

土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201711207 中图分类号 X53 文献标识码 A

梁玉峰, 谭长银, 曹雪莹, 等. 不同土地利用方式下土壤养分和重金属元素垂直分布特征 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(6): 1791-1799.

LIANG Yufeng, TAN Changyin, CAO Xueying, et al. Vertical distribution of soil nutrient and heavy metals in soil under different land use [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(6): 1791-1799.

不同土地利用方式下土壤养分和重金属元素垂直分布特征

梁玉峰, 谭长银*, 曹雪莹, 何其辉, 朱上游, 谢雨呈, 代兵

湖南师范大学资源与环境科学学院, 环境重金属污染机理及生态修复重点实验室, 长沙 410081

第一作者: 梁玉峰 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 土壤环境与农产品安全. E-mail: hunnuliang@163.com

* 通信作者, E-mail: chytan@hunnu.edu.cn

摘要 为探讨不同土地利用方式下土壤养分和重金属元素垂直分布特征, 对2种母质的自然土壤、耕作土壤、休耕土壤养分和重金属元素垂直分布状况进行了比较研究。结果表明: 不同土地利用方式下土壤表层养分元素含量总体表现为休耕土壤 > 耕作土壤 > 自然土壤, 土壤表层重金属含量总体表现为农田土壤 (耕作土壤和休耕土壤) > 自然土壤, 耕作土壤与休耕土壤差异较小, 土壤淀积层到母质层养分和重金属元素差异逐渐减小; 土壤养分元素和 Cu、Zn、Pb、Cd 随土层深度的增加而减小, 而 Cr 表现出相反的趋势; 农田土壤耕作层有效钾含量最高可达 $215.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 耕作层 Cd 含量最高可达 $0.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。3种土地利用方式中, 休耕土壤养分和重金属含量相对较高, 建议在休耕期间种植伴矿景天等重金属高积累植物进行植物修复。

关键词 土地利用; 土壤养分; 重金属; 土壤污染

土壤养分是自然因素和人为因素共同作用的结果, 是土壤肥力的重要组成部分, 对土壤生态系统结构与功能有着重要影响。土壤养分的含量、分布、形态及迁移转化不仅受成土母质、气候等自然因素影响, 还与耕作方式、土地利用方式等人为活动有关^[1-3]。在人为因素中, 土地利用方式是人类干预土壤肥力最直接、最重要的活动^[4], 通过改变土壤的水热条件、土壤营养总量等因素来影响土壤养分的迁移转化, 从而导致土壤肥力的变化^[5]。合理的土地利用方式不仅可以增加土壤肥力, 还能提高土壤对外界环境的抵抗力; 而不合理的土地利用方式会导致土壤质量下降, 严重时会使土壤退化, 影响农产品的产量和质量。

重金属作为典型的土壤污染物, 一旦进入土壤中, 不易被微生物降解, 并在土壤中不断积累, 对土壤和农作物具有持续的生态效应和潜在生态风险^[6]。土壤重金属含量越高, 其潜在的环境危害就越大。国内外学者在土壤垂直方向和土地利用方式上对重金属变化特征做了大量研究。马智宏等^[7]研究表明, 土壤重金属 (Cu、Cd、Pb、Cr) 元素含量随土壤深度的加深而减小, 与其他土层相比, 在 30~60 cm 土层 Cr 含量的减速最快, 说明 Cr 元素在此土层中迁移性较差; 周萍等^[8]对三峡库区不同土地利用土壤重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn、Cr) 分布特征与污染评价研究表明: 在 6 种土地利用方式下, 土壤存在不同程度的污染, 且 Cd 在 5 种重金属元素中潜在生态危害系数最高。

收稿日期: 2017-11-28; 录用日期: 2018-02-22

基金项目: 湖南省科技计划项目 (2017NK2141); 湖南省高校科技创新团队支持计划项目 (2014); 湖南省高校创新实验平台项目 (12K034); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2017B228)

土地利用作为人类利用土地各种活动的综合反映^[9],与土壤重金属和养分元素的变化有密切关系^[10-12]。土地利用方式的改变不仅会引起土壤养分含量的变化^[13-15],还会对土壤重金属元素迁移富集产生强烈的影响^[16]。同时,土壤重金属和养分元素之间存在一定的联系,杨艳芳等^[17]研究表明,土壤有机质、全磷与土壤重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 之间呈极显著正相关关系,并且具有同源性,施用有机肥(鸡粪、猪粪等)有利于土壤养分含量的增加,同时也会增加土壤重金属的含量^[18]。因此,在不同利用方式条件下,研究自然因素和人为因素对土壤养分和重金属元素的垂直分布特征,具有重要的现实意义。本研究选取长沙市郊 2 种不同母质的土壤,比较不同土地利用方式条件下土壤有机质、有效磷、有效钾、碱解氮和重金属(Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr)含量的垂直分布特征,分析土壤养分和重金属含量之间的内在联系,为指导农田土壤科学施肥和重金属污染防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

