

三峡库区不同土地利用土壤重金属分布特征与污染评价

周萍 文安邦 史忠林 严冬春 龙翼

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要:为揭示不同土地利用方式土壤重金属的含量、分布及污染特征,选取三峡库区典型小流域不同土地利用方式:柑橘果园(CO)、林地(FL)、旱坡麦地(WD)、旱坡菜地(VD)、温室大棚蔬菜地(VG)、水稻田(PL)作为研究对象,研究了不同土地利用方式土壤重金属的含量变化、分布规律,并进行污染评价。研究表明,6种土地利用类型土壤重金属元素Pb含量由大到小表现为:VG、CO、PL、VD、FL、WD,土壤重金属元素Cr含量由大到小表现为:CO、VG、PL、VD、FL、WD,土壤重金属元素Cu含量由大到小表现为:VG、VD、CO、PL、FL、WD,土壤重金属元素Zn含量由大到小表现为:CO、VG、PL、WD、VD、FL,土壤重金属元素Cd含量由大到小表现为:VG、CO、WD、PL、VD、FL。土壤重金属Pb含量与Cr、Cu、Zn、Cd含量均存在极显著正相关关系($p < 0.01$),Cr含量与Cu和Cd含量呈极显著正相关($p < 0.01$),与Zn含量呈显著正相关($p < 0.05$)。6种土地利用类型土壤重金属Pb、Cr、Cu、Zn、Cd的单项污染指数变化分别为0.06、0.14、0.15、0.14和1.70,综合污染指数为0.91,污染等级为警戒线,污染水平属于Ⅱ级,尚清洁,6种土地利用类型土壤重金属的综合污染指数由大到小表现为:VG、CO、VD、PL、WD、FL。潜在生态风险评价表明,6种土地利用类型土壤的重金属Pb、Cr、Cu和Zn均属于轻度生态危害。土壤重金属元素Cd在林地、旱坡麦地和水稻田土壤中属于中度生态危害,而在柑橘果园、旱坡菜地和温室大棚蔬菜地土壤中属于较强生态危害。5种土壤重金属潜在生态危害系数从大到小分别为: Cd、Pb、Cu、Cr、Zn。

关键词: 三峡库区; 土地利用类型; 土壤重金属; 分布特征; 污染评价

中图分类号: X53; X131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0207-07

Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Soil Heavy Metals of Different Land Use Types in Three Gorges Reservoir Region

ZHOU Ping WEN Anbang SHI Zhonglin YAN Dongchun LONG Yi

(The Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aimed to reveal the distribution characteristics of different land use types, six land use types were chosen, including citrus orchard (CO), forest land (FL), wheat dry land (WD), vegetable dry land (VD), vegetable greenhouse land (VG) and paddy land (PL) as the research objectives in the typical watershed in Three Gorges Reservoir region. The contents and distribution characteristics and pollution evaluation were all analyzed, the results showed that the order of Pb contents changed from high to low were VG, CO, PL, VD, FL and WD, the Cr contents changed from high to low were CO, VG, PL, VD, FL and WD, the Cu contents changed from high to low were VG, VD, CO, PL, FL and WD, the Zn contents changed from high to low were CO, VG, PL, WD, VD and FL and the Cd contents changed from high to low were VG, CO, WD, PL, VD and FL. Meanwhile, there existed obviously positive correlation between Pb content and Cr, Cu, Zn and Cd contents ($p < 0.01$), there also existed obviously positive correlation between Cr content and Cu, Cd contents ($p < 0.01$) and there existed positive correlation between Cr content and Zn content ($p < 0.05$). The estimation of single pollution index of these five soil heavy metals, i. e., Pb, Cr, Cu, Zn, Cd contents of the six land use types

收稿日期: 2016-11-09 修回日期: 2016-12-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402301)、国家自然科学基金项目(41671286)和中国科学院科技服务网络(STS)项目(KFJ-SW-ST5-175、KFJ-EW-ST5-008)
作者简介: 周萍(1981—),女,副研究员,博士,主要从事坡耕地土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: zp09@imde.ac.cn
通信作者: 文安邦(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: wabang@imde.ac.cn

changed from high to low were 0.06, 0.14, 0.15, 0.14 and 1.70. And the comprehensive pollution index was 0.91, the pollution degree belonged to guard line and the pollution level was the II level—relative clean. Meanwhile, the order of the six land use type of soil heavy metals changed from high to low were VG, CO, VD, PL, WD and FL. The results of the potential ecological risk index indicated that the soil heavy metals Pb, Cr, Cu and Zn belonged to light ecological risk. However, the soil heavy metal of Cd belonged to middle ecological risk in the forest land, dry land of wheat and paddy land, Cd belonged to a bit strong ecological risk in the citrus orchard, vegetable dry land and vegetable greenhouse land. And the potential ecological risk index of these five soil heavy metals changed from high to low were Cd, Pb, Cu, Cr and Zn.

