

襄汾县褐土重金属的垂向分布特征及其与磁化率的相关性分析

张希云, 张永清*, 陈轶楠, 杜静静, 马大龙, 闫娇 (山西师范大学城环学院, 山西临汾 041004)

摘要 [目的] 为了解襄汾县土壤中 Mn、Zn、Cu、Cr、Ni 5 种重金属的垂向分布特征及其与磁化率的相关性、污染状况。[方法] 通过对襄汾县主要土壤类型褐土下的 7 个土种剖面取样分析, 并且根据国家土壤环境质量二级标准对襄汾县土壤环境质量进行了评价。[结果] 7 个土种剖面中多种金属元素的垂向分布均表现出一致的变化趋势。在 0~20 cm 范围内有明显的富集现象, 20 cm 以下各元素含量出现波动, 土壤中 Mn 和 Cu、Cr、Ni 来自于同一污染源, Zn 则可能来自于其他人为活动污染源。[结论] 土壤重金属污染与土壤磁化率、土壤理化性质有密切的联系, 重金属单因子污染指数均小于 1.0, 襄汾县土壤未受到污染, 尚属清净, 适合农业生产。

关键词 土壤; 重金属; 磁化率

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)08-03436-04

Vertical Distribution Characteristics of Soil Heavy Metals in Xiangfen County Brown Soil and Analysis of Relationship between Soil Heavy Metals and Magnetic Susceptibility

ZHANG Xi-yun et al (College of Urban and Environmental Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004)

Abstract [Objective] The research aimed to study Mn, Zn, Cu, Cr and Ni in the different soil types of Xiangfen County and the correlation with its magnetic susceptibility. [Method] 7 profiles of the cinnamon soil were analyzed by sampling from Xiangfen County, and a deep research was made on the flux and the perpendicular characterization of Mn, Zn, Cu, Cr and Ni in the soil and the correlation with its magnetic susceptibility. An environmental assessment was conducted according to the state soil environment quality secondary standard. [Result] There was a consistent trend of the perpendicular characterization of the metals in 7 soil sections. An obvious enrichment phenomenon existed in 0~20 cm layer. However, an fluctuant characteristic was below 20 cm. The five metals had the same pollutant source. Obviously, Zn was derived from other kind of the pollutant. [Conclusion] There was a intimate relationship between the heavy metal pollution and the magnetic susceptibility and the physico-chemical property. The single factor index of the heavy metal was below 1.0. The soil was unpolluted and had a big capacity in the agricultural industry.

Key word Soil; Heavy metal; Magnetic susceptibility

我国是农业大国。粮食的生产和土壤有着密切的联系。因此, 土壤环境问题越来越受人们关注。随着工农业、厂矿企业的发展, 重金属污染物进入环境和生态系统中, 并造成土壤污染的可能性也不断提高。土壤重金属污染的调查与评价成为环境、农业工作者关注的热点问题。由于重金属污染源中大都含有磁性矿物, 而磁性测量方法又具有测量速度快、参数种类多、对样品无破坏、无污染等特点, 探讨磁性矿物和重金属元素等污染物之间的关系, 对实际生产和科学研究具有重要意义。

土壤重金属元素在土壤剖面中的垂直迁移分布特征, 主要受重金属元素的化学性质、土壤理化性质影响^[1]。近年来, 国内外开展了不少研究土壤重金属与磁化率相关性的工作。众多的研究表明, 土壤磁化率与重金属存在密切的关系^[2-5]。Hanesch 等^[6]指出, 靠近城市和工业中心地区的土壤磁化率要高于其他地区。Beckwith 等^[7]研究表明, 在城市地区和高速公路附近的土壤中, 磁化率与 Fe、Pb、Zn、Cu 含量存在线性关系。但已有关于重金属污染和土壤磁性相关关系的研究, 主要限于单一土壤类型的表土。若能进一步研究不同土壤类型剖面重金属元素与磁化率的垂向变化规律, 则可进一步为土壤的利用改良和修复提供科学依据, 并制定相应的防治对策。襄汾县是临汾市的平川大县。现有耕地 6