土壤样品采自长沙市望城区乔口镇蓝塘寺村和宁乡市大成桥镇青泉村,属亚热带季风湿润气候。乔口镇年均温 17℃,无霜期 300 d,年降雨量 1 400 mm,成土母质是第四纪红色黏土;大成桥镇年均温 16.8℃,无霜期 274 d,年降雨量 1 358.3 mm,成土母质是板页岩风化物。采样点基本情况见表 1。

表 1 采样点的基本信息
Table 1 Information of sampling sites

土壤母质	土地利用类型	经纬度	描述
第四纪红色黏土	自然土壤(QN)	28°31'19"N 112°35'1"E	生长乔木,表层多枯枝落叶,多粗根
	耕作土壤(QW)	28°29'45"N 112°39'52"E	耕作 51 年,种植水稻
	休耕土壤(QL)	28°29'42"N 112°39'56"E	休耕 3 年,休耕前种植水稻
板页岩风化物	自然土壤(DN)	28°12'24"N 112°21'16"E	表层多枯枝落叶,土壤发育不完全,石砾、细根较多
	耕作土壤(DW)	28°12'34"N 112°21'18"E	耕作 43 年,以种植水稻为主
	休耕土壤(DL)	28°12'39"N 112°39'56"E	休耕 10 年,休耕前为菜地

1.2 样品的采集与处理

在长沙市望城区乔口镇和宁乡市大成桥镇选取 3 种不同土地利用方式(休耕土壤、耕作土壤和自然土壤)的采样点挖掘土壤剖面。每个土壤剖面(深度为 100 cm)自下而上每 10 cm 采集 1 个土壤样品,每个剖面采集 10 个样品,共采集 60 个土壤样品。样品风干后,磨细过筛备用。

1.3 测定项目及方法

土壤理化性质指标按《土壤农化分析》的实验方法^[19]进行测定,其中有机质采用 $K_2Cr_2O_7$ 外加热法测定、pH 采用玻璃电极法测定(水土比为 2.5:1);速效磷采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 提取,钼锑抗比色法测定;有效钾采用分光光度计法测定;碱解氮采用碱解-扩散法测定。

土壤重金属检测指标包括 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd。参照美国 EPA 的方法对样品进行消解(EPA 3051A),原子吸收分光光度计(Perkin Elmer AAnalyst 900T)测定。Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 含量采用原子吸收光谱法测定。采用国家标准土壤样品(GSS-3)进行质量监控。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 22 软件进行数据处理与统计分析,采用 Origin 9.0 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤肥力指标垂直分布特征

2.1.1 不同土地利用方式下土壤有机质垂直分布

有机质是土壤肥力高低的重要指标,不同土地利用方式下土壤剖面有机质含量变化明显(表2),表现为随土层深度的增加而减少。板页岩风化物发育的表层土壤有机质含量大小排序为耕作土壤(DW) > 休耕土壤(DL) > 自然土壤(DN),其中农田土壤(DW和DL)有机质含量为3.3%~3.5%,显著高于DN有机质含量,这可能是农田土壤长期施肥造成的;表层土壤有机质含量明显高于深层,在淀积层和母质层中,土壤有机质含量较低且差异不显著。QW表层有机质含量最高,QN有机质含量最低;在淀积层和母质层中,QN有机质含量相对较高,QW最低;QW有机质含量随土壤深度的增加下降速率快。

研究区农田土壤有机质含量最高,且主要集中在耕作层。差异显著性分析表明,在不同土地利用方式下,土壤表层有机质含量差异显著,淀积层有机质含量差异不显著;同种母质不同土地利用方式的土壤差异不显著,不同母质相同土地利用方式的土壤差异不显著($P < 0.05$)。

表2 不同土地利用方式下土壤有机质垂直分布
Table 2 Vertical distribution of soil organic matter under different land use types

发生层	深度范围/cm	板页岩风化物/%			第四纪红色黏土/%		
		DN	DW	DL	QN	QW	QL
表层	0~20	1.8 ± 0.9b	3.5 ± 0.3a	3.3 ± 0.4a	1.4 ± 0.2b	2.0 ± 0.1a	1.7 ± 0.3ab
淀积层	20~50	1.1 ± 0.0a	1.2 ± 0.6a	1.1 ± 0.5a	1.5 ± 0.0a	0.7 ± 0.6b	1.1 ± 0.2b
母质层	50~100	0.7 ± 0.2a	0.8 ± 0.1a	0.5 ± 0.2a	1.0 ± 0.3a	0.3 ± 0.2b	0.7 ± 0.3ab

