

陕西杨凌污水处理厂污泥成分月际变化及其土地利用探讨

孙西宁¹,张增强¹,张永涛¹,韩万飞¹,李艳霞²

(1 西北农林科技大学 理学院,陕西 杨凌 712100;2 中国科学院 地理科学与资源研究所,北京 100101)

[摘要] 为了合理解决杨凌污水处理厂污泥的处置问题,推动城市污泥的资源化和无害化利用,通过现场调查采样及室内分析的方法,对杨凌污水处理厂污泥中的 N、P、K 和有机质及重金属 Ni、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr、As、Hg 进行了 10 个月(2005-02~11)的连续监测。结果表明,污泥中含有较高的有机质、全氮、全磷,其含量分别为 361.41~529.38,20.13~35.42 及 3.11~7.48 g/kg;重金属 Ni、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr 和 As 的含量分别为 22.86~38.03,0.68~5.07,29.53~76.16,297.42~313.73,124.37~200.66,43.23~255.00 及 6.02~15.97 mg/kg,Hg 含量在此期间未检测出;重金属含量均未超过我国污泥农用控制标准。污水污泥的水浸出液 pH 值为 6.78~7.01,为微酸近中性。重金属活性的大小顺序为: Ni > Cd > Pb > Zn > Cu > As。对杨凌污水污泥成份动态监测结果表明,该污泥是优质的有机肥源,可以经过进一步稳定化处理后在农田和林地施用。

[关键词] 污泥;营养成分;重金属;农业利用;杨凌

[中图分类号] X705

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)09-0215-06

Components change of sewage sludge by month and land application in Shaanxi Yangling Sewage Treatment Plant

SUN Xi-ning¹,ZHANG Zeng-qiang¹,ZHANG Yong-tao¹,HAN Wan-fei¹,LI Yan-xia²

(1 College of Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: It is suggested that the heavy metal limits in sewage sludge for land application should be modified to promote the safety reuse of sewage sludge in China. The contents of nutrition (N, P, K) and heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cu, Cr, As and Hg) in the sewage sludge of Yangling Sewage Treatment Plant were investigated from February to November, 2005. The results showed that it had high organic matter, total nitrogen (TN) and total phosphor (TP), in which the contents of organic matter, total nitrogen (TN) and total phosphor (TP) were 361.41 - 529.38, 20.13 - 35.42, and 3.11 - 7.48 g/kg, respectively; the contents of Ni, Cd, Pb, Zn, Cu, Cr and As were 22.86 - 38.03, 0.68 - 5.07, 29.53 - 76.16, 297.42 - 313.73, 124.37 - 200.66, 43.23 - 255.00, and 6.02 - 15.97 mg/kg, respectively; however, the contents of Hg in sewage sludge samples were not determined in near a year time. All the heavy metals' contents were lower than the heavy metal limits for agricultural application of China. The pH value of water extracts of the sewage sludge was 6.78 - 7.01, nearly a little acidic or neutral. The active order of heavy metals was: Ni > Cd > Pb > Zn > Cu > As. So the sludge was "high quality" organic fertilizer and was suitable for land application

[收稿日期] 2006-08-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(20377040);陕西省自然科学基金项目(2005C105)

[作者简介] 孙西宁(1975-),女,陕西扶风人,在读硕士,讲师,主要从事固体废物资源化研究。

[通讯作者] 张增强(1963-),男,陕西扶风人,教授,博士生导师,主要从事环境化学与固体废物资源化研究。

after stability treatment.

Key words: sewage sludge; nutrition; heavy metal; agriculture utilization; Yangling

污泥是污水处理厂在净化污水时得到的沉淀物质,含有混入生活污水或工业废水中的泥沙、纤维、动植物残体等固体颗粒及其凝结的絮状物,是各种胶体、有机质及吸附的金属元素、微生物、病菌、虫卵等物质的综合体^[1]。近年来,随着城市水污染治理力度的不断加大,各城市污水处理厂数目在迅速增加,城市污水处理量和污水处理率也不断提高。因此,污水处理过程中的副产品——污泥的总量也快速增加^[2]。