万 hm^2 , 农业条件较好, 是老牌的国家级粮棉基地县。研究襄汾县褐土剖面重金属元素和磁化率的垂直分布特征, 可以从理论上丰富土壤磁学与土壤重金属污染方面的内容, 在实践上可为当地农业的区划和可持续发展提供指导性的建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 襄汾县位于山西省南部, 东临浮山、曲沃、翼城, 西傍乡宁, 南毗曲沃、侯马、新绛, 北连临汾。地理坐标为 $111^{\circ}6'38'' \sim 111^{\circ}40'55''\text{E}$, $35^{\circ}40'5'' \sim 36^{\circ}3'20''\text{N}$ 。南北 39.3 km, 东西 26.5 km, 总面积 1 304 km^2 , 耕地面积 6 万 hm^2 。襄汾县地势东西高, 中间低; 年均气温 11.5°C , 1 月年均气温 4.5°C , 7 月年均气温 26.0°C , 年降雨量 550 mm 左右, 无霜期 185 d。襄汾县矿产资源丰富, 已发现矿产 16 种, 以煤和铁为主。铁矿主要分布在塔儿山及其周边地区, 全县的支柱产业来自能源开采。普遍分布的地带性土壤类型为褐土, 成土母质为黄土。

1.2 土壤样品采集与制备 样品采集于 2011 年早春进行。根据第 2 次土壤普查结果, 对襄汾县褐土的 4 个土属下的 7 个土种进行样品采集, 每个土种取 3 个剖面。7 个土种代号分别为中壤轻度侵蚀耕种黄土质褐土性土 (XF01)、中壤深位厚黏化层耕种洪积黄土碳酸盐褐土 (XF02)、中壤耕种洪积黄土褐土性土 (XF03)、中壤耕种黄土状碳酸盐褐土 (XF04)、中壤浅位厚黏化层耕种黄土状碳酸盐褐土 (XF05)、轻壤浅位厚黏化层耕种黄土状碳酸盐褐土 (XF06)、重壤深位中黑垆土层耕种黄土状碳酸盐褐土 (XF07)。土壤剖面样品采集时采用每 20 cm 连续采样, 采样层位分别为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm。每个采集点用 GPS 定位, 并且装

基金项目 “十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2008BADA4B01)。
作者简介 张希云 (1988 -), 女, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤地理。* 通讯作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事土壤及植物生理生态方面的教学与研究工作, E-mail: yqzhang208@163.com。
收稿日期 2013-03-18

入塑料自封袋,标签注明取样点的详细信息。风干后,去除树根、杂草、沙砾、石块等杂质,采用四分法取土 500 g 左右,研磨(玛瑙研钵),分别过 20、100 目尼龙筛后保存在密封袋内备用。

1.3 指标测定与方法 土壤样品重金属全量的测定采用 1:1 硝酸-高氯酸消煮,原子吸收分光光度法^[8];土壤磁化率的测定采用 Bartington MS2 型磁化率仪,磁化率测量相对误差 <0.3%^[9];土壤水分的测定采用烘干法^[10];土壤 pH 的测定采用水:土=2.5:1.0 酸度计法^[10];土壤有机质的测定采用重铬酸钾-硫酸消化法^[10];土壤速效磷的测定采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法^[10];土壤全氮的测定采用半微量凯氏法^[10]。

1.4 重金属污染评价

1.4.1 评价标准。采用《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级。

1.4.2 评价方法。采用单因子指数评价法和内梅罗指数综合评价法^[11],对研究区域土壤进行现状评价。

(1)单因子指数评价法。 $P_{jp} = C_j/S_{jp}$
式中, P_{jp} 为土壤中污染物 j 的单项污染指数; C_j 为土壤中污染物 j 的实测浓度; S_{jp} 为污染物 j 的评价标准或参考值。

(2)内梅罗指数综合评价法。 $P_{j综合} = [(P_{im}^2 + P_{ju}^2)/2]^{1/2}$
式中, $P_{j综合}$ 为土壤综合污染指数; P_{im} 为土壤污染物中污染指数最大值; P_{ju} 为土壤各污染指数的平均值。