Key words: Three Gorges Reservoir region; land use types; soil heavy metals; distribution characteristics; pollution evaluation

引言

土壤是生态环境的重要组成部分,是与人类关系极为密切的环境介质,也是人类赖以生存的主要自然资源之一^[1]。它是农业生产的基础,是环境中重金属迁移转化的主要介质,既是重金属聚集的汇,也是向其他系统迁移的源。近年来,随着工业“三废”的排放^[2]、矿山开采、污水灌溉^[3]、肥料和农药用量的增加、大气沉降、土壤淋溶等,使得土壤重金属污染问题越来越严重,土壤质量不断下降^[4]。由于重金属在土壤中一般不易随径流淋失,也不能被土壤微生物分解,加之生物体对重金属的富集,使得重金属通过食物链传递危害人类健康^[5]。土壤的纳污和自净能力有限^[6],当进入土壤的污染物积累量超过土壤承受能力或其临界值时,土壤会向外界环境输出污染物,使其他环境要素受到污染,从而导致严重的生态问题,并对人体健康和生态系统的稳定产生直接或间接危害^[7]。

土地利用指土地的使用状况或土地的社会、经济属性^[8]。土地利用类型是人类在改造利用土地进行生产和建设过程中所形成的各种具有不同利用方向和特点的土地利用类别。在人类活动过程中,土地利用类型不断发生着变化。近年来,有关土壤重金属积累对生态环境的影响研究较多,李丽霞等^[9]研究表明管理模式能明显改变重金属在土壤中的迁移与累积,肖思思等^[10]对县域耕地土壤重金属污染进行了评价并分析其影响,CHEN等^[11]对北京市城市公园表层土壤的重金属污染进行了评价,已有研究多侧重于土壤重金属的污染方面,而将土地利用方式与土壤重金属元素分布特征联系起来的研究还较缺乏。土地利用的多样性使得不同剖面中重金属元素分布和迁移的不规律性增加,重金属的迁移和累积问题也日益突出^[12]。特别是对三峡库区这类生态环境脆弱区,不适当的土地利用方式及土地利用活动使得土壤重金属的污染负荷加重,直

接导致了土壤侵蚀及重金属随地表径流的流失,从而对流域水体环境产生影响,进而导致三峡库区水质及水资源发生变化,对库区的生态环境和社会经济可持续发展等产生巨大影响。三峡库区农业土壤是重要的蔬菜、粮果和中药材的生产用地,库区土壤环境质量严重地影响着当地居民的食品安全和身体健康,也间接地影响着当地经济的发展^[13]。

本文开展三峡库区不同土地利用类型重金属元素在土壤中的分布特征研究,并对各重金属的污染状况进行评价,以期为了保护农业环境,保障农产品安全,减缓和预防土壤污染提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市忠县三峡库区水土保持与环境研究站(107°3′~108°14′E、30°03′~30°35′N)附近。海拔高度117~1 680 m,属亚热带东南季风区山地气候,年降水量1 100~1 400 mm,多集中在4—10月份,占全年的70%以上,年日照时数1 327 h,太阳总辐射量347 kJ/m²,无霜期340 d,年均气温18.2℃,大于等于10℃的年积温5 891.4℃,相对湿度80%。该区岩层为侏罗系沙溪庙组砂岩、粉砂岩和泥岩,主要土壤类型为中性紫色土,该区域主要种植作物为玉米、红薯、黄豆和柑橘等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择和样品采集

在踏查典型流域的基础上,于2015年5月中旬根据典型性和代表性原则选择试验站附近新政村石盘丘小流域内柑橘果园(CO)、林地(FL)、旱坡麦地(WD)、旱坡菜地(VD)、温室大棚蔬菜地(VG)、水稻田(PL)6种土地利用类型作为采样地,采用蛇形布点法在每个样地采集5个点的土壤样品混匀,四分法取样装袋。采集土样为表层土,采集深度0~20 cm。同时记录样品所在的坡度、坡向等信息,采集的土样去除植物根、砂砾,自然风干,研磨过100