陕西杨凌污水处理厂建于 2003-04,日处理污水 2 万 t,日生产湿污泥 14 t。由于污泥中含有丰富的有机质、氮、磷和植物生长所需的其他营养物质,所以经过无害化处理的污泥能够改良土壤结构,增加土壤肥力,促进作物生长。然而,污泥中除含有丰富的营养物质外,还含有一些难降解的有机物、病原菌、寄生虫(卵)及重金属等有毒或有害物质,如处理不当,会造成二次环境污染^[3]。目前杨凌污水处理厂对生产的污泥采用露天堆放或是直接施用。露天堆放会占用大面积土地,而直接施用有可能引起二次污染。目前,有关杨凌污水处理厂污泥成分及其含量还未见过资料报道。为了更好地解决污泥的处置问题,本研究对杨凌污水处理厂污泥的成分进行了连续 10 个月的动态监测分析,以期对污泥资源的开发和合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

于 2005-02~11 采集杨凌污水处理厂生产的污泥。每月中旬和月末各采样 1 次,样品自然风干研磨破碎后过孔径 0.267 mm 尼龙筛^[4],装瓶密封备用。

1.2 样品分析测定方法

有机质含量采用灼烧法测定^[5];全氮(TN)含量采用半微量凯氏法测定^[6];全磷(TP)含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定^[7];全钾(TK)含量采用氢氧化钠熔融后火焰光度法测定^[8];pH 参考文献[9]方法进行测定;重金属 Cu、Zn、Ni 的含量用硝酸-高氯酸消煮样品^[10],原子吸收分光光度计(Z-5000, HITACHI)测定;Pb、Cd 含量先用硝酸-高氯酸消煮样品^[10],用甲基异丁基甲酮(MIBK)萃取,原子吸收分光光度计(Z-5000, HITACHI)测

定^[11]。Hg 含量用 H₂SO₄-HNO₃-KMnO₄ 消煮,冷原子荧光法测定^[12];Cr 含量用硝酸-高氯酸消煮样品^[10],二苯碳酰二肼比色法测定^[13];As 含量用 H₂SO₄-HNO₃-HClO₄ 消煮,二乙基二硫代氨基甲酸银比色法测定^[14]。

污泥中重金属有效态含量用二乙基三胺五乙酸(DTPA)-CaCl₂-三乙醇胺浸提^[15-18],原子吸收分光光度计(Z-5000, HITACHI)测定。

需用重金属活性系数(TMA)衡量重金属的有效态含量,其计算公式为:TMA/%=重金属有效态含量/重金属总量×100%。

1.3 数据处理

用 Origin 5.0 软件对测定数据进行分析处理,每个月有 2 个样品,每个样品有 2 个重复。最终数据用“平均值±标准偏差”表示。

2 结果与分析

2.1 杨凌污水处理厂污泥中营养成分含量的月际变化

对杨凌污水处理厂污泥中营养成分连续 10 个月的监测结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,污泥中含有丰富的有机质和全氮、全磷等营养元素,其含量分别为 361.41~529.38, 20.13~35.42, 3.11~7.48 g/kg,全钾含量不是很高,为 8.77~12.20 g/kg。污泥呈中性或微酸性。总体来看,在 2~11 月,除污泥中全磷含量在后 7~11 月明显增加外,有机质、全氮、全钾含量的变化无明显规律性。

2.2 杨凌污水处理厂污泥中重金属含量的月际变化

对杨凌污水处理厂污泥中重金属含量连续 10 个月的监测结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,污泥中 Zn、Cu、Ni、Pb、As 含量变化幅度均较小,基本稳定在同一数量级上,其中 Zn 含量为 297.42~313.73 mg/kg, Cu 含量为 124.37~200.66 mg/kg, Ni 含量为 22.86~38.03 mg/kg, Pb 含量为 29.53~76.16 mg/kg, As 含量为 6.02~15.97 mg/kg; Cd 和 Cr 含量的变化幅度均较大,分别为 0.68~5.07 和 43.23~255.00 mg/kg;在 10 个月的连续测定中, Hg 一直未检测出(未在表 2 中列出)。杨凌示范区以涉农企业为主,工业企业不多,尤其是涉及金属行业的企业甚少,所以工业污染源很少。从污泥监测的情况来看,重金属含量均不是很高,这与杨凌

示范区的实际情况相符。各种重金属含量月际变化 变化有关。
无规律可循,这可能与污水中重金属含量的瞬时性

表 1 杨凌污水处理厂污泥中营养成分含量的月际变化

Table 1 Change of the nutrition concentrations by month in sewage sludge of Yang Ling Sewage Treatment Plant