(3)土壤综合污染指数评价法。分级标准采用农田土壤环境监测技术规范(NY/T395-2000)。

1.5 数据处理 采用 Excel2003、SAS 和 SPSS 对数据进行描述性统计和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同土种对土壤重金属含量的影响 由表 1 可知,不同土种中重金属含量不一致。在 0~20 cm 土层,Mn 在不同土种中表现为 XF07 > XF06 > XF03 > XF04 > XF05 > XF01 > XF02,且 XF07 与 XF01、XF02、XF05 均在 0.05 水平上差异显著;Zn 在不同土种中表现为 XF03 > XF06 > XF04 > XF05 > XF07 > XF02 > XF01,其中 XF01、XF03 在 0.05 水平差异显著;Cu 在不同土种中表现为 XF07 > XF05 > XF03 > XF04 > XF06 > XF01 > XF02, XF07 与 XF01、XF02、XF05、XF06 在 0.05 水平差异显著;Cr 在不同土种中表现为 XF05 > XF01 > XF02 > XF06 > XF03 > XF04 > XF07;Ni 在不同土种中表现为 XF01 > XF05 > XF07 > XF04 > XF03 > XF02 > XF06。统计分析表明,Cr、Ni 均未达到显著水平。

表 1 不同土种对土壤重金属含量的影响 mg/kg

深度//cm	土种	Mn	Zn	Cu	Cr	Ni
0~20	XF01	631.36 b	53.06 b	35.49 b	39.39 a	56.95 a
	XF02	546.36 b	59.65 ab	32.74 b	35.77 a	31.79 a
	XF03	686.24 ab	81.78 a	41.45 ab	28.92 a	33.66 a
	XF04	673.47 ab	66.63 ab	40.91 ab	20.85 a	45.54 a
	XF05	667.48 b	65.71 ab	42.02 b	42.05 a	54.89 a
	XF06	729.13 ab	72.81 ab	37.64 b	29.66 a	31.78 a
	XF07	1 047.34 a	62.35 ab	61.43 a	19.00 a	46.99 a
20~40	XF01	726.51 a	56.66 a	33.56 a	37.62 a	62.93 a
	XF02	580.37 a	73.15 a	31.88 a	41.87 a	39.61 a
	XF03	645.20 a	57.60 a	35.96 a	28.23 a	37.87 a
	XF04	632.51 a	69.93 a	43.60 a	20.44 a	40.70 a
	XF05	841.06 a	50.39 a	48.08 a	26.46 a	65.00 a
	XF06	709.95 a	67.45 a	39.16 a	25.25 a	34.24 a
	XF07	1 084.45 a	59.85 a	51.99 a	17.69 a	43.09 a
40~60	XF01	816.79 a	49.05 d	34.13 a	40.34 a	65.71 a
	XF02	624.42 a	53.25 cd	35.51 a	35.69 a	40.74 a
	XF03	786.09 a	53.60 cd	38.33 a	25.96 a	39.23 a
	XF04	632.14 a	74.31 a	44.97 a	24.24 a	48.99 a
	XF05	749.03 a	62.62 bcd	43.81 a	31.34 a	51.31 a
	XF06	649.20 a	65.04 abc	38.63 a	29.97 a	25.54 a
	XF07	878.04 a	70.08 ab	58.23 a	18.29 a	50.26 a
60~80	XF01	630.46 ab	50.02 ab	38.95 ab	40.86 a	62.51 a
	XF02	618.92 ab	61.23 ab	34.99 ab	35.77 a	40.95 a
	XF03	782.03 ab	52.03 ab	41.28 ab	28.65 a	26.21 a
	XF04	633.80 ab	71.13 a	43.72 ab	24.63 a	45.84 a
	XF05	862.98 ab	45.70 b	41.40 ab	30.21 a	54.45 a
	XF06	577.97 b	51.26 ab	33.31 b	26.97 a	27.26 a
	XF07	1 059.68 a	70.18 ab	54.90 a	15.02 a	65.71 a

注:表内数据为平均值。同列同土层不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

在 20~40 cm 土层,Mn 在不同土种中表现为 XF07 > XF05 > XF01 > XF06 > XF03 > XF04 > XF02; Zn 在不同土种

中表现为 XF02 > XF04 > XF06 > XF07 > XF03 > XF01 > XF05; Cu 在不同土种中表现为 XF07 > XF05 > XF04 > XF06 > XF03 > XF01 > XF02; Cr 在不同土种中表现为 XF02 > XF01 > XF03 > XF05 > XF06 > XF04 > XF07; Ni 在不同土种中表现为 XF05 > XF01 > XF07 > XF04 > XF02 > XF03 > XF06。统计分析表明, Mn、Zn、Cu、Cr、Ni 均在 0.05 水平差异显著。