目尼龙筛,混合均匀备用。

1.2.2 重金属含量测定

不同土地利用类型土壤的 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 等重金属元素含量采用美国 Perkin Elmer 公司生产的 NexION300X 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 进行测定。

表 1 土壤环境质量标准值

Tab. 1 Soil environment quality standard values					mg/kg
类别	一级	二级 (pH 值)			三级 (pH 值)
	自然背景	0 ~ 6. 5	6. 5 ~ 7. 5	> 7. 5	> 6. 5
重金属 Pb	35	250	300	350	500
重金属 Cr 水田	90	250	300	350	400
重金属 Cr 旱地	90	150	200	250	300
重金属 Cu 农田等	35	50	100	100	400
重金属 Cu 果园		150	200	200	400
重金属 Zn	100	200	250	300	500
重金属 Cd	≤0. 20	0. 30	0. 60	1. 00	

注：数据引自 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》。

表 2 土壤中各项污染物的限值

Tab.2 Limit values of soil pollutants							mg/kg
类别	旱地 (pH 值)			水田 (pH 值)			
	0 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	>7.5	0 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	>7.5	
重金属 Pb	50	50	50	50	50	50	
重金属 Cr	120	120	120	120	120	120	
重金属 Cu	50	60	60	50	60	60	
重金属 Cd	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	

注：果园地中的 Cu 限量为旱田中 Cu 限量的 1 倍；水旱轮作采用的标准取严不取宽；数据引自 NY/T 391—2013《绿色食品 产地环境质量》。

单因子污染指数法环境质量指数计算式为

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

式中 P_i ——土壤污染物 i 的环境质量指数

C_i ——土壤污染物 i 的实测值,mg/kg

S_i ——土壤污染物 i 的评价标准,mg/kg

当 $P_i \leq 1$ 时,表明无重金属 i 累积(污染);当 $P_i > 1$ 时,表明重金属 i 累积(污染), P_i 值越大,累积(污染)越严重。

综合污染指数评价法:综合指数的算法有多种,常采用内梅罗(Nemerow)综合污染指数法计算。内梅罗指数反映各污染物对土壤的作用,同时突出高浓度污染物对土壤环境质量的影 响。评价公式为

$$P_{com} = [(C_i / S_i)_{\max}^2 + (C_i / S_i)_{\text{ave}}^2]^{1/2} / 2 \tag{2}$$

式中 P_{com} ——污染物综合指数

$(C_i / S_i)_{\max}$ ——土壤重金属元素污染指数最大值

$(C_i / S_i)_{\text{ave}}$ ——各污染物中污染指数的算数平均值

1.2.3 重金属污染评价

采用 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中二级评价标准(表 1)和国家农业行业标准 NY/T 391—2013《绿色食品 产地环境质量》(表 2)对流域内 6 种土地利用类型土壤重金属进行污染评价。

根据《绿色食品产地环境质量现状评价纲要(试行)》规定,土壤污染等级划分标准等级如表 3 所示。

表 3 土壤内梅罗污染指数评价标准

Tab.3 Assessment standard of Nemerow pollution index for soil quality				
等级	P_i 单项	P_{com}	污染	污染水平
划分	污染指数		等级	
I	0 ~ 0.7	0 ~ 0.7	安全	清洁
II	0.7 ~ 1	0.7 ~ 1	警戒线	尚清洁
III	1 ~ 2	1 ~ 2	轻污染	土壤轻度污染开始,作物开始受到污染
IV	2 ~ 3	2 ~ 3	中污染	土壤、作物均受中度污染
V	> 3	> 3	重污染	土壤、作物污染已相当严重

1.2.4 潜在生态风险评价

潜在风险评价法是将污染物与其生物毒性、生态危害有机结合对土壤环境质量进行评价的方法^[14]。潜在生态危害指数法是瑞典科学家 HAKANSON 提出的,采用等价属性指数分级法评价,反映某一特定环境中各种污染物的影响和多种污染物综合影响,定量划分潜在生态危害的程度^[15]。潜在生态危害指数是待评价重金属的单项潜在生态危害系数之和,其值取决于待评价重金属的个数和潜在生态危害系数^[16]。