月份 Month	有机质 Matter Organic	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	pH
2	503.47 ±7.97	34.30 ±1.20	3.61 ±0.14	12.20 ±0.58	6.85
3	490.56 ±7.63	27.80 ±0.49	3.49 ±0.10	11.47 ±0.35	6.91
4	438.61 ±9.88	35.42 ±1.55	3.56 ±0.17	9.49 ±0.21	6.94
5	492.77 ±9.31	30.77 ±0.90	3.22 ±0.15	10.67 ±0.51	6.99
6	361.41 ±9.15	33.26 ±0.77	3.11 ±0.13	10.47 ±0.46	6.83
7	390.50 ±4.61	34.63 ±0.67	7.48 ±0.29	8.77 ±0.34	6.78
8	529.38 ±8.74	20.13 ±0.88	6.92 ±0.33	12.04 ±0.56	6.85
9	478.18 ±5.66	20.18 ±0.64	6.46 ±0.17	11.92 ±0.54	7.01
10	425.33 ±13.34	30.17 ±0.74	7.07 ±0.20	10.49 ±0.45	6.99
11	443.34 ±7.66	33.38 ±1.04	7.00 ±0.33	10.26 ±0.42	6.96

表 2 杨凌污水处理厂污泥中重金属含量的月际变化

Table 2 Change of the heavy metals , concentrations by month in sewage sludge of Yang Ling Sewage Treatment Plant

月份 Month	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	Cr	As
2	313.73 ±6.41	149.09 ±4.26	24.61 ±0.95	43.24 ±1.54	1.30 ±0.03	90.67 ±3.00	11.93 ±0.54
3	297.42 ±4.35	136.94 ±5.23	22.86 ±0.70	52.23 ±1.23	5.07 ±0.16	100.30 ±2.28	13.68 ±0.56
4	303.44 ±4.54	124.37 ±3.32	24.06 ±0.64	29.53 ±1.34	0.80 ±0.01	56.57 ±1.60	11.41 ±0.49
5	305.20 ±7.27	140.62 ±5.11	27.10 ±1.02	49.28 ±1.51	1.08 ±0.04	43.23 ±1.92	11.14 ±0.32
6	299.57 ±3.37	143.44 ±6.10	27.10 ±0.91	50.80 ±1.03	1.21 ±0.05	84.19 ±2.59	6.02 ±0.16
7	307.52 ±8.85	200.66 ±8.21	32.32 ±1.49	47.79 ±1.50	0.87 ±0.02	255.00 ±6.08	15.97 ±0.39
8	306.49 ±9.53	197.20 ±2.82	38.03 ±1.32	65.83 ±2.19	0.82 ±0.03	157.07 ±3.77	11.36 ±0.29
9	306.76 ±8.41	150.84 ±3.91	32.52 ±0.73	76.16 ±3.44	0.85 ±0.03	135.60 ±5.77	8.82 ±0.19
10	307.14 ±9.88	173.77 ±6.47	32.08 ±1.51	59.28 ±2.37	0.68 ±0.02	129.11 ±4.99	11.70 ±0.36
11	307.86 ±9.91	165.89 ±5.55	28.33 ±0.81	48.69 ±1.54	0.91 ±0.04	116.65 ±3.36	6.50 ±0.28

2.3 杨凌污水处理厂污泥中重金属有效态含量的月际变化

环境科学研究表明^[19],土壤中重金属的迁移性和植物毒性主要取决于重金属的形态分布,而不仅

仅是其总量。因此,研究重金属形态分布可以得到更多的重金属的迁移性和植物毒性信息。本研究对污泥样的重金属有效态含量进行了测定,结果如表 3 所示。

表 3 杨凌污水处理厂污泥中重金属有效态含量的月际变化

Table 3 Change of the heavy metals , available contents by month in sewage sludge of Yang Ling Sewage Treatment Plant