在 40 ~ 60 cm 土层, Mn 在不同土种中表现为 XF07 > XF01 > XF03 > XF05 > XF06 > XF04 > XF02; Zn 在不同土种中表现为 XF04 > XF07 > XF06 > XF05 > XF03 > XF02 > XF01, 且 XF01 与 XF04、XF06、XF07, XF04 与 XF01、XF02、XF03、XF05 均在 0.05 水平差异显著; Cu 在不同土种中表现为 XF07 > XF04 > 5 > XF06 > XF03 > XF02 > XF01; Cr 在不同土种中表现为 XF01 > XF02 > XF05 > XF06 > XF03 > XF04 > XF07; Ni 在不同土种中表现为 XF01 > XF05 > XF07 > XF04 > XF02 > XF03 > XF06。统计分析表明, Mn、Cu、Cr、Ni 在不同土种中均未达到显著水平。

表 2 土壤重金属元素含量之间的相关性

元素	Mn	Zn	Cu	Cr	Ni	X_{ij}
Mn	1.000					
Zn	-0.082	1.000				
Cu	0.776**	0.261	1.000			
Cr	-0.572**	-0.324	-0.739**	1.000		
Ni	-0.461*	-0.239	-0.452*	0.546**	1.000	
X_{ij}	0.533**	0.369	0.505**	-0.592**	-0.483**	1.000

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平显著性相关(双尾)。

2.3 土壤重金属环境质量评价结果 表 3 为襄汾县褐土的 7 个主要土种表层土壤重金属污染单因子和内梅罗指数评价结果。把计算出的各重金属元素的单因子污染指数, 按照国家土壤环境质量二级标准进行对比。结果表明, 襄汾县的主要土属的 Mn、Zn、Cu、Cr、Ni 元素单因子污染指数均小于 1, 属于无污染。利用内梅罗综合指数法, 计算各土属的综合污染指数。由表 4 可知, 各土属的内梅罗指数均小于 1, 除了 XF01、XF05 超过 0.7, 到达警戒线外, 其他都属于安全范围。这说明襄汾县的土壤尚清洁, 适合农作物的生长。

表 3 土壤重金属环境质量评价结果

土种	单因子污染指数均值					内梅罗综合指数
	Mn	Zn	Cu	Cr	Ni	
XF01	0.42	0.18	0.35	0.16	0.95	0.73
XF02	0.36	0.20	0.33	0.14	0.52	0.44
XF03	0.46	0.27	0.41	0.12	0.56	0.47
XF04	0.45	0.22	0.41	0.08	0.76	0.60
XF05	0.44	0.22	0.42	0.17	0.91	0.72
XF06	0.49	0.24	0.38	0.12	0.52	0.45
XF07	0.70	0.21	0.61	0.08	0.78	0.65

表 4 土壤环境质量评价分级

等级	单项污染指数		综合污染指数		内梅罗综合污染指数污染水平
	P_{jp}	污染评价	P_i	污染等级	
I	$P_{jp} \leq 1$	无污染	$P_i \leq 0.7$	安全	清洁
II	$1 < P_{jp} \leq 2$	轻微污染	$0.7 < P_i \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
III	$2 < P_{jp} \leq 3$	轻度污染	$1 < P_i \leq 2.0$	轻污染	土壤污染物超过背景值, 视为轻污染, 作物开始污染
IV	$3 < P_{jp} \leq 5$	中度污染	$2 < P_i \leq 3.0$	中污染	土壤、作物均受到中度污染
V	$P_{jp} > 5$	重度污染	$P_i > 3$	重污染	土壤、作物受污染已相当严重

2.4 土壤重金属与磁化率之间的相关性 为了进一步了解重金属与磁化率之间的相关性, 对剖面土壤的重金属含量与磁化率进行了相关性分析。重金属污染物通过各种途径进入土壤表层后, 在合适的条件下可溶解于土壤溶液, 并随着重力作用, 向土壤的深层进行纵向的渗透。