注:表格中数据为平均值 ± 标准差,不同字母表示各剖面同一土层间的差异显著。

2.1.2 不同土地利用方式下土壤有效磷垂直分布

土壤有效磷是土壤肥力状况的重要指标。土壤有效磷含量因气候、成土母质、人为活动等因素,在垂直方向上呈现出不同的变化特征(表3)。2种母质发育的土壤有效磷的总体趋势为随土层深度的增加而减小,且各层次间差异明显。同种母质下,不同土地利用方式土壤表层有效磷含量排序分别为QL > QN > QW, DL > DW > DN,且QL和QN有效磷含量显著高于QW。除耕作土壤外,第四纪红色黏土发育的土壤有效磷含量均高于板页岩风化物,耕作土壤受人为因素影响大,而导致土壤有效磷含量变化较大。

差异显著性分析表明,同种母质下, DN和DL, QW和QL间差异显著;在不同母质同种土地利用方式下,除耕作土壤外,其余利用方式的土壤均呈现显著性差异;土壤有效磷含量随土壤深度的增加差异逐渐减小($P < 0.05$)。

表3 不同土地利用方式下土壤有效磷垂直分布特征
Table 3 Vertical distribution of soil available phosphorus under different land use types

发生层	深度范围/cm	板页岩风化物/(mg·kg ⁻¹)			第四纪红色黏土/(mg·kg ⁻¹)		
		DN	DW	DL	QN	QW	QL
表层	0~20	26.5 ± 3.2b	28.8 ± 3.3b	38.5 ± 0.8a	45.8 ± 0.8a	25.6 ± 3.5b	49.7 ± 0.9a
淀积层	20~50	26.8 ± 3.6a	13.8 ± 1.6b	17.2 ± 7.7b	35.1 ± 9.5a	22.5 ± 3.2b	31.2 ± 3.4a
母质层	50~100	12.0 ± 6.8a	7.4 ± 3.0a	8.5 ± 5.1a	16.2 ± 5.8a	20.8 ± 3.0a	15.2 ± 12.6a

2.1.3 不同土地利用方式下土壤有效钾垂直分布

由表4可知,自然土壤、耕作土壤和休耕土壤剖面有效钾表层含量最高,随土层深度的增加逐渐降低,自然土壤有效钾含量减少速率较慢,农田土壤在淀积层有效钾含量迅速下降。DN在腐殖质

层、淀积层和母质层内有效钾含量无明显变化；DW和DL在耕作层有效钾含量为188~216 mg·kg⁻¹，其有效钾含量明显高于母质层。QN腐殖质层有效钾含量高于淀积层和母质层，但差异较小；QW和QL耕作层有效钾含量为187~207 mg·kg⁻¹，随深度向下递减规律明显。

差异显著性分析表明，农田土壤（DW和DL，QW和QL）表层有效钾含量差异不显著，但均与自然土壤（DN、QN）有效钾含量差异显著（ $P<0.05$ ），且均高于自然土壤中表层有效钾含量，这可能是农田土壤在生产过程中不断有钾肥加入补充，使得农田土壤有效钾含量显著高于自然土壤。

表4 不同土地利用方式下土壤有效钾垂直分布
Table 4 Vertical distribution of soil available potassium under different land use types

发生层	深度范围/cm	板页岩风化物/(mg·kg ⁻¹)			第四纪红色黏土/(mg·kg ⁻¹)		
		DN	DW	DL	QN	QW	QL
表层	0~20	90.2 ± 9.3b	215.7 ± 14.2a	207.8 ± 0.5a	117.2 ± 4.9b	187.9 ± 17.2a	206.3 ± 9.8a
淀积层	20~50	78.5 ± 7.0b	117 ± 38.9ab	145.8 ± 32.6a	85.8 ± 7.8b	123.9 ± 13.0a	118.8 ± 8.0a
母质层	50~100	71.0 ± 5.7a	61.3 ± 4.5a	72.0 ± 5.0a	58.5 ± 12.1b	72.9 ± 12.6ab	81.1 ± 11.6a

