	37.36	10.20	22.34	4.86	21.75	24.50	0.91
Zn	218.40	41.43	79.14	35.76	45.19	60.90	1.30

表 5 受试土样的重金属总体污染指数

Table 5 Overall heavy metal pollution index of all of the soil samples

重金属	污染负荷均值 C_i	土壤环境质量二级标准 S_i	单项污染指数 P_i	污染程度分类
As	9.73	30	0.32	清洁
Cd	0.13	0.3	0.43	清洁
Cr	87.43	200	0.44	清洁
Cu	30.28	100	0.30	清洁
Ni	42.3	50	0.85	较清洁
Pb	22.34	80	0.28	清洁
Zn	79.14	250	0.32	清洁

达到“清洁”水平;(2)就不同类型重金属而言,仅蔬菜大棚和院落农地的 Ni 含量指数略大于 1 属“轻度污染”,村内道路和院落实土的 Ni 含量指数为 0.85 属“较清洁”;(3)整体而言,除院落农地的 Ni 含量指数略大于 1,属“轻度污染”外,案例区在空心村整治中可能涉及到的村内道路、晾晒场院、坑塘底泥、林地表土、院落实土、土墙墙体等样品的重金属含量均未超标,风险较低。

从不同类型土壤样品的综合污染指数(表 6)来看:(1)蔬菜大棚土壤受 Ni 超标及单项污染指数的均值普遍较高的影响,综合污染指数为 1.013,略大于 1,属“轻度污染”;(2)院落农地和院落实土受 Ni 含量较高的影响,综合污染指数介于 0.7 和 1 之间,属“较清洁”;(3)其余受试样品的综合污染指数均小于 0.7,属于“清洁”的安全等级。总体而言,空心村综合整治复垦还田及其高标准农田建设所需土体安全清洁。

3 讨论

本研究从土地资源的工程化、再利用视角,揭示

了平原农区空心村整治时可能涉及的不同类型土壤样品的重金属污染程度。总的来看,受试样品污染程度低于国家标准,所涉土体均可用于耕层土体构建。进一步开展不同类型土壤污染程度、物理结构、养分含量的耦合研究,特别是级配和空间运筹,即可为空心村整治中的土体优化配置提供更为精准的科学参考。

空心化村庄的地域类型多样,土体特征也存在差异性,空心村整治工程需因地制宜。对于山地丘陵区、城市近郊区等类型区域的空心村整治而言,也可参照本类型划分和分析方法,必要时可结合本区域的村庄土地利用、土壤理化特性,提出更为科学合理的划分方案,进而开展污染程度评价、物理结构分析、养分含量测试和综合整治方案研制。

分析评价发现,蔬菜大棚土壤和院落农地存在轻度 Ni 污染,经调查了解,Ni 污染很可能源于施肥不合理、废弃物堆积等不合理耕作习惯,使 Ni 及其化合物进入农业土壤并积累。事实上,土壤中 Ni 轻度污染的现象较为普遍,可能源于不合理的种植过程^[24-27]。应加强农田和村庄的污染监测,并着力引导农民在生产、生活中科学用地。

4 结论

本研究的取样测试分析发现:

(1) 研究区受试土样的 Ni、Cr、Zn 和 Cu 含量样品间差异相对较大,除 Pb 外,As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 含量均值都略高于山东省土壤背景值;

(2) 10 种受试土壤样品的总体的重金属含量,仅 Ni 的污染指数为 0.85,其余重金属的综合污染指数均 < 0.7,表明研究区受试土样的各类重金属含量尚未达到污染层级;

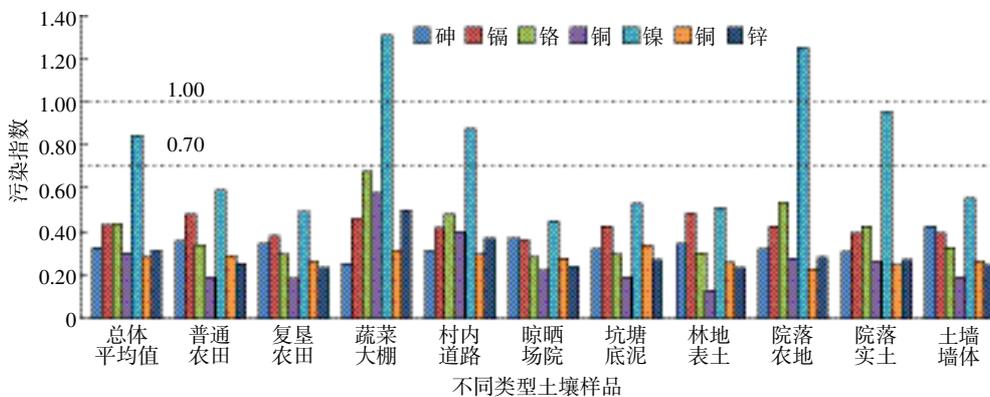


图 1 不同类型土壤样品的各类重金属污染指数

Figure 1 Heavy metal pollution index of typical soil samples

表6 不同类型土壤样品的重金属污染评价结果
Table 6 Heavy metal pollution index and grade of typical soil samples