对土壤磁化率与重金属进行相关性分析, 研究结果表

在 60 ~ 80 cm 土层, Mn 在不同土种中表现为 XF07 > XF05 > XF03 > XF04 > XF01 > XF02 > XF06, 且 XF06 与 XF07 在 0.05 水平上差异显著; Zn 在不同土种中表现为 XF04 > XF07 > XF02 > XF03 > XF06 > XF01 > XF05, 其中 XF04 与 XF05 在 0.05 水平差异显著; Cu 在不同土种中表现为 XF07 > XF04 > XF05 > XF03 > XF01 > XF02 > XF06, XF07 与 XF06 在 0.05 水平差异显著; Cr 在不同土种中表现为 XF01 > XF02 > XF05 > XF03 > XF06 > XF04 > XF07; Ni 在不同土种中表现为 XF07 > XF01 > XF05 > XF04 > XF02 > XF06 > XF03。统计分析表明 Cr、Ni 均未达到差异水平。

2.2 土壤重金属含量之间的相关性 由表 2 可知, Zn 与其他元素没有显著相关性; Mn 和 Cu、Cr 呈 0.01 水平显著相关, 相关系数分别为 0.776、-0.572; Cu 和 Mn、Cr 呈 0.01 水平显著相关, 相关系数分别为 0.776、-0.739; Ni 和 Cr 呈 0.01 水平显著相关, 相关系数为 0.546; Ni 和 Mn、Cu 呈 0.01 水平显著负相关, 相关系数分别为 -0.461、-0.452。

明, 低频磁化率(X_{ij})与 Mn、Cu、Cr、Ni 呈 0.01 水平显著相关, 其中, X_{ij} 与 Mn、Cu 元素呈 0.01 水平显著正相关, 相关系数分别为 0.533、0.505; X_{ij} 与 Cr、Ni 呈 0.01 水平显著负相关, 相关系数分别为 -0.592、-0.483。这说明土壤中 Mn、Cu、Cr、Ni 来源与磁性矿物颗粒有关。

2.5 土壤重金属与理化性质之间的相关性 由表 5 可知,

Zn 和全氮呈 0.05 水平显著正相关,相关系数为 0.225;Cr 和土壤有机质含量呈 0.05 水平显著正相关,相关系数为 0.265;Cr、Ni 与 pH 呈 0.01 水平显著负相关,相关系数分别为 -0.415、-0.413。

表 5 土壤重金属与理化性质之间的相关性

元素	全磷含量	土壤全氮	有机质	速磷含量	pH
	mg/kg	含量 // g/kg		mg/kg	
Mn	0.012	-0.013	-0.099	0.062	0.157
Zn	0.206	0.225 *	0.196	0.096	-0.204
Cu	0.045	-0.028	-0.095	0.009	0.188
Cr	-0.041	0.177	0.265 *	-0.002	-0.415 **
Ni	-0.090	0.072	0.133	-0.182	-0.413 **

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平显著性相关(双尾)。

3 结论与讨论

研究表明,多种重金属元素的垂向分布均表现出一致的变化趋势。在 0~20 cm 土层范围内多种重金属元素有明显的富集现象,20 cm 以下土层各元素含量出现波动。根据单因子污染指数结果,Mn、Zn、Cu、Cr、Ni 元素均属于无污染。不同土种中土壤重金属含量不一致。每层剖面中的 Mn 和 Cu 在重壤深位中黑垆土层耕种黄土状碳酸盐褐土里含量都比其他土种高。在 0~20 cm 土层,Zn 在中壤耕种洪积黄土褐土性土里含量最高,Cr 在中壤浅位厚黏化层耕种黄土状碳酸盐褐土里含量最高,Ni 在中壤轻度侵蚀耕种黄土质褐土性土里最高;在 20 cm 以下土层,Zn、Cr、Ni 在不同土种中的含量都发生变化,表明中下层重金属含量有一定的波动。这进一步说明不同土壤类型对重金属的吸附与迁移具有不同的影响。

用 SPSS 软件对 5 种重金属的含量进行相关性分析,发现 Mn 和 Cu、Cr、Ni 呈 0.01 水平显著相关,表明污染土壤中重金属来自于同一污染源如施加农药、化肥等化学物质。各金属元素之间的相关性在一定程度上可以反映这些元素污染程度的相似性或来源的相似性^[12-13]。研究土壤中重金属含量的相关性,可以推测其来源是否相同。若重金属含量呈显著地相关性,说明来源可能相同,否则来源可能不止一个^[14]。土壤磁化率与重金属 Mn、Cu、Cr、Ni 的含量呈 0.01 水平显著相关。土壤磁化率与土壤重金属含量之间存在一定的相关性,说明土壤中磁性增强与重金属富集有密切的联系。用磁学方法,可以监测土壤重金属污染。这与蒋建清等^[15]的研究结果一致。统计结果表明,重金属与理化性质之间有一定的相关性。这可能是由于土壤的机械截留、有机