2.1.4 不同土地利用方式下土壤碱解氮垂直分布

土壤氮素是农作物生长和发育必需的营养元素，也是评价土壤质量和土地生产力的重要指标^[20]。在不同土地利用方式下，土壤碱解氮含量呈现出随土层深度的增加而减小的趋势（表5）。板页岩风化物发育的土壤碱解氮含量大小变化为DW>DL>DN。DN碱解氮含量主要集中在腐殖质层，这是因为自然土壤养分的主要来源是枯枝落叶，淀积层碱解氮含量下降明显；农田土壤（DW和DL）耕作层碱解氮含量在84~98 mg·kg⁻¹，按分级标准划分为“三级”，属“中下”水平，耕作层与母质层碱解氮含量差异较小。第四纪红色黏土发育的土壤碱解氮含量排序为QW>QL>QN，表层碱解氮含量较低（73~86 mg·kg⁻¹），属“四级”标准，其含量的垂直变化与板页岩风化物发育的土壤碱解氮相似。

差异显著性分析表明，3种土地利用方式下土壤表层碱解氮含量低，且差异不显著；同种母质不同利用方式的土壤差异不显著（ $P<0.05$ ）。

表5 不同土地利用方式下土壤碱解氮垂直分布特征
Table 5 Vertical distribution of soil alkali dispelled nitrogen under different land use types

发生层	深度范围/cm	板页岩风化物/(mg·kg ⁻¹)			第四纪红色黏土/(mg·kg ⁻¹)		
		DN	DW	DL	QN	QW	QL
表层	0~20	87.5 ± 24.7a	98.0 ± 9.9a	84.0 ± 0.0a	73.5 ± 14.9a	85.7 ± 14.9a	77.1 ± 9.9a
淀积层	20~50	28.0 ± 0.0b	39.6 ± 20.2ab	65.3 ± 4.0a	65.3 ± 8.0a	49.0 ± 8.0ab	35.0 ± 18.5b
母质层	50~100	16.8 ± 3.8b	26.6 ± 5.9a	16.8 ± 3.8b	49.0 ± 21ab	68.6 ± 21.0a	11.2 ± 9.4b

2.2 不同土地利用方式下土壤重金属垂直分布特征

2.2.1 不同土地利用方式下土壤重金属Cd垂直分布

不同土地利用方式下土壤重金属Cd含量差异明显（图1），总体呈现出从表层向下递减的趋势，40 cm土层以上部分Cd含量波动较明显，曲线变化较大，40 cm土层以下部分Cd含量变化逐渐缓和。表层（0~20 cm）土壤重金属Cd含量最高的是DL（0.74 mg·kg⁻¹），最低为QN（0.14 mg·kg⁻¹），变化表现为DL>QW>DW>DN>QL>QN，其中，DL、QW、DW和DN重金属Cd含量超过国家土壤环境质量二级标准，QL和QN未超过，表明板页岩风化物发育的土壤Cd含量较第四纪红色黏土发育的土壤高，农田土壤Cd含量受人为因素影响总体较自然土壤Cd含量高。自然土壤腐殖质层Cd含量较深层高，其原因可能是大气沉降对表层土壤产生了一定的影响。在淀积层和母质层中，随土壤深度的增加，重金属Cd含量下降趋势逐渐减小。研究发现，土壤重金属Cd污染主要集中在耕作层，这主要是进入土壤的重金属受到土壤胶体的吸附、络合和螯合作用，大部分被固定在表层中。

2.2.2 不同土地利用方式下土壤重金属 Cu 垂直分布

铜是植物生长过程中必不可少的微量元素, 当土壤中 Cu 超过一定量时, 会使植物对土壤中的养分和水的吸收受到影响, 致使生长不良甚至死亡。如图 2 所示, 不同土地利用方式下表层、淀积层、母质层土壤 Cu 含量均高于土壤环境质量二级标准, 表层土壤 Cu 含量是当地自然背景值 ($49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.5~1.86 倍。DN 剖面中 Cu 含量由腐殖质层到母质层呈现先下降再上升的变化特征; 农田土壤 (DW 和 DL) Cu 含量积累现象明显, 淀积层和母质层 Cu 含量变化较小。第四纪红色黏土发育的 3 种土壤重金属 Cu 含量垂直方向上变化不明显。

不同土地利用方式下, 土壤 Cu 含量在 0~100 cm 深度均超过当地土壤背景值, 且第四纪红色黏土发育的自然土壤 Cu 含量在表层、淀积层和母质层与农田土壤无明显差异, 表明农业生产活动对该地土壤 Cu 含量的影响较小, 其他外因^[21] 如大气沉降或许对该地影响更大, 母质^[22] 或是造成深层土壤 Cu 含量较高的主要因素。板页岩风化物发育的土壤 Cu 含量总体较第四纪红色黏土高, 大小排序为休耕土壤 > 耕作土壤 > 自然土壤, 人类活动对农田土壤 Cu 含量的增加影响较为明显。