HAKANSON 提出的潜在生态危害指数法^[17]计算公式为

$$R_f = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{3}$$

其中

$$E_r^i = T_r^i C_f^i C_f^i = C^i / C_n^i$$

式中 R_i ——多种重金属潜在生态危害指数
 E_r^i ——潜在生态危害系数
 T_r^i ——单个污染物的毒性响应系数,反映重金属对人体及生态系统的危害程度
 C_f^i ——某一重金属的污染参数
 C^i ——土壤中重金属的实测含量
 C_n^i ——计算所需的参比值
 n ——重金属种类

HAKANSON 给出的 5 种重金属 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 的毒性响应系数分别为 5、2、5、1 和 30^[17]。潜在生态风险指数 (R_i) 综合反映了土壤中 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 5 种中间数的污染水平及潜在生态危害性(表 4)。

表 4 HAKANSON 潜在生态危害评价指标
Tab.4 Potential ecological risk assessment indices by HAKANSON

单因子潜在生态危害系数 E_r^i	多因子潜在生态危害指数 R_i	潜在生态危害程度
0 ~ 40	0 ~ 150	轻度
40 ~ 80	150 ~ 300	中度
80 ~ 160	300 ~ 600	较强
160 ~ 320	> 600	很强
> 320		极强

1.2.5 数据统计分析

对试验数据采用单因素方差分析 (ANOVA) 检验。试验数据在 SPSS 18.0 统计分析软件中进行。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤重金属含量分布特征

不同土地利用方式使得土壤的理化特征和微生物性质都会发生一定的变化,进而影响土壤重金属元素的迁移和分布特征。对采集的不同土地利用类型土壤样品进行重金属含量分析,研究结果表明,6 种不同土地利用类型土壤重金属元素 Pb 含量由大到小表现为:VG、CO、PL、VD、FL、WD,土壤重金属元素 Cr 含量由大到小表现为:CO、VG、PL、VD、FL、WD,土壤重金属元素 Cu 含量由大到小表现为:VG、VD、CO、PL、FL、WD,土壤重金属元素 Zn 含量由大到小表现为:CO、VG、PL、WD、VD、FL,土壤重金属元素 Cd 含量由大到小表现为:VG、CO、WD、PL、VD、FL。其中,温室大棚蔬菜地的重金属元素 Pb、Cu、Cd 在 6 种土地利用类型中含量最高,其次为柑橘果园。而柑橘果园土壤中 Cr、Zn 含量最高,其次为温室大棚蔬菜地。这主要是因为这 2 种土地利用类型施用大量含重金属元素的肥料和杀虫剂,使得重金属元素在这 2 种土地利用类型中不断富积所

致。旱坡菜地的 Pb、Cr、Cu 含量也较早坡麦地、水稻田和林地的 Pb、Cr、Cu 含量高,这与张民等^[18]研究的长年种植蔬菜区土壤表现出不同程度的重金属累积现象,菜园土壤随种菜历史的延长,熟化程度增加,重金属元素 Cr、Pb 等含量有明显增高趋势的结论相一致。林地土壤样地地处坡面顶部,受人为干扰较少,因此各项重金属含量均较低。水稻田位于坡面中下部,由于受到侵蚀、径流冲刷泥沙中携带的重金属在水稻田会出现富积,使得重金属含量在 6 种土地利用类型中仅次于柑橘果园和温室大棚蔬菜地的重金属含量。6 种土地利用类型的 5 类重金属含量多重比较结果见图 1。

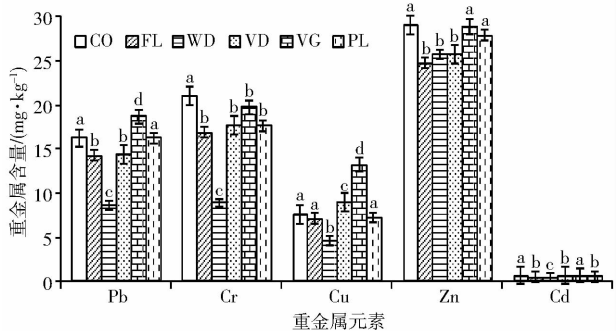


图 1 三峡库区不同土地利用类型土壤重金属含量分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of soil heavy metals contents of different land use types in Three Gorges Reservoir region