质的固定、土壤胶体的吸附等对重金属向下迁移有很大的阻滞作用,使得重金属向下迁移缓慢,进一步说明不同土壤类型的土壤质地、pH^[16-17]、有机质含量^[18]等都影响重金属的形态和迁移。

参考文献

[1] 毛大发, 鄢新华. 试论南昌莲塘一带土壤环境地球化学特征及其环境质量[J]. 地质与勘探, 2003, 39(3): 72-77.

[2] 段雪梅, 胡守云. 南京某钢铁公司周边耕作土壤的磁学性质与重金属污染的相关性研究[J]. 中国科学: D 辑, 2009, 39(9): 1304-1312.

[3] 依艳丽, 谷微微. 葫芦岛市土壤磁化率与重金属元素分布规律及其相关性研究[J]. 土壤, 2008, 40(5): 806-811.

[4] 吕达, 郑祥民, 周立昱. 上海崇明岛沉积物重金属污染的磁学研究[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(2): 160-163.

[5] 刘志锋, 杨涛. 武汉市东湖周边近地表土壤磁化率特征及其环境意义[J]. 地质科技情报, 2009, 28(4): 28-29.

[6] HANESCH M, SCHOLGER R, REY D. Mapping dust distribution around an industrial site by magnetic parameters of tree leaves[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 5125-5133.

[7] BECKWITH P R, ELLIS J B, REVITT D M, et al. Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediment[J]. Phys Earth Planet Int, 1986, 42: 6775.

[8] 李西开. 农业常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 125-128.

[9] 王介元, 王昌全. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997.

[10] OLDFIELD F, HUNT A, JONES M D H, et al. Magnetic differentiation of atmospheric dusts[J]. Nature, 1985, 317: 516-518.

[11] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 24-25.

[12] 任顺荣, 邵玉翠, 王正祥. 利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1): 216-218.

[13] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.

[14] STRZYSCZ Z. Magnetic susceptibility of soils in the areas influenced by industrial emissions[C]//Soil Monitoring, Monte Verita. Birkhauser, Basel, 1993: 255-269.

[15] 蒋建清, 吴燕玉. 模拟酸雨对草甸棕壤中重金属迁移的影响[J]. 中国科学院研究生院学报, 1995, 12(2): 185-190.

[16] TURER D G, MAYNARD B J. Heavy metal contamination in highway soils. Comparison of Corpus Christi, Texas and Cincinnati, Ohio shows organic matter is key to mobility[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2003, 4(4): 235-245.

[17] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[18] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南经济快速发展区土壤 Ni 的形态分布影响因素——以昆山市为例[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1953-1959.

[19] 王思思, 李凤全, 王志刚, 等. 金华市土壤磁化率与重金属 Pb 含量的关系[J]. 湖南农业科学, 2012(19): 56-59.

[20] 王凌, 张国印, 张小龙, 等. 蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态与全量相关性研究[J]. 华北农学报, 2011(S1): 85-88.

[21] 余小芬, 陈军, 彭荣珍, 等. 滇中农用地土壤重金属影响因素研究[J]. 西南农业学报, 2012(5): 1765-1769.

[22] 庞丽蓉, 张福金, 李秀萍, 等. 内蒙古农牧交错区土壤重金属含量及其分异[J]. 内蒙古农业科技, 2010(4): 71-72.

(上接第 3413 页)

[16] PAUL B, STECIOW M M. *Saprolegnia multispora*, a new oomycetes isolated from water samples taken in a river in the Burgundian region of France[J]. FEMS Microbiol Lett, 2004, 237(2): 393-398.

[17] KE X L, WANG J G, GU Z M, et al. Morphological and molecular phylogenetic analysis of two *Saprolegnia* sp. (*Oomycetes*) isolated from silver crucian carp and zebra fish[J]. Mycological Research, 2009, 113(5): 637-644.