2.2.3 不同土地利用方式下土壤重金属 Zn 垂直分布

不同土地利用方式下土壤 Zn 含量均未超过土壤环境质量二级标准 (图 3)。DN 表层 Zn 含量为 $51.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随土层深度的增加呈现出先减小再上升的变化趋势; DW 的 Zn 含量最高值 ($90.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 不在耕作层, 这可能是由于长期深耕使污染较重的土壤移至深层的原因; DL 耕作层 Zn 含量为 $117.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 淀积层和母质层土壤 Zn 含量变化较小。DL 耕作层 Zn 含量显著高于 DN 腐殖质层; 在淀积层和母质层中, 农田土壤 (DW 和 DL) Zn 含量显著高于 DN。

在垂直方向上, 板页岩风化物发育的 3 种土壤之间 Zn 含量的差异较第四纪红色黏土发育的土壤大; 农田土壤 (QW 和 QL) 耕作层 Zn 含量较低, 在整个剖面内, Zn 含量表现为随土层深度的增加呈波动性减小的趋势。在不同利用方式下, 农田土壤 (QW 和 QL) Zn 含量均高于 QN。

2.2.4 不同土地利用方式下土壤重金属 Pb 垂直分布

从整个剖面土壤 Pb 含量结果 (图 4) 来看, 土壤中 Pb 含量没有超过国家土壤环境质量二级标准, 但高于当地土壤背景值 ($56.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Pb 含

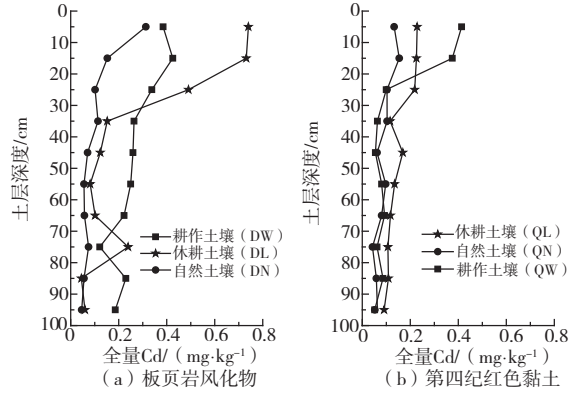


图 1 不同利用方式下 Cd 含量垂直分布特征
Fig. 1 Vertical distribution of Cd in soil under different land use types

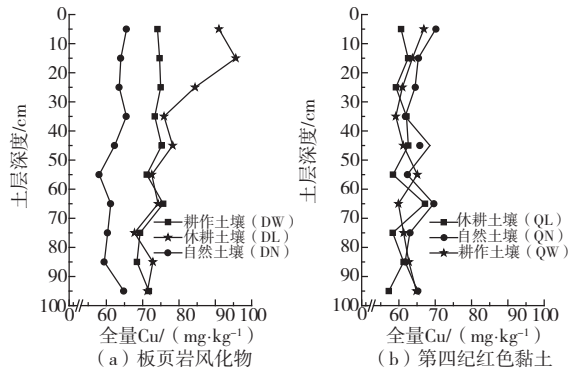


图 2 不同利用方式下 Cu 含量垂直分布特征
Fig. 2 Vertical distribution of Cu in soil under different land use types

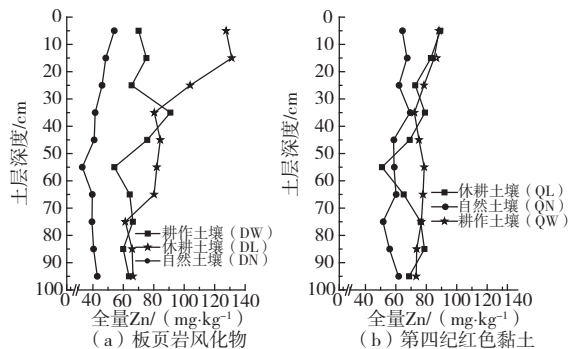


图 3 不同利用方式下 Zn 含量垂直分布特征
Fig. 3 Vertical distribution of Zn in soil under different land use types