月份 Month	Zn/(mg · kg ⁻¹)	Cu/(mg · kg ⁻¹)	Ni/(mg · kg ⁻¹)	Pb/(mg · kg ⁻¹)	Cd/(mg · kg ⁻¹)	As/(μg · kg ⁻¹)
2	11.39 ±0.43	16.59 ±0.68	7.41 ±0.28	6.56 ±0.16	0.30 ±0.013	0.16 ±0.005
3	18.92 ±0.83	2.70 ±0.09	6.10 ±0.29	6.07 ±0.15	0.25 ±0.009	0.13 ±0.003
4	15.20 ±0.54	2.85 ±0.07	5.55 ±0.18	5.94 ±0.18	0.25 ±0.008	0.14 ±0.007
5	18.48 ±0.72	1.39 ±0.03	5.79 ±0.16	6.38 ±0.19	0.28 ±0.006	1.02 ±0.047
6	12.39 ±0.34	2.16 ±0.06	8.00 ±0.17	6.73 ±0.28	0.36 ±0.012	0.24 ±0.011
7	23.98 ±0.89	1.56 ±0.04	7.37 ±0.14	2.95 ±0.13	0.15 ±0.004	0.02 ±0.001
8	6.17 ±0.15	24.35 ±1.08	6.56 ±0.26	6.99 ±0.34	0.42 ±0.018	1.28 ±0.056
9	6.38 ±0.18	25.21 ±1.05	6.55 ±0.23	7.23 ±0.28	0.27 ±0.011	1.41 ±0.067
10	25.65 ±1.15	1.96 ±0.07	7.35 ±0.18	2.55 ±0.12	0.06 ±0.002	0.13 ±0.003
11	29.85 ±1.35	0.81 ±0.03	7.21 ±0.28	1.46 ±0.06	0.02 ±0.001	0.15 ±0.007

由表 2 和表 3 可知,污泥中重金属全量与其有效态含量变化不一致。经相关分析表明,污泥中重

金属有效态含量与其全量均无明显的相关性。影响城市污泥农用的一个重要因素是重金属的形态及其

生物有效性。重金属在城市污泥中的存在形态较多,只有部分重金属能被植物吸收,其余被固定在城市污泥和土壤中。在评价城市污泥中重金属的环境影响时,主要考虑其有效态的含量^[19]。

一般来讲,重金属的生物有效性越大,则相对容

易被作物吸收,其活性也就越大,则其对生物的毒性也较大,就需要采取一定措施来降低重金属的环境风险。一般用重金属的活性系数来衡量其生物有效性的高低。杨凌污水处理厂污泥中重金属的活性系数见表 4。

表 4 杨凌污水处理厂污泥中重金属的活性系数

Table 4 Activity coefficients of heavy metals in sewage sludge of Yang Ling Sewage Treatment Plant

月份 Month	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	As
2	3.63	11.13	30.11	15.17	22.98	0.0014
3	6.36	1.97	26.68	11.62	4.89	0.0010
4	5.01	2.29	23.07	20.11	30.86	0.0012
5	6.06	0.99	21.36	12.94	26.01	0.0092
6	4.14	1.51	29.50	13.25	29.49	0.0041
7	7.80	0.78	22.80	6.18	17.03	0.0002
8	2.01	12.35	17.24	10.62	51.61	0.0110
9	2.08	16.71	20.15	9.49	31.41	0.0160
10	8.35	1.13	22.92	4.30	8.80	0.0012
11	9.70	0.48	25.46	3.00	2.55	0.0024

从表 4 可以看出,在 2~11 月,Ni 的活性系数均较大,平均值为 23.93%;Cd 和 Pb 的活性系数也较大,平均值分别为 22.56%和 10.67%,其中 Cd 的活性系数变化幅度比较大,为 2.55%~51.61%,这可能与污水中重金属含量的瞬时性变化有关;Zn 和 Cu 的活性系数平均值分别为 5.51%和 4.93%,其中 Zn 的活性系数变化幅度不大,Cu 的活性系数变化幅度相对较大。As 的活性系数最小,平均值为 0.0048%,而且变化幅度较小。这说明污泥中重金属 Cd、Ni、Pb 的生物有效性大,易被作物吸收产生危害,Cu、Zn 的生物有效性较小,较难被作物吸收,相对而言毒性较小。由此可知,污泥中重金属生物有效性由大到小顺序依次为: Ni > Cd > Pb > Zn > Cu > As。

3 杨凌污水处理厂污泥土地利用的可能性

由表 1 可知,杨凌污水处理厂污泥中有机质含

量为 361.41~529.38 g/kg;全氮含量为 20.13~35.42 g/kg,全磷含量为 3.11~7.48 g/kg,全钾含量为 8.77~12.20 g/kg。而我国耕地土壤有机质含量以东北黑土最高(40~50 g/kg),其他地方土壤有机质均低于东北黑土,一般全氮含量为 10~30 g/kg,全磷含量为 0.45~0.85 g/kg,全钾含量在 16.6 g/kg 左右^[20]。与土壤相比,杨凌污水处理厂污泥总体呈高有机质,高氮、磷,低钾的特征,其营养成分含量优于一般的有机肥料,是一种经济有效的肥料资源,开发利用价值较高。