土样类型	指标	重金属							$P_{综}$	污染等级
		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
普通农田	C_i	10.65	0.14	67.14	19.25	29.65	22.75	63.63	0.489	$P_{综}<0.7$ 清洁(安全)
	P_i	0.36	0.48	0.34	0.19	0.59	0.28	0.25		
复垦农田	C_i	10.37	0.12	59.66	18.65	24.77	21.13	58.42	0.415	$P_{综}<0.7$ 清洁(安全)
	P_i	0.35	0.38	0.30	0.19	0.50	0.26	0.23		
蔬菜大棚	C_i	7.57	0.14	135.72	57.98	65.39	25.01	124.74	1.013	$P_{综}>1$ 轻度污染
	P_i	0.25	0.46	0.68	0.58	1.31	0.31	0.50		
村内道路	C_i	9.38	0.12	95.93	39.81	43.92	23.59	92.82	0.698	$P_{综}<0.7$ 清洁(安全)
	P_i	0.31	0.41	0.48	0.40	0.88	0.29	0.37		
晾晒场院	C_i	11.19	0.11	56.13	21.65	22.44	22.18	60.90	0.388	$P_{综}<0.7$ 清洁(安全)
	P_i	0.37	0.37	0.28	0.22	0.45	0.28	0.24		
坑塘底泥	C_i	9.69	0.13	60.06	19.33	26.48	27.16	67.04	0.445	$P_{综}<0.7$ 清洁(安全)
	P_i	0.32	0.43	0.30	0.19	0.53	0.34	0.27		
林地表土	C_i	10.22	0.15	60.21	13.18	25.51	20.50	58.99	0.427	$P_{综}<0.7$ 清洁(安全)
	P_i	0.34	0.49	0.30	0.13	0.51	0.26	0.24		
院落农地	C_i	9.54	0.13	106.37	27.44	62.63	17.89	70.27	0.947	$P_{综}>0.7$ 较清洁(警戒线)
	P_i	0.32	0.42	0.53	0.27	1.25	0.22	0.28		
院落实土	C_i	9.27	0.12	85.28	26.37	47.85	19.76	67.15	0.736	$P_{综}>0.7$ 较清洁(警戒线)
	P_i	0.31	0.39	0.43	0.26	0.96	0.25	0.27		
土墙墙体	C_i	12.63	0.12	64.67	18.90	27.89	21.05	61.61	0.463	$P_{综}<0.7$ 清洁(安全)
	P_i	0.42	0.39	0.32	0.19	0.56	0.26	0.25		

(3)除院落农地的Ni含量指数略大于1,属“轻度污染”外,案例区在空心村整治复垦还田与高标准农田建设中可能涉及到的村内道路、晾晒场院、坑塘底泥、林地表土、院落实土、土墙墙体等样品的重金属含量均未超标,重金属污染不明显;

(4)蔬菜大棚和院落农地的Ni含量为“轻度污染”,说明此类高强度耕作农田土壤存在重金属污染风险,应引起重视。

参考文献:

