豫西地区有效铜含量分布及其影响因素

吕静霞,王旭刚,付彭辉,刘继奎,徐晓峰,孙丽蓉
(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003)

摘　要: 采用野外调查采样结合室内分析的方法,研究了豫西地区农田土壤有效铜含量的分布特征及其影响因素。结果表明,豫西地区全铜含量介于 23.60 ~ 52.70 mg·kg^{-1},平均 30.17 mg·kg^{-1},有效铜含量介于 0.28 ~ 4.13 mg·kg^{-1},平均 0.89 mg·kg^{-1},表现为山地 < 丘陵 < 平原。本区域有 15.93% 的样点有效铜含量低于缺铜临界值,有 60.44% 的样点濒临缺铜。土壤有效铜含量与有机质、全氮含量呈显著线性正相关关系,与 pH 值呈显著负相关关系。前茬玉米土壤有效铜含量最高,平均 1.18 mg·kg^{-1},前茬红薯土壤有效铜含量最低,平均 0.63 mg·kg^{-1}。

关键词: 有效态铜;分布特征;影响因素;旱地土壤;豫西地区
中图分类号: S153.6^{+}1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-7601(2014)03-0155-06

Distribution characteristics of soil available Cu and its affecting factors in West Henan

LV Jing-xia, WANG Xu-gang*, FU Peng-hui, LIU Ji-kui, XU Xiao-feng, SUN Li-rong
(*College of Agriculture*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang*, 471003, *China*)

Abstract: Distributing characteristics of and factors contributing to soil available Cu in the farmland in the West Henan were studied. Results showed that total soil Cu was mostly within the range of 23.60 ~ 52.70 mg·kg^{-1}, with an average of 30.17 mg·kg^{-1}, and available Cu was mostly within the range of 0.24 ~ 4.13 mg·kg^{-1}, with an average of 0.89 mg·kg^{-1}. Available Cu in soil increased with the order of mountain area < hilly area < plain area. In this area, content of soil available Cu among 15.93% of total samples was below the minimum threshold, accounting for 60.44%. parameters including content of organic matter, total nitrogen, pH was related with soil available Cu, with a positive relationship between soil available Cu and organic matter, and a negative relationship between soil pH and available Cu. The soil available Cu content was 1.18 mg·kg^{-1}, with corn being the preceding crop. By contrast, it reduced to 0.63 mg·kg^{-1}, with sweet potato as the preceding crop.

Keywords: soil available Cu; distribution characteristics; influencing factors; dryland soil; West Henan

铜是一种可以引起环境污染的易积聚在土壤表层的难迁移的重金属元素,也是植物正常生命活动所必需的微量矿质元素。铜是植物体内质体蓝素、超氧化物歧化酶、细胞色素氧化酶等多种酶的组成成分,在碳水化合物、脂肪和氮代谢过程中起着重要作用,影响花粉的形成和受精。无外源输入的农田土壤中铜含量平均在 20 ~ 30 mg·kg^{-1}之间[1]。土壤中铜主要以无效的残渣态存在,占全铜含量的 55.80%;弱有机结合态和铁锰氧化态等潜在有效态占 21.15% 和 15.75%;有效态含量仅为全铜含量的 4.5%[2]。

土壤中铜的有效性受 pH、有机质、CEC 等土壤性质及植物生长等因素的影响。施用有机物料秸秆和猪粪后,土壤中交换性铜含量明显减少[3]。施入磷酸盐稳定 120 d 后,红壤中有效锌含量都显著降低了 8.3% ~ 11.6%;施入石灰后,红壤中铜、锌有效性含量降低了 87.6% ~ 92.3%[4]。另外,铜在土壤中的络合、沉淀、吸附等反应可以促进铜的老化效应,降低其在土壤中的溶解度和生物可利用性[5]。长期种植作物可使耕层土壤各形态铜含量降低,长期进行小麦连作和粮豆轮作加剧了 0 ~ 80 cm 土层土壤有效铜的耗竭[6]。