2.2 不同土地利用类型重金属元素间相关性分析

由于造成土壤污染的污染源中重金属元素共存于同一土壤样品中,导致重金属元素含量存在一定的相关性。对不同土地利用类型的各土壤重金属元素含量进行相关性分析,结果表明,这 5 种重金属元素之间均存在相关关系(表 5)。Pb 含量与 Cr、Cu、Zn、Cd 含量均存在极显著正相关关系 ($p < 0.01$), Cr 含量与 Cu 和 Cd 含量呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与 Zn 含量呈显著正相关 ($p < 0.05$)。

表 5 不同土地利用类型土壤重金属元素间的相关系数
Tab.5 Correlation coefficients of soil heavy metals of different land use types

	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd
Pb	1	0.867 **	0.787 **	0.488 **	0.723 **
Cr		1	0.562 **	0.417 *	0.801 **
Cu			1	0.403 *	0.570 **
Zn				1	0.631 **

注: **表示相关性在 $p < 0.01$ 水平显著(双尾), * 表示相关性在 $p < 0.05$ 水平显著(双尾)。

2.3 各项重金属元素污染评价

分别采用单项污染指数法和综合污染指数法对库区 6 种不同土地利用类型土壤的重金属污染现状

进行评价, 单项污染指数评价可以体现每一个评价指标的污染状况, 单项污染指数小表明污染物污染程度较轻, 指数大表明污染物污染程度较重^[19]。单项污染指数越高, 对综合污染指数的贡献率和影响越大。综合污染指数全面反映各污染物对土壤污染的不同程度, 并且充分考虑高浓度物质对土壤环境质量的影响, 是单项污染指数评价法的综合和改进。三峡库区 6 种土地利用类型的土壤 pH 值均在 5 ~ 7 之间, 选取 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中二级评价标准以及 NY/T 391—2013《绿色食品 产地环境质量》作为评价指标, 计算得到的单项污染指数和综合污染指数如表 6 所示。

表 6 不同土地利用类型土壤重金属污染评价
Tab. 6 Pollution evaluation of soil heavy metals of different land use types

类别	CO	FL	WD	VD	VG	PL
污染指数	Pb	0.06	0.06	0.03	0.06	0.07
	Cr	0.14	0.11	0.06	0.12	0.13
	Cu	0.15	0.14	0.09	0.18	0.26
	Zn	0.14	0.12	0.13	0.13	0.14
	Cd	1.70	0.97	1.20	1.63	1.73
P_{com}	0.91	0.55	0.66	0.88	0.93	0.68
污染等级	警戒线	安全	安全	警戒线	警戒线	安全
污染水平	Ⅱ 尚清洁	Ⅰ 清洁	Ⅰ 清洁	Ⅱ 尚清洁	Ⅱ 尚清洁	Ⅰ 清洁

三峡库区 6 种土地利用类型土壤重金属的单项污染指数法研究结果表明, 柑橘果园土壤的 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 的单项污染指数分别为 0.06、0.14、0.15、0.14 和 1.70。综合污染指数为 0.91, 污染等级为警戒线, 污染水平属于Ⅱ级, 尚清洁。早坡菜地和温室大棚蔬菜地的土壤重金属综合污染指数分别为 0.88 和 0.93, 污染等级为警戒线, 污染水平属于Ⅱ级, 尚清洁。其他 3 种土地利用类型林地、早坡麦地和水稻田土壤的重金属综合污染指数分别为 0.55、0.66 和 0.68, 污染等级为安全, 污染水平属于Ⅰ级, 清洁。由综合污染指数评价结果可知, 6 种土地利用类型土壤重金属的综合污染指数由大到小表现为: VG、CO、VD、PL、WD、FL, 其中林地的污染指数最小。

2.4 不同土地利用类型土壤重金属潜在生态风险评价

运用 HAKANSON 提出的潜在生态危害指数法评价三峡库区 6 种土地利用类型的潜在生态风险(表 7)。研究区内 6 种土地利用类型土壤重金属 Pb、Cr、Cu 和 Zn 的单因子潜在生态危害系数 E_i^i 均小于 40, 均属于轻度生态危害。林地、早坡麦地和水稻田土壤中重金属元素 Cd 的单因子潜在生态危

害系数 E_i^i 介于 40 ~ 80 之间, 属于中度生态危害, 而在柑橘果园、早坡菜地和温室大棚蔬菜地土壤中重金属 Cd 的单因子潜在生态危害系数 E_i^i 介于 80 ~ 160 之间, 属于较强生态危害。其中温室大棚蔬菜地土壤中重金属 Cd 的单因子潜在生态危害系数最高。