量随土层深度的增加变化不明显。耕作土壤(DW和QW)Pb含量受土层深度的影响变化较大,其余土壤各土层间Pb含量差异较小。在不同土地利用方式下,板页岩风化物发育的土壤表层Pb含量由大到小顺序为DL>DW>DN,农田土壤(DW和WL)剖面Pb含量明显高于DN,特别是在表层差异最显著,但随土壤深度的增加农田土壤Pb含量优势逐渐下降;DN中Pb含量整体较低,农田土壤Pb含量较高且各层次间无显著差异。母质为第四纪红色黏土的土壤表层Pb含量由大到小顺序为QW>QL>QN,QW耕作层Pb含量高于QN,QN和QLPb含量在各层次间差异不显著;在淀积层和母质层中,QN、QW、QLPb含量差异逐渐减小。研究表明在不同土地利用方式下农田土壤Pb含量高于自然土壤,差异集中体现在土壤表层。

2.2.5 不同土地利用方式下土壤重金属Cr垂直分布

不同土地利用方式下土壤Cr含量呈现随土层深度的增加而增加的趋势(图5)。DN腐殖质层Cr含量最低($46.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但从腐殖质层到母质层Cr含量变化不明显;DW和DL中Cr含量从耕作层到淀积层无明显变化,从淀积层到母质层上升趋势较快。QN腐殖质层Cr含量低,从淀积层到母质层呈现上升趋势;QW和QLCr含量从耕作层到淀积层上升趋势较小,从淀积层到母质层上升趋势明显。

在不同土地利用方式下,土壤中Cr含量的大小顺序为耕作土壤>休耕土壤>自然土壤,且随深度的增加这种变化趋势愈加明显。在表层中,DN和DW中Cr含量差异较小;在母质层中,DN与DWCr含量差异显著。农田土壤(QW和QL)耕作层Cr含量显著高于QN腐殖质层Cr含量,QW和QL中Cr含量无显著差异,随着土壤深度的增加,农田土壤Cr含量优势逐渐增加。

2.3 不同土地利用方式下土壤养分和重金属含量相关分析

在不同土地利用方式下,土壤有机质、速效钾、碱解氮、Cd、Pb和Zn之间存在显著相关关系($P<0.01$),除Cr以外的4种重金属元素之间均存在显著相关关系($P<0.01$),4种土壤养分元素之间也存在显著相关关系($P<0.01$)(表6)。表明土壤养分和土壤重金属之间具有一定的同源性。

3 讨论

不同土地利用方式影响土壤养分和重金属含量的分布,将自然土壤开垦为耕作土壤会导致有机碳的降低^[23],而将土壤长期休耕会降低重金属含量,也会降低土壤养分库容^[24]。郭旭东等^[25]研究表明引起土壤养分及有效性变异的主要因素是土地利用的变化;白玲玉等^[26]研究表明土地利用方式对土壤重金属的积累有显著的影响。在本研究中,不同土地利用方式下休耕土壤不仅养分含量高于其他土地利用类型,土壤重金属含量也显著高于耕作土壤和自然土壤,这一点在板页岩风化物发育的土壤上表现更为明显。这一结论与汤文光等^[24]研究结果中长期免耕既会降低土壤重金属含量,

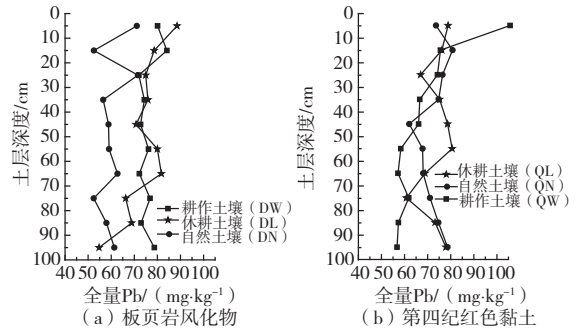


图4 不同利用方式下Pb含量垂直分布特征

Fig. 4 Vertical distribution of Pb in soil under different land use types

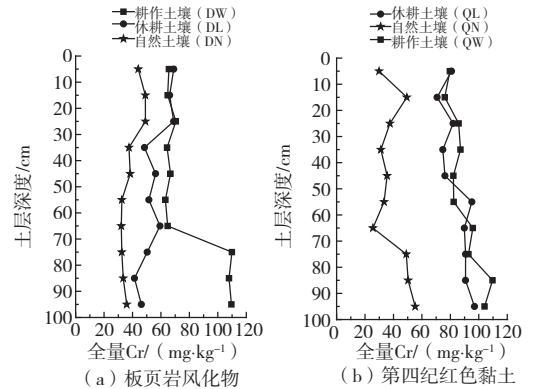


图5 不同利用方式下Cr含量垂直分布特征

Fig. 5 Vertical distribution of Cr in soil under different land use types

还会降低土壤养分库容相悖, 出现这种现象的原因可能是休耕土壤自身养分和重金属含量很高, 该地休耕前为菜地, 农户以施用有机肥为主 (猪粪, 当地盛产黑猪), 而有机肥的施用既增加土壤肥力又增加重金属含量^[18], 加上休耕年限较短, 土壤养分和重金属含量无法在短时间内减少。