豫西地区位于黄土高原东南缘,是黄土高原向黄淮海平原过渡的中心地带,土壤类型以石灰性土

收稿日期: 2013-11-05
基金项目: 河南省科技攻关项目(11210211007);河南省重大公益招标项目(091100910100);河南省技术开发项目(20110126)
作者简介: 吕静霞(1964—),女,河南洛阳人,实验师,主要从事土壤植物营养方面研究。E-mail: lvjingxia7777@163.com。
* **通信作者:** 王旭刚(1978—),男,河南南阳人,副教授,博士,主要从事土壤化学方面研究。E-mail: nywxg@126.com。

壤为主,微量元素铜有效性总体不高[7]。由于受土壤性质、土壤管理和土壤环境条件等因素的影响,土壤有效铜呈现出时空变异的特征,而这种变异有可能造成区域性土壤环境中铜的缺乏和过量,进而影响作物生长或通过食物链影响人体健康。鉴于此,通过调查豫西地区土壤中有效铜的分布特征及其与有机质、作物茬口、全氮等因素的关系,以期为采用合理措施调控铜的供应、改善作物铜素营养提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

洛阳市地处河南省西部,位于暖温带南缘向北亚热带过渡地带,属暖温带大陆性季风气候和亚热带雨林气候。年平均气温 14.7℃,降雨量 601.6 mm。地势西高东低。境内山川丘陵交错,地形错综复杂,其中山区 45.51%,丘陵 40.73%,平原占 13.8%。土壤类型主要是棕壤、褐土、潮土等。

1.2 土壤样品采集

土壤样品分别采自洛阳市新安县、嵩县、孟津县、伊川县、汝阳县、宜阳县、洛宁县。据各县地形图结合土地利用情况,在实地踏勘的基础上,在各采样区选择具有代表性的采样点,利用不锈钢土钻采集耕层(0~20 cm)混合土壤样品,同时记录调查采样点的海拔高度、前茬作物、地形特征等基本信息。共采集了海拔介于 230~1 020 m 之间的农田土壤样品 546 个,覆盖东经 111°12′27″~112°46′07″,北纬 34°01′08″~34°56′15″,囊括了山地、丘陵和平原三种地形条件,对本区域农田土壤具有较强代表性。样品自然风干、木棒胶皮研磨后过 20 目和 100 目尼龙筛后贮于聚乙烯袋中备用。

1.3 土壤样品分析

1.3.1 土壤基本性质 土壤 pH 值用 pH 计测定,有机质含量采用重铬酸钾法外加热容量法测定;全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用 $H_2SO_4-HClO_4$ 消化-钼锑抗比色法测定,速效磷采用 0.5 $mol\cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$ 提取钼锑抗比色法测定[8]。从所采集的 546 个样品中随机选择 104 个样品进行上述土壤理化性质分析。

1.3.2 土壤铜含量测定 土壤有效铜含量采用 DTPA 提取(DTPA-$CaCl_2$-TEA 体系,6 $mol\cdot L^{-1}$ HCl 调节,pH=7.3),土液比为 1:2,恒温(25±1℃)振荡 2 h 后过滤,取上清液,原子吸收法测定[8]。从所采集的 546 个样品中随机选择 23 个样品进行全铜分析,土壤全铜采用三酸($HF-HNO_3-HClO_4$)消化法制备待测液,原子吸收法测定(VARIAN AA240)[8],重复 3 次。

1.3.3 数据处理 数据采用 Excel 和 SPSS18.0 分析。

2 结果与分析

2.1 豫西地区土壤全铜含量及其有效率

由表 1 可知,豫西地区农田土壤全铜含量介于 23.60~52.70 $mg\cdot kg^{-1}$,平均 30.17 $mg\cdot kg^{-1}$,全铜含量变异系数为 19.71%,分布相对集中。非参数检验(Kolmogorov-Smirnov 法)结果显示双尾近拟概率值大于 0.05,表明本区全铜含量数据符合正态分布(表 2)。据土壤环境质量标准[9],所分析的 23 个样本的全铜含量均符合二级标准,其中 21 个样本符合一级标准。铜的有效率(有效铜与全铜的比值)介于 1.41%~6.74%,平均为 3.04%。