潜在生态危害指数 (R_i) 综合反映土壤中 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 5 种重金属的污染水平及潜在生态危害性。6 种土地利用类型 5 种土壤重金属的多因子潜在生态危害指数 (R_i) 均小于 150, 土壤潜在生态危害属轻度生态危害, 其由大到小表现为: VG、CO、VD、WD、PL、FL。总体上, 潜在生态危害系数从大到小分别为: Cd、Pb、Cu、Cr、Zn。潜在生态风险最高的元素是 Cd, 反映了重金属元素 Cd 对生态毒性高于其他元素。其次是 Pb、Cu、Cr 和 Zn, 潜在生态危害系数相对较大, 污染程度也较高。

表 7 不同土地利用类型土壤重金属潜在生态危害系数和危害指数

Tab. 7 Potential ecological hazard coefficient and potential ecological risk index of soil heavy metals of different land use types

类型	潜在生态危害系数 E_i^i					潜在生态危害指数 R_i
	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	
CO	3.62	0.86	1.69	0.36	108.51	115.04
FL	3.17	0.69	1.58	0.31	61.70	67.45
WD	1.92	0.36	1.00	0.32	76.60	80.20
VD	3.20	0.72	2.00	0.32	104.26	110.50
VG	4.17	0.81	2.96	0.36	110.64	118.94
PL	3.62	0.72	1.61	0.35	78.72	85.02

3 讨论

已有土壤重金属含量及分布特征的研究多侧重于有污染源或人为影响较重的地区, 而本研究选取三峡库区库中地区典型小流域内 6 种土地利用类型土壤的重金属含量特征进行研究, 本区域无主要重金属污染源的输入, 除人工耕作扰动外, 无其他较大外源干扰, 因此土壤母质、大气的干湿沉降、农业灌溉、施肥、喷洒农药和除草剂、生活垃圾是流域不同土地利用类型土壤重金属的主要来源^[20]。柑橘果园、温室大棚蔬菜地及早坡菜地较多施用 Zn 肥和含 Zn 农药(如代森锌、福美锌)可能是土壤重金属 Zn 的主要来源。某些畜禽粪便中 Zn 含量可达 100 ~ 207 mg/kg, 长期施用有机肥也可能导致土壤重金属 Zn 含量提高 5% ~ 30%^[15]。

三峡库区坡耕地面积占耕地面积 70% 以上, 坡度较大, 一般在 20° 以上, 陡坡地坡度大, 重金属易流失, 向下搬运。本研究所选取的林地由于受人为

干扰较少,因此,林地土壤重金属的输入较少。而其他土地利用类型,特别是柑橘果园、温室大棚蔬菜地和旱白菜地,由于大量人为活动的干扰及施用农药、化肥、杀虫剂等,使得土壤重金属输入量增加。化肥、有机肥和农药是土壤中重金属元素 Cr、Cu、Cd、Zn、Pb 的重要来源。施用肥料的质量和数量是影响不同利用方式下土壤重金属含量的主要因素。因此,在土地利用过程中,注重管理方式优化,施用优质的化肥、有机肥和农药,将会大大减少重金属在土壤中的累积速率。而水稻田多位于坡面中下部,由于土壤重金属自坡面上部向下,伴随径流、侵蚀泥沙搬运和沉积到地势相对较平缓的水稻田。因此,水稻田土壤的重金属来源相对增加,各类土壤重金属出现不同程度的累积现象。影响土壤重金属含量的因素很多,如成土母质、气候条件、土壤中的氧化还原电位、pH 值控制着土壤重金属的活性,受地质条件的作用,进而影响重金属的迁移、分布和累积^[21]。

由于重金属不能被土壤微生物所降解,因而在土壤中不断积累,土壤一旦遭受重金属污染,则很难予以彻底消除。同时农业、工业、采矿等因素导致土壤重金属含量急剧增加也备受关注^[22]。此外,土壤重金属对土壤生态环境及人体健康等均有较大影响^[23]。本研究结果表明,三峡库区不同土地利用类型土壤重金属污染属于轻微型污染,但土壤重金属 Cd 污染需引起重视。除 Cd 外,其他重金属元素也显示出一定的富集特征,但不如 Cd 富集显著。查