表 6 剖面土壤养分和重金属含量指标间相关分析
Table 6 Relationships between nutrients and heavy metals of the soil profile

指标	有机质	速效磷	速效钾	碱解氮	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
有机质	1								
速效磷	0.559**	1							
速效钾	0.775**	0.596**	1						
碱解氮	0.633**	0.615**	0.630**	1					
Cu	0.505**	0.023	0.417**	0.239	1				
Zn	0.438**	0.276*	0.642**	0.346**	0.654**	1			
Pb	0.501**	0.243	0.524**	0.262*	0.373**	0.560**	1		
Cd	0.808**	0.331**	0.750**	0.475**	0.709**	0.715**	0.531**	1	
Cr	-0.127	-0.098	0.113	-0.012	-0.062	0.398**	0.185	0.139	1

注: * 在 0.05 水平下显著相关, ** 在 0.01 水平下显著相关; $n=60$ 。

通过对 2 种母质的耕作土壤养分含量研究发现, 两地农田土壤有效钾含量很高, 其余养分元素含量很低, 农田土壤养分的供应不平衡。这与胡瑞芝等^[27]对湖南省典型农田土壤养分现状研究较为一致。因此, 应根据土壤自身肥力状况、作物自身的需要及目标产量合理施用各种肥料, 以提高肥料自身的经济效益, 达到增产增收的目的。在 3 种土地利用方式中, 耕作土壤养分含量高于自然土壤, 这可能是在农业生产过程中灌溉、施肥等的农田经营管理提升了的土壤肥力。张心昱等^[28]研究认为农户在生产过程中为得到更高的经济效益会对农田加大水分和肥料的输入量, 来增加土壤肥力。板页岩风化物发育的休耕土壤恰好证明了这一点。而自然土壤人为的农业生产活动影响小, 土壤养分来源少, 土壤肥力较低。

研究区耕作土壤和休耕土壤存在外源重金属污染, 并与土壤养分具有一定的耦合关系。研究区土壤 Cd ($0.39\sim 0.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染较为严重, 造成这种现象的原因一方面是农户大量施用农药、化肥、有机肥^[8]增加了土壤中 Cd 含量, 另一方面当地焚烧秸秆现象严重, 秸秆还田不仅可提高土壤肥力, 还会降低土壤重金属 Cd 对水稻的危害^[29]。Cr、Pb、Zn 含量没有超过国家土壤环境质量二级标准, 但 Pb 含量超过了湖南土壤背景值, 有复合污染现象。有研究^[30]表明, 复合污染已经成为农田土壤重金属污染的一种趋势, 重金属之间的协同作用对本身以及其他元素的垂直分布特征均存在一定的影响, 应引起重视。因此, 建议农户在生产过程中加大氮肥的施入量, 适当施用磷肥、钾肥, 充分利用秸秆还田, 协调土壤养分之间的平衡来增加土壤肥力; 同时应进行合理的轮耕制度^[24], 有利于土壤健康, 提高水稻产量与质量; 针对重金属含量较高的休耕土壤, 建议在休耕期间种植伴矿景天等重金属高积累植物进行植物修复。

4 结论

1) 3 种土地利用方式中, 农田土壤耕作层有机质、碱解氮含量低, 有效钾、有效磷含量高, 土壤养分的供应不平衡。0~100 cm 土壤养分随深度增加而减少。

2) 3 种土地利用方式中, 农田土壤 Cu、Cd 含量严重超标, 其他元素尚属清洁; 土壤重金属污染主要集中在表层, Cu、Zn、Cd 等元素含量向下减少趋势明显, Cr 有增大的趋势, Pb 变化不明显。