表 1 土壤样本中全铜含量与铜的有效率

Table 1 Total and available Cu contents of randomly selected samples

样品编号 Sample No.	有效铜 Available Cu /($mg\cdot kg^{-1}$)	全铜 Total Cu /($mg\cdot kg^{-1}$)	铜有效率 Available ratio/%
1	0.70	23.60	2.96
2	0.60	36.43	1.64
3	0.89	28.34	3.13
4	1.01	29.87	3.38
5	0.96	25.95	3.70
6	1.14	28.51	4.01
7	0.42	29.36	1.43
8	0.53	26.29	2.03
9	0.74	31.06	2.39
10	1.12	32.16	3.48
11	0.55	32.10	1.71
12	0.92	26.87	3.43
13	0.69	30.79	2.23
14	1.72	27.45	6.26
15	0.68	30.19	2.26
16	1.66	37.57	4.42
17	0.85	29.53	2.88
18	0.78	28.92	2.69
19	0.54	25.52	2.11
20	0.78	52.70	1.48
21	0.76	29.41	2.57
22	0.73	25.05	2.91
23	1.76	26.15	6.74
平均 Average	0.89	30.17	3.04
标准偏差 Standard deviation	0.37	5.95	1.36
变异系数 Coefficient of variation	41.83	19.71	44.70

2.2　土壤有效铜含量的区域分布

正态分布检验结果显示,豫西地区土壤有效铜数据偏度 2.76,峰度 15.06,经对数转换后符合正态分布,洛宁、孟津、汝阳、嵩县、新安、宜阳、伊川土壤有效铜含量符合正态分布(表 2)。对本次采集的 546 个土壤样品有效铜含量分析后发现,豫西地区土壤有效铜含量介于 0.24 ~ 4.13 mg·kg^{-1}之间,平均值为 0.89 mg·kg^{-1},变异系数为 47.19%(表 3)。

表 2　豫西地区铜含量数据正态分布检验

Table 2　Normality test of soil Cu content in West Henan

检验数据 Dataset normality used test		偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验 Z 值 Kolmogorov-Smirnov Z	双尾近似概率值 Asymp. Sig. (2-tailed)
全铜 Total Cu(23)		2.73	9.71	1.18	0.12
有效铜 Available	豫西地区 West Henan(546)	2.76	15.06	2.71	0.01
	对数变换后(546) Log. transformed values	0.26	0.88	0.88	0.42
	洛宁 Luoning(151)	0.95	1.01	1.18	0.13
	孟津 Mengjin(31)	2.13	5.52	1.21	0.11
	汝阳 Ruyang(71)	2.82	11.88	1.33	0.06
	嵩县 Songxian(55)	1.21	0.96	0.99	0.29
	新安 Xin'an(31)	1.15	0.95	1.02	0.25
	伊川 Yichuan(75)	0.85	0.65	0.62	0.84
	宜阳 Yiyang(132)	1.06	1.87	1.23	0.10

注:括号内数字为样本数,下同。　Note: Number in parenthesis is samplenumber, the same as below.

按照有效铜含量小于 0.5 mg·kg^{-1}为缺乏,0.5 ~ 1.0 mg·kg^{-1}为濒临缺乏,> 1.0 mg·kg^{-1}为充足的标准[12],本区域有 15.93% 的样点有效铜含量低于缺铜临界值,有 60.44% 的样点频临缺铜;缺铜样点主要分布在伊川、嵩县,濒临缺铜样点主要分布在洛宁和新安(表 3)。

本区域有效铜含量分布不均。以孟津平均含量最高,达 1.04 mg·kg^{-1},以伊川平均含量较低,仅为 0.63 mg·kg^{-1},极差达 0.41 mg·kg^{-1}。新安县样点间有效铜变化较小,变异系数为 21.51%,孟津县变异最大,达 74.04%。

不同地形有效铜含量数据的正态性检验结果显示数据均符合对数正态分布(表 4),不同地形条件下有效铜含量也明显不同,表现出山地 < 丘陵 < 平原,以平原含量最高,变异系数最大,丘陵最低,变异系数最小。从缺铜样本数可以看出,山地农田土壤较易缺铜(表 4)。