阅相关文献可知,二叠系地层为三峡库区周边的一个重要地层,该地层出露的黑色岩系可能具有较高的重金属元素含量,而此地质体的自然风化释放,有可能是三峡库区 Cd 异常乃至整个长江流域沿江 Cd 异常的一个重要自然源^[24]。结合岩石样品的数据,发现三峡库区土壤中 Cd 等重金属元素的含量分布特征与研究区岩石表现出很好的地球化学继承性,岩石中 Cd 的平均含量相对世界页岩及我国东部泥岩显著富集^[25]。

4 结 论

(1)三峡库区 5 种重金属元素间均存在相关关系。Pb 含量与 Cr、Cu、Zn、Cd 含量均存在极显著正相关关系($p < 0.01$),Cr 含量与 Cu 和 Cd 含量呈极显著正相关($p < 0.01$),与 Zn 含量呈显著正相关($p < 0.05$)。

(2)6 种土地利用类型土壤重金属 Pb、Cr、Cu、Zn、Cd 的单项污染指数为 0.06、0.14、0.15、0.14 和 1.70,综合污染指数为 0.91,污染等级为警戒线,污染水平属于Ⅱ级,尚清洁。6 种土地利用类型土壤重金属的综合污染指数由大到小表现为:VG、CO、VD、PL、WD、FL,其中林地的污染指数最小。

(3)6 种土地利用类型的 5 种土壤重金属潜在生态危害属轻度生态危害,潜在生态危害指数由大到小表现为:VG、CO、VD、WD、PL、FL。总体上,5 种土壤重金属潜在生态危害系数由大到小表现为: Cd、Pb、Cu、Cr、Zn。

参 考 文 献

1 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[J].地理学报,2005,60(5):791-797.
ZHENG Yuanming, CHEN Tongbin, CHEN Huang, et al. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City [J]. Acta Geographica Sinica, 2005,60(5):791-797. (in Chinese)

2 赵其国,周炳中,杨浩,等.江苏省环境质量与农业安全问题研究[J].土壤,2002,34(1):1-8.
ZHAO Qiguo, ZHOU Bingzhong, YANG Hao, et al. Environment quality and agricultural safety of Jiangsu Province[J]. Soils, 2002,34(1):1-8. (in Chinese)

3 庞妍,同延安,梁连友,等.污灌农田土壤-作物体系重金属污染评价[J/OL].农业机械学报,2015,46(1):148-154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150122&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.022.
PANG Yan, TONG Yan'an, LIANG Lianyou, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil crop system on sewage irrigated farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):148-154. (in Chinese)

4 KRISHNA A K, GIVIL P K. Heavy metal contamination of soil around Pali Industrial Area, Rajasthan, India[J]. Environmental Geology, 2004,47(1):38-44.

5 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 Hailong, CHEN Jie, DENG Wenjing, et al. Spatial analysis and pollution assessment of soil heavy metals in the steel industry areas of Nanjing periurban zone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006,43(1):39-45. (in Chinese)

6 廖海军.北京市密云水库上游土壤重金属污染调查评价[J].中国环保产业,2007,2(8):23-26.
LIAO Haijun. Pollution evaluation of soil heavy metals in the upper Miyun reservoir of Beijing City[J]. Environmental Protection Industry of China, 2007,2(8):23-26. (in Chinese)

7 WU G, KANG H, ZHANG X, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, Progress, eco-environmental concerns and opportunities [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,174(1-3):1-8.