然而,影响污泥农用的主要限制因素是重金属的毒害问题。因此,评价污泥能否农用的主要标准是污泥中重金属的允许含量。控制城市污泥农用的环境污染问题,最基本的途径就是确定其环境容量。土壤对城市污泥的最大环境容量通常以控制城市污泥和土壤中重金属浓度或累积量来制定的。

不同国家和地区的城市污泥土地利用重金属控制标准见表 5。

表 5 不同国家和地区的城市污泥土地利用重金属控制标准^[19]

Table 5 Heavy metal limits for land application in different countries and areas

标准 Standard	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb	Hg	As	
欧盟标准 EU standard	1 750	4 000	40	400	1 000	1 200	25	-	
法国标准 France standard	1 000	3 000	15	200	1 000	800	10	-	
德国标准 Germany standard	800	2 500	10	200	900	900	8	-	
瑞典标准 Sweden standard	600	800	2	507	100	100	2.5	-	
中国标准(GB4284-84) Chinese standard	土壤 pH 6.5 Soil pH 6.5	500	1 000	20	200	1 000	1 000	15	75
	土壤 pH < 6.5 Soil pH < 6.5	250	500	5	100	600	300	5	75

由表 5 可知,用我国标准 GB4284-84 来衡量,杨凌污水处理厂污泥中重金属的含量均较低,均未

超过农用控制标准;与欧盟、德国和法国标准相比,本研究监测污泥中的几种重金属含量均未超标,在

农田上施用该污泥不会造成土壤和粮食污染。以重金属含量的平均值进行比较,即使是含量最高的 Zn (305.51 mg/kg) 也远低于欧盟、瑞典、德国和法国标准。本研究中,杨凌污水处理厂污泥中容易超标的 Zn、Cu、Cd 和 Pb 的含量分别比我国标准低 69.45%、68.34%、93.20%和 94.77%;比欧盟标准低 92.36%、90.96%、96.60%和 95.64%;比法国标准低 89.82%、84.17%、90.93%和 93.47%;比德国标准低 87.78%、80.22%、86.40%和 94.19%;比瑞典标准低 61.81%、73.62%、32.00%和 47.72%。与瑞典标准相比,杨凌污水处理厂污泥中 Cr 含量超标,超标率为 16.84%;但是对 Cr 而言,在 pH > 4.5 的条件下,主要以三价的难溶性化合物形态存在,其有效性和毒性均较小^[21]。

由表 5 还可知,我国农用城市污泥施用标准与

同类标准相比较。杨凌污水处理厂污泥中的重金属含量均未超过我国标准,所以在土壤 pH 值较高的黄土地区可以在农田上施用。从长远的角度来看,在施用前应对污泥进行一些处理,将其对环境的污染程度降到最低。

由于我国目前尚无污泥农用环境容量的标准,暂以美国污泥土地利用环境容量标准为依据,对杨凌污水处理厂污泥农用年限进行估算。由表 6 可知,如果按 1 hm² 土地施 15 t 干污泥计算,发现 Pb 首先达到控制标准,Pb 有效态含量的平均值为 5.29 mg/kg,施用该污泥 189 年以后可达到表 6 中 Pb 的单位土地面积控制标准,在 3 781 年后达到表 6 中 Pb 的土壤中最大累积量。如果在施用前能对该污泥进行一定的处理,使污泥中重金属有效态含量降低,那么该污泥的施用年限还可以再延长。

表 6 美国城市污泥土地利用重金属控制标准^[22]

Table 6 Heavy metal limits of US in sewage sludge for land application

重金属 Heavy metal	土壤中最大累积量/(kg·hm ⁻²) Maximum accumulation content in soil	单位土地面积控制标准/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹) Control standard of unit land area	最高浓度控制标准/(mg·kg ⁻¹) Control standard of the highest concentration	“优质”城市污泥的控制标准/(mg·kg ⁻¹) Control standard of the “high quality” sewage sludge
As	41	2	75	41
Cd	39	2	85	39
Cu	1 500	75	4 300	1 500
Pb	300	15	840	300
Hg	17	0.85	57	17
Ni	420	21	420	420
Zn	2 800	140	7 500	2 800