表 3　豫西地区土壤有效铜的区域分布特征

Table 3　Regional distribution characteristic of soil available Cu in West Henan

采样区域 County	含量范围 Range /(mg·kg^{-1})	平均值 Average /(mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation /(mg·kg^{-1})	变异系数 Coefficient of variation/%	不同级别样本比例 Classification		
					缺乏 Deficiency	濒临缺乏 Medium	丰富 Abundance
洛宁 Luoning(151)	0.33 ~ 1.91	0.88	0.29	32.95	9.27	66.89	23.84
孟津 Mengjin(31)	0.42 ~ 4.13	1.04	0.77	74.04	6.45	54.84	38.71
汝阳 Ruyang(71)	0.28 ~ 4.02	0.92	0.61	66.30	22.54	47.89	29.58
嵩县 Songxian(55)	0.30 ~ 2.14	0.98	0.50	51.02	36.36	43.64	20.00
新安 Xin'an(31)	0.70 ~ 1.45	0.93	0.20	21.51	3.23	64.52	32.26
伊川 Yichuan(75)	0.33 ~ 1.21	0.63	0.19	30.16	42.67	52.00	5.33
宜阳 Yiyang(132)	0.24 ~ 2.04	0.89	0.33	37.08	15.15	58.33	26.52
豫西地区 West Henan(546)	0.24 ~ 4.13	0.89	0.42	47.19	15.93	60.44	23.63

2.3　影响土壤有效铜含量的因素分析

2.3.1　土壤性质　有效铜含量与 pH 值呈极显著负相关关系,直线、幂函数和指数函数回归方程的相关系数均达到极显著水平,以指数函数回归方程的相关系数最大,可以较好地表达供试土壤 pH 与有效铜之间的相关关系(表 5)。豫西地区土壤有效铜含

量随有机质含量增加而增加,二者之间呈极显著正相关关系,线性方程更适宜描述二者之间的关系。土壤有效铜与全氮与之间呈显著正相关。3 种函数的回归方程相关系数分别为 0.25、0.21 和0.27,均达显著水平,有效铜随土壤 N 素含量增加而增加。有效铜含量与土壤全磷、速效磷含量之间无显著相关关系(表 5)。

表 4 豫西地区土壤有效铜的地形分布特征

Table 4 Topographic distribution characteristic of soil available Cu in Western Henan

地形 Topography	含量范围 Range /(mg·kg^{-1})	K-S 检验双尾近似概率 Asymp. Sig. (2-tailed)	平均值 Average /(mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation /(mg·kg^{-1})	变异系数 Coefficient of variation/%	不同级别样本比例 Classification		
						缺乏 Deficiency	濒临缺乏 Medium	丰富 Abundance
山地 Mountain area(138)	0.32~2.18	0.86	0.83	0.37	44.58	22.46	55.07	22.46
丘陵 Hilly area(309)	0.24~2.50	0.54	0.84	0.35	41.67	14.89	61.81	23.30
平原 Plain area(99)	0.33~4.13	0.32	1.03	0.69	66.99	10.10	63.64	26.26

注:K-S 检验数据全部为对数转换后。 Note: Test data all after logarithmic transformation.

表 5 土壤性质与有效铜含量回归方程

Table 5 Regression equation of available Cu and soil properties

土壤性质 Soil characteristics	直线方程 Linear equation	幂函数 Power function	指数函数 Exponential function
pH (n = 104)	$y = -0.286x + 2.940$ ($r = 0.369^{**}$)	$y = 28.846x^{-1.816}$ ($r = 0.375^{**}$)	$y = 6.397e^{-0.288x}$ ($r = 0.384^{**}$)
有机质 Organic matter (n = 104)	$y = 0.360x + 0.348$ ($r = 0.343^{**}$)	$y = 0.669x^{0.480}$ ($r = 0.314^{**}$)	$y = 0.462e^{0.369x}$ ($r = 0.317^{**}$)
全 N Total nitrogen (n = 104)	$y = 0.381x + 0.325$ ($r = 0.252^{*}$)	$y = 0.671x^{0.455}$ ($r = 0.213^{*}$)	$y = 0.452e^{0.388x}$ ($r = 0.231^{*}$)
全 P Total phosphorus (n = 104)	$y = -5\times10^{-5}x + 0.850$ ($r = 0.02$)	$y = 1.125x^{-0.064}$ ($r = 0.039$)	$y = 0.849e^{-0.0002x}$ ($r = 0.084$)
速效 P Available phosphorus (n = 104)	$y = 0.009x + 0.736$ ($r = 0.155$)	$y = 0.592x^{0.111}$ ($r = 0.147$)	$y = 0.685e^{0.009x}$ ($r = 0.148$)