- [1] Long H L, Liu Y S, Li X B, et al. Building new countryside in China: A geographical perspective[J]. *Land Use Policy*, 2010, 27(2):457-470.
- [2] 刘彦随,刘玉,翟荣新. 中国农村空心化的地理学研究及整治实践[J]. *地理学报*, 2009, 64(10):1193-1202.
LIU Yan-sui, LIU Yu, ZHAI Rong-xin. Geographical research and optimizing practice of rural hollowing in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(10):1193-1202. (in Chinese)
- [3] Long H L, Li Y R, Liu Y S, et al. Accelerated restructuring in rural China fueled by “increasing vs. decreasing balance” land-use policy for dealing with hollowed villages[J]. *Land Use Policy*, 2012, 29(1):11-22.
- [4] Long H L. Land consolidation: An indispensable way of spatial restructuring in rural China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2):211-225.
- [5] Li Y R, Liu Y S, Long H L, et al. Community-based rural residential land consolidation and allocation can help to revitalize hollowed villages in traditional agricultural areas of China: Evidence from Dancheng County, Henan Province[J]. *Land Use Policy*, 2014, 39:188-198.
- [6] Liu Y S, Yang R, Li Y H. Potential of land consolidation of hollowed villages under different urbanization scenarios in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(3):503-512.
- [7] 刘彦随,周扬. 中国美丽乡村建设的挑战与对策[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(2):97-105.
LIU Yan-sui, ZHOU Yang. Challenges and countermeasures for beautiful countryside construction in China[J]. *Journal of Agricultural Resources & Environment*, 2015, 32(2):97-105. (in Chinese)
- [8] Lu Y, Song S, Wang R, et al. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China[J]. *Environment International*, 2015, 77:5-15.
- [9] Tilt B. The struggle for sustainability in rural China: Environmental values and civil society[M]. New York: Columbia University Press, 2013.
- [10] Deng Y, Yang G. Pollution and protest in China: Environmental mobilization in context[J]. *The China Quarterly*, 2013, 214:321-336.
- [11] 李裕瑞,刘彦随,龙花楼,等. 大城市郊区村域转型发展的资源环境效应与优化调控研究——以北京市顺义区北村为例[J]. *地理学报*, 2013, 68(6):825-838.
LI Yu-rui, LIU Yan-sui, LONG Hua-lou, et al. Village transformation development, resources and environment effects and their optimal regulation in the metropolitan suburbs: The case of Beicun in Shunyi Dis-

- tract, Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(6):825–838. (in Chinese)
- [12] Škrbić B, Đurišić–Mladenović N. Distribution of heavy elements in urban and rural surface soils; The Novi Sad city and the surrounding settlements, Serbia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1):457–471.
- [13] Tilt B. Industrial pollution and environmental health in rural China: Risk, uncertainty and individualization[J]. *The China Quarterly*, 2013, 214:283–301.
- [14] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non–point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1159–1168.
- [15] Wu M, Tang X, Li Q, et al. Review of ecological engineering solutions for rural non–point source water pollution control in Hubei Province, China[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224(5):1–18.
- [16] He G, Zhang L, Mol A P J, et al. Why small and medium chemical companies continue to pose severe environmental risks in rural China[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185:158–167.
- [17] He G, Zhang L, Mol A P J, et al. Revising China’s environmental law[J]. *Science*, 2013, 341(6142):133.
- [18] 朱建军, 崔保山, 杨志峰, 等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. *生态学报*, 2006, 26(1):146–153.
ZHU Jian–jun, CUI Bao–shan, YANG Zhi–feng, et al. Spatial distribution and variability of heavy metals contents in the topsoil along roadside in the longitudinal range–gorge region in Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1):146–153. (in Chinese)
- [19] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1):39–45.
ZHENG Hai–long, CHEN Jie, DENG Wen–jing, et al. Spatial analysis and pollution assessment of soil heavy metals in the steel industry area of Nanjing peri–urban zone[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1):39–45. (in Chinese)
- [20] 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 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 Fei–fei, SUN Dan–feng, LI Hong, et al. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8):330–337. (in Chinese)
- [21] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):348–354.
FAN Wen–hua, BAI Zhong–ke, LI Hui–feng, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):348–354. (in Chinese)
- [22] 张琛, 师学义, 马桦薇, 等. 煤炭基地复垦村庄土壤重金属污染生态风险评价[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5):277–284.
ZHANG Chen, SHI Xue–yi, MA Hua–wei, et al. Assessment on ecological risk of soil heavy metal pollution in reclaimed village of coal base[J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2014, 21(5):277–284. (in Chinese)
- [23] 高奇, 师学义, 李牧, 等. 复垦村庄土壤重金属污染损失评价[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2):204–209.
GAO Qi, SHI Xue–yi, LI Mu, et al. Evaluation on heavy metal pollution loss of soil in reclaimed village[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2014, 28(2):204–209. (in Chinese)
- [24] 杨国义, 罗薇, 张天彬, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中镍的含量分布特征[J]. *生态环境学报*, 2007, 16(3):818–821.
YANG Guo–yi, LUO Wei, ZHANG Tian–bin, et al. The distribution of Ni contents in agricultural soils in the Pearl River Delta, China[J]. *Ecology & Environment*, 2007, 16(3):818–821. (in Chinese)
- [25] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2524–2530.
- [26] 王小庆, 马义兵, 黄占斌. 土壤中镍生态阈值的影响因素及预测模型[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5):220–225.
WANG Xiao–qing, MA Yi–bing, HUANG Zhan–bin. Influence factors and prediction model for soil nickel ecological threshold[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(5):220–225. (in Chinese)
- [27] 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[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(3):1589–1597.
CHEN Tong–bin, SONG Bo, ZHENG Yuan–ming, et al. A survey of nickel concentrations in vegetables and vegetable soils of Beijing and their health risk[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3):1589–1597. (in Chinese)