3) 土壤有机质、速效钾、碱解氮、Cd、Pb 和 Zn 之间均存在显著或极显著正相关关系, 土壤养分和土壤重金属之间具有一定的同源性。

参考文献

- [1] 宋希娟, 王克林, 刘淑娟, 等. 桂西北喀斯特地区不同土地利用方式土壤的有机碳含量及养分特征 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 655-659. DOI:10.3724/SP.J.1238.2013.00655.
- [2] 唐成, 杜虎, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛坡地不同土地利用方式下土壤 N、P 空间变异特征 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1683-1689.
- [3] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 等. 古尔班通古特沙漠与绿洲交错带土地利用变化对土壤特性的影响 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 573-582.
- [4] 张晓东, 李忠, 张峰. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型土壤养分及活性有机碳组分研究 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 55-62.
- [5] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360. DOI:10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.
- [6] 安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评估 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 37-44. DOI:10.11654/jaes.2016.01.005.
- [7] 马智宏, 王北洪, 王纪华, 等. 不同种植方式下土壤中重金属分布的研究及评价 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(13): 5596-5597.
- [8] 周萍, 文安邦, 史忠林, 等. 三峡库区不同土地利用土壤重金属分布特征与污染评价 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 207-213.
- [9] TURNER B L, MEYER B W, SKOLE L D. Global land-use/land-cover change: Towards an integrated study[J]. *Ambio*, 1994, 23(1): 91-95. DOI:10.1007/3-540-32202-7_8.
- [10] ZHANG Y G, JIANG Y, LIANG W J, et al. Vertical variation and storage of nitrogen in an aquic brown soil under different land uses[J]. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(3): 192-196. DOI:10.1007/bf02911023.
- [11] 吕国红, 周莉, 赵先丽, 等. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 3384-3389.
- [12] 王丽娟, 庞奖励, 丁敏. 不同土地利用方式下土壤重金属特征及影响研究 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 88-93.
- [13] 龙健, 黄昌勇, 李娟. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的影响 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 76-79.
- [14] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地不同土地利用和管理方式对土壤质量性状的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1681-1686.
- [15] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区不同利用方式的土壤养分特征研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 75-78.
- [16] 贾亚男, 袁道先. 不同土地利用方式对贵州岩溶土壤微量重金属元素含量的影响 [J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1174-1177.
- [17] 杨艳芳, 邵婷, 吕梦宇, 等. 龙窝湖湿地不同土地利用方式土壤养分和重金属污染特征 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1312-1318.
- [18] 谢运河, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 826-832.
- [19] 鲁如坤. 土壤农化分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [20] 张嘉宁. 黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [21] 古一帆, 何明, 李进玲, 等. 上海奉贤区土壤理化性质与重金属含量的关系 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(6): 601-605.
- [22] 张引娥. 重金属元素在厦门-漳州土壤剖面中的分布特征及其环境意义 [J]. 地球与环境, 2013, 41(1): 13-19.
- [23] 武天云, JEFF J S, 李凤民, 等. 耕作对黄土高原和北美大草原三种典型农业土壤有机碳的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2213-2218.
- [24] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 168-176.
- [25] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响: 以河北省遵化市为例 [J]. 地理学报, 2001, 1(4): 447-455.

- [26] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 96-104.
- [27] 胡瑞芝, 王书伟, 林静慧, 等. 湖南省典型农田土壤养分现状及近 30 年变化趋势 [J]. 土壤, 2013, 45(4): 585-590.
- [28] 张心昱, 陈利顶, 李琪, 等. 不同农业土地利用类型对北方传统农耕区土壤养分含量及垂直分布的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 377-381.
- [29] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响: 以北京市为例 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 690-696.
- [30] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 长期秸秆还田对德阳地区稻田土壤镉赋存形态的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 725-732. DOI:10.13930/j.cnki.cjea.141475.

(本文责任编辑: 郑晓梅)

Vertical distribution of soil nutrient and heavy metals in soil under different land use

LIANG Yufeng, TAN Changyin *, CAO Xueying, HE Qihui, ZHU Shangyou, XIE Yucheng, DAI Bing

Key Laboratory of Environmental Heavy Metal Contamination and Ecological Remediation, College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract To study the vertical distribution characteristics of nutrients and heavy metals in soil under different land use types, three land use types (natural soil, cultivated soil and fallow soil) were selected. The results indicated that the soil nutrients in topsoil followed a sequence of fallow soil, cultivated soil and natural soil under the three land use types, however, the concentration of heavy metal in farmland(cultivated soil and fallow soil) topsoil was higher than that of natural soil. The concentration of heavy metal in cultivated soil and fallow soil had no significant difference. From deposition layer to parent material layer, the concentration of nutrients and heavy metals in topsoil decreased significantly. The significant of soil nutrients and Cu, Zn, Pb, Cd decreased with the increase of soil depth, however, the concentration of Cr showed the opposite trend. The maximum concentration of available potassium in farmland soil was $215.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the maximum concentration of Cd in tillage layer was $0.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Among the three land use types, the concentration of heavy metals in topsoil of fallow soil was the highest, hyperaccumulator (such as *Sedum plumbizincicola*) was suggested to be cultivated for soil remediation during the fallow period.

Key words land use; soil nutrient; heavy metal; soil contaminated