注:* 表示 $P<0.05$ 显著相关,* * 表示 $P<0.01$ 显著相关,n 为样本数,r 为相关系数,y 为有效铜含量,x 为土壤性质指标值。

Note: * and * *, significant at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively; n, sample number; r, correlation coefficient; y, available Cu; x, soil characteristics of the same line.

2.3.2 海拔高度 不同海拔有效铜含量数据的正态性检验结果显示数据均符合对数正态分布(表 4),进一步分析显示,不同海拔高度农田土壤有效铜含量之间存在明显不同,其平均值以海拔 300 m 以下最大,随海拔增加,有效铜含量的平均值变化无明显规律,其变异系数呈现一定的降低趋势,有效铜缺乏样本数呈现先增加后降低趋势,主要集中在海拔 300~500 m 之间(表 6)。海拔高度与土壤有效铜含量的关系可能与两个因素有关,一是高含铜量的表层土壤微团聚体随水向低海拔土壤迁移;二是海拔较低施肥、灌溉便利,促进有效铜的活化和携出。这一结果与前文地形与有效铜含量的关系一致。

2.3.3 作物茬口 正态分布检验结果显示除了前茬烟草土壤有效铜含量符合对数正态分布外,其余茬口土壤有效铜含量数据符合正态分布(表 7)。不同茬口土壤有效铜含量状况如表 7 所示,其中在前茬作物为玉米、大豆的土壤中含量为最高,前茬红薯的土壤有效铜含量最低,且变异系数最小。从样本缺乏比例看,前茬红薯的样本有效铜含量缺乏、濒临缺乏比例分别高达 26.42% 和 71.70%,而前茬花生和玉米的样本有效铜缺乏和濒临缺乏比例较低。前茬作物对土壤有效铜含量的影响可能与作物根系对土壤铜的活化、吸收和作物的收获携出有关。吕其昌等[10]分析了河南省玉米、大豆、红薯等饲料中微量元素的含量,玉米饲料中含铜量为1.55 mg·kg^{-1},而红薯中铜含量 4.12 mg·kg^{-1},这可能是前茬玉米土壤有效铜含量较前茬红薯有效铜含量高的重要原因之一。

表 6　不同海拔高度农田土壤的有效铜含量

Table 6　Altitude distribution characteristic of available Cu in farmland soil in Western Henan

海拔 Altitude/m	含量范围 Range /(mg·kg^{-1})	K－S 检验双尾近似概率 Asymp. Sig. (2-tailed)	平均值 Average /(mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation /(mg·kg^{-1})	变异系数 Coefficient of variation/%	不同级别样本比例 Classification		
						缺乏 Deficiency	濒临缺乏 Medium	丰富 Abundance
300 以下(32)	0.32～4.13	0.64	1.19	0.94	78.99	6.25	56.25	37.50
300～400(114)	0.28～1.89	0.46	0.82	0.34	41.46	17.54	60.53	21.93
400～500(181)	0.24～2.25	0.42	0.83	0.36	43.37	21.55	59.12	19.34
500～600(104)	0.28～2.19	0.81	0.83	0.36	43.37	15.38	66.35	18.27
600～700(74)	0.43～1.91	0.76	0.94	0.32	34.04	9.46	52.70	37.84
700～800(19)	0.42～1.76	0.63	0.95	0.37	38.95	10.53	63.16	26.32
800～900(10)	0.51～1.14	0.84	0.83	0.28	33.73	0	90.00	10.00
900 以上(12)	0.42～1.44	0.90	0.85	0.29	34.12	8.33	58.33	33.33

注:K－S 检验数据全部为对数转换后。　Note: Test data all after logarithmic transformation.