- 8 TURNER B L, SKOLE D, SANDERSON S, et al. Land use and land cover change science research plan[R]. IGBP Report and HDP Report,1995:102 – 106.
- 9 李丽霞,郝明德,薛晓辉,等.黄土高原沟壑区苹果园土壤重金属含量特征研究[J].水土保持学报,2007,21(6):65 – 69.
LI Lixia, HAO Mingde, XUE Xiaohui, et al. Research on soil heavy metal contents of apple orchard in gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6):65 – 69. (in Chinese)
- 10 肖思思,黄贤金,彭补拙,等.经济发达县域耕地土壤重金属污染评价及其影响因素分析——以江苏省昆山市为例[J].长江流域资源与环境,2007,16(5):674 – 679.
XIAO Sisi, HUANG Xianjin, PENG Buzhuo, et al. Analysis of heavy mental pollution and assessment of its environmental effect in developed areas[J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(5):674 – 679. (in Chinese)
- 11 CHEN Tongbin, ZHENG Yuanming, LEI Mei, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. Chemosphere,2005,60:542 – 551.
- 12 谢娟,成玉祥,王莉平,等.某金矿区不同品种蔬菜中重金属分析及评价[J].地球科学与环境学报,2008,30(4):425 – 428.
XIE Juan, CHENG Yuxiang, WANG Liping, et al. Analyses and evaluation of heavy metals in vegetable samples from a gold field [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(4): 425 – 428. (in Chinese)
- 13 喻菲,张成,张晟,等.三峡水库消落区土壤重金属含量及分布特征[J].西南农业大学学报:自然科学版,2006,28(1):165 – 168.
YU Fei, ZHANG Cheng, ZHANG Sheng, et al. Contents and distribution of heavy metals in the draw-down zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science, 2006, 28(1):165 – 168. (in Chinese)
- 14 HAMED M M. Probabilistic sensitivity analysis of public health risk assessment from contaminated soil[J]. Journal of Soil Contamination, 1999, 8(3):285 – 306.
- 15 钟晓兰,周生路,赵其国.长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以江苏太仓市为例[J].地理科学,2007,27(3):396 – 400.
ZHONG Xiaolan, ZHOU Shenglu, ZHAO Qiguo. Spatial characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River delta—a case study of Taicang City, Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007,27(3):396 – 400. (in Chinese)
- 16 任华丽,崔保山,白军红,等.哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险[J].生态学报,2008,28(4):1625 – 1633.
REN Huali, CUI Baoshan, BAI Junhong, et al. Distribution of heavy metal in paddy soil of Hani terrace core zone and assessment its potential ecological risk[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(4): 1625 – 1633. (in Chinese)
- 17 HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control;a sediment ecological approach[J]. Water Research, 1980,14:975 – 1001.
- 18 张民,马丽,李文庆.我国菜园土壤的资源特点与持续利用[J].山东农业大学学报,1999,30(4):317 – 322.
ZHANG Min, MA Li, LI Wenqing. Characteristics and sustainable utilization of vegetable cultivated soil resources in China[J]. Journal of Shandong Agricultural University,1999,30(4):317 – 322. (in Chinese)
- 19 郑国璋,岳乐平.洛川苹果园地土壤重金属污染调查与评价[J].土壤通报,2008,39(2):402 – 405.
ZHENG Guozhang, YUE Leping. Investigation and assessment on heavy metals pollution of soil in Luochuan apple orchard[J]. Chinese Journal of Soil Science,2008,39(2):402 – 405. (in Chinese)
- 20 方凤满,王起超.土壤汞污染研究进展[J].土壤与环境,2000,9(4):326 – 329.
FANG Fengman, WANG Qichao. A review on the studies on mercury pollution of soil[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000,9(4):326 – 329. (in Chinese)
- 21 NAIM S, OZCAN H K, DEMIR G, et al. Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E – 5 high way [J]. Environment Internation,2003,29:979 – 985.
- 22 SASTRE J, RAURET G, VIDAL M. Effect of the cationic composition of sorption solution on the quantification of sorption – desorption parameters of heavy metals in soils[J]. Environment Pollution, 2006,140(2):322 – 339.
- 23 SHI W, BISCHOFF M, TURCO R, et al. Long-term effects of chromium and lead upon the activity of soil microbial communities [J]. Apply Soil Ecology,2002,21(2):169 – 177.
- 24 成杭新,杨忠芳,奚小环,等.长江流域沿江镉异常示踪与追源的战略与战术[J].第四纪研究,2005,25(3):285 – 291.
CHENG Hangxin, YANG Zhongfang, XI Xiaohuan, et al. Strategy and tactics for tracing and source tracking of Cd anomalies along the Changjiang River Basin[J]. Quaternary Sciences, 2005,25(3):285 – 291. (in Chinese)
- 25 迟清华,鄢明才.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北京:地质出版社,2007:45 – 55.
- 26 赵新儒,特拉津·那斯尔,程永毅,等.伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价[J].环境科学,2014,35(6):2392 – 2400.
ZHAO Xinru, TELAJIN Nasier, CHENG Yongyi, et al. Environmental geochemical baseline of heavy metals in soils of the Ili River Basin and pollution evaluation[J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2392 – 2400. (in Chinese)
- 27 邵学新,吴明,蒋科毅.西溪湿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J].湿地科学,2007,9(3):253 – 259.
SHAO Xuexin, WU Ming, JIANG Keyi. Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in soils of Xixi wetland[J]. Wetland Science,2007,9(3):253 – 259. (in Chinese)