表 7　不同前茬对农田土壤有效铜含量的影响

Table 7　Effect of previous crop on farmland soil available Cu

前茬作物 Preceding crop	含量范围 Range /(mg·kg^{-1})	K－S 检验双尾近似概率 Asymp. Sig. (2-tailed)	平均值 Average /(mg·kg^{-1})	标准差 Standard deviation /(mg·kg^{-1})	变异系数 Coefficient of variation/%	不同级别样本比例 Classification		
						缺乏 Deficiency	濒临缺乏 Medium	丰富 Abundance
辣椒(22)	0.24～2.14	0.98	0.89	0.42	47.19	18.18	54.55	27.27
大豆(27)	0.33～2.04	0.81	0.99	0.43	43.43	11.11	55.56	33.33
谷子(59)	0.44～1.91	0.32	0.79	0.27	34.18	10.17	72.88	16.95
红薯(53)	0.30～1.10	0.88	0.63	0.19	30.16	26.42	71.70	1.89
花生(25)	0.34～1.42	0.44	0.80	0.27	33.75	8.00	76.00	16.00
玉米(47)	0.39～4.13	0.07	1.18	0.69	58.47	8.51	38.30	53.19
烟草(289)	0.28～4.01	0.65a	0.86	0.37	43.02	15.92	61.25	22.84

注:前茬烟草数据经过对数转换。Note: Test data of tobacco after logarithmic transformation.

3　讨　论

关于本区域土壤微量元素铜的含量及其有效性已被多次研究,1986 年贺家媛等[11]结合土壤养分普查研究了河南省土壤微量元素含量分布,采用 DTPA (pH7.3)提取的有效铜含量为 0.24～5.54 mg·kg^{-1},平均含量为 1.29 mg·kg^{-1},灵宝至郑州一带褐土区相对偏低,在 0.90 mg·kg^{-1}左右,认为当时河南土壤铜素供应处于充足状态。1991 年余存祖等[12]研究了黄土高原地区微量元素区域分布与生态影响,结果显示洛阳三门峡地区土壤铜含量处于中高级水平,大于 1.0 mg·kg^{-1}以上。本研究结果显示豫西地区农田土壤有效铜含量为 0.24～4.13 mg·kg^{-1},平均 0.89 mg·kg^{-1},有 15.93%的样点处于缺铜状态,主要分布在伊川县和嵩县;60.44%的样点濒临缺铜,主要分布在洛宁县和新安县。土壤中有效铜含量随时间呈现明显下降趋势。楚纯洁等[1]认为长期以来豫西地区土壤中铜锌元素无外源性人为输入或很少有外源性输入,而化肥尤其是氮、磷、钾化肥的大量使用增加微量元素铜的携出[13],致使本区农田土壤中微量元素由 20 世纪 90 年代的充足状态发展至现今的濒临缺乏,成为限制继续提高区域粮食产量、质量的重要因素。

关于影响铜有效性的因素方面,有机质和 pH 的作用已被广泛研究。相对于 pH 与有效铜的负相关关系几无争议而言,有机质与有效铜之间的关系则备受关注。有机质可以作为土壤与铜离子间的络合桥梁,增强固体表面的亲和力,增加对铜的吸附;或与铜形成有机结合态铜[3],降低铜的生物有效性[14－15]。劳秀荣等认为土壤有效铜与有机质含量之间无明显的相关关系[16],但汪金舫等认为在砂姜黑土上秸秆还田可增加有效铜含量[17],大样本量的分析认为有机质和有效铜之间存在显著正相关关系[18－19]。本研究也发现豫西地区农田土壤有效铜

与有机质含量之间存在显著正相关关系。曾希柏等采用盆栽试验研究了溶解性有机物对土壤中铜生物有效性的影响,认为在 200 mg·kg^{-1}以下,有机物与铜的有效性呈正相关关系[20]。向万圣等认为有机质含量 4%以下,有机质与有效铜呈正相关关系,有机质含量 > 4%时有效铜随有机质增加而降低[21]。DOM 对重金属环境行为的影响还与 DOM 的种类、土壤质地、土壤缓冲能力等密切相关[20]。本区域农田有机质含量偏低,在 1.0%左右,施用有机肥可以增加铜的携入量、提高铜的有效性,在调控铜素供应方面具有重要意义。

4 结 论

豫西地区农田土壤全铜含量介于 23.60 ~ 52.70 mg·kg^{-1},平均值为 30.17 mg·kg^{-1},符合土壤环境质量二级标准。有效铜含量为 0.24 ~ 4.13 mg·kg^{-1},平均 0.89 mg·kg^{-1},有 15.93%的样点处于缺铜状态,主要分布在伊川县和嵩县;60.44%的样点濒临缺铜,主要分布在洛宁县和新安县。土壤有效铜含量与有机质和全氮含量呈显著正相关关系,与 pH 值呈极显著负相关关系。海拔 300 ~ 600 m 时,丘陵、山地农田土壤有效铜含量较低,样本缺乏比例高。土壤有效铜含量受前茬作物影响,前茬玉米土壤有效铜含量较高,前茬红薯土壤有效铜含量较低;间套轮作利于改善作物铜素营养。

参 考 文 献:

[1] 楚纯洁,马建华,朱玉涛.不同级别城镇土壤重金属含量与潜在生态风险比较——以郑州市、中牟县和韩寺镇为例[J].土壤通报,2010,(2):467-472.

[2] 郝汉舟,靳孟贵,李瑞敏,等.耕地土壤铜、镉、锌形态及生物有效性研究[J].生态环境学报,2010,19(1):92-96.

[3] 潘 逸,周立祥.施用有机物料对土壤中 Cu、Cd 形态及小麦吸收的影响:田间微区试验[J].南京农业大学学报,2007,30(2):142-146.

[4] 张 茜,徐明岗,张文菊,等.磷酸盐和石灰对污染红壤与黄泥土中重金属铜锌的钝化作用[J].生态环境,2008,17(3):1037-1041.

[5] 徐明岗,王宝奇,周世伟,等.外源铜锌在我国典型土壤中的老化特征[J].环境科学,2008,29(11):3213-3218.

[6] 魏孝荣,郝明德,邵明安.黄土高原旱地长期种植作物对土壤微量元素形态和有效性的影响[J].生态学报,2005,25(12):3196-3203.

[7] 崔海燕,王明娣,介晓磊,等.石灰性褐土中磷锌镉相互作用对其有效性的影响[J].农业环境科学学报,2010,(1):97-103.

[8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.

[9] 张红振,骆永明,夏家淇,等.基于风险的土壤环境质量标准国际比较与启示[J].环境科学,2011,(3):795-802.

[10] 吕其昌,安汝义,李绍钰,等.河南省饲料中微量元素含量盈缺的研究[J].河南农业科学,1997,(9):35-38.

[11] 贺家媛,郑文麒,邓留珍.河南省土壤微量元素含量分布及在农业上的应用[J].土壤学报,1986,(2):132-141.

[12] 余存祖,彭 琳.黄土区土壤微量元素含量分布与微肥效应[J].土壤学报,1991,28(3):317-326.

[13] 李欢欢,黄玉芳,王玲敏,等.河南省小麦生产与肥料施用状况[J].中国农学通报,2009,(18):426-430.

[14] 陈世俭.有机物质添加量对污染土壤铜形态及活性的影响[J].土壤与环境,1999,(1):22-25.

[15] 华 珞,白铃玉,韦东普,等.有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响[J].中国环境科学,2002,(4):59-63.

[16] 劳秀荣,吴子一,高燕春.长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):49-52.

[17] 汪金舫,刘月娟,李本银.秸秆还田对砂姜黑土理化性质与锰、锌、铜有效性的影响[J].中国生态农业学报,2006,14(3):49-51.

[18] 李晓宁,高 明,慈 恩.重庆市植烟土壤有效态微量元素含量评价[J].中国生态农业学报,2007,15(3):25-28.

[19] 杨定国,成延鏊,温琰茂,等.四川盆地土壤中微量元素的含量分布及其有效性的研究[J].土壤学报,1985,(2):157-166.

[20] 曾希柏,杨佳波,李莲芳,等.溶解性有机物对土壤中铜生物有效性的影响[J].农业环境科学学报,28(5):883-889.

[21] 向万胜,李卫红.湘北丘岗地区红壤和水稻土微量元素的有效性研究[J].土壤通报,2001,32(1):44-46.