1994~2001 年我国城市污泥中 Zn、Cu、Ni、Cd、Pb 和 Cr 含量的平均值分别为:1 450, 486, 77.5, 2.97, 131 和 185 mg/kg^[18]。本研究的污泥中 Hg 未检测出,As 含量也很低,Zn、Cu、Ni、Cd、Pb 和 Cr 含量的平均值分别为:305.51, 158.28, 28.90, 1.36, 52.28 和 116.84 mg/kg,这几种重金属含量的平均值比我国 1994~2001 年城市污泥中重金属含量分别低 78.93%、67.43%、62.71%、54.21%、60.09%和 36.84%。另外,本研究所检测的这几种重金属含量(表 2)用《美国城市污泥土地利用重金属控制标准》来衡量^[22],也达到了“优质”城市污泥的控制标准。对于已达“优质”的城市污泥,只要施用城市污泥时所带入的重金属量不超过每年限制的量,就能直接在土地上施用。

4 结 论

由本研究结果可知,杨凌污水处理厂污泥中含有丰富的有机质、N、P、及适量的 Cu、Zn 等作物必需的营养元素,具有较高的肥力及农用价值;污泥中

Zn、Cu、Ni、Cr 及毒性较大的 Cd、As 和 Pb 的含量均较低,Hg 含量未检测出;测定的重金属含量均在农用控制标准之内,在本地区农田可作肥料施用;污泥中重金属的生物活性由大到小的顺序依次为 Ni > Cd > Pb > Zn > Cu > As。在农田上施用该污泥时,为了慎重起见必须对施用量、施用方法、作物种类等进行试验,积累资料后方可进行推广。

[参考文献]

- [1] 张增强,薛澄泽.城市污水污泥的堆肥化与资源化[J].环境保护,1997(7):12-15.
- [2] 仇保兴.加强城市污水和垃圾处理工作促进城市可持续发展[C].建设部和国家环保总局.全国城市污水和垃圾处理与环境基础建设工作会议.杭州:[s.n].2002:23-25.
- [3] 马利民,陈玲,吕彦,等.污泥土地利用对土壤中重金属形态的影响[J].生态环境,2004,13(2):151-153.
- [4] Alonso A E, Callejon M M, Jimenez S J C, et al. Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants [J]. Chemosphere, 2002, 47:765-775.
- [5] Jimenex E I, Garcia V P. Relationship between carbon and total organic matter in municipal solid waste and city refuse compost

- [J]. Bioresource Technology, 1992, 41: 209-223.
- [6] 中华人民共和国农牧渔业部. GB7173 - 87. 土壤全氮测定法(半微量凯氏法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 140-142.
- [7] 全国农业分析标准化技术委员会. GB9837 - 88. 土壤全磷测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 13-15.
- [8] 全国农业分析标准化技术委员会. GB9836 - 88. 土壤全钾测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 8-12.
- [9] Wang J Y, Zhang D S, Stabnikova O, et al. Evaluation of electrokinetic removal of heavy metals from sewage sludge [J]. Journal of Hazardous Materials B, 2005, 124: 139-146.
- [10] 孙颖, 陈玲, 赵建夫, 等. 测定城市生活污水中重金属的酸消解方法研究[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(3): 170-172.
- [11] 国家环境保护局科技标准司. GB/T 17140 - 1997. 土壤质量铅、镉的测定 KF-MIBK 萃取火焰原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 174-177.
- [12] 国家环境保护局科技标准司. GB/T 17136 - 1997. 土壤质量总汞的测定 冷原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 157-161.
- [13] 建设部标定额研究所. CJ/T 97 - 1999. 城市生活垃圾 总铬的测定 二苯碳酰二肼比色法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 210-213.
- [14] 国家环境保护局科技标准司. GB/T 17134 - 1997. 土壤质量总砷的测定 二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 148-151.
- [15] 李永涛, 刘科学, 张池, 等. 广州大宝山地区重金属污染水田土壤的 Cu、Pb、Zn、Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1110-1114.
- [16] 贺建群, 许嘉琳, 杨居荣, 等. 土壤中有效态 Cd、Cu、Zn、Pb 提取剂的选择[J]. 农业环境保护, 1994, 13(6): 246-251.
- [17] Fuentes A, Llorens M, Saez J, et al. Simple and sequential extractions of heavy metals from different sewage sludges[J]. Chemosphere, 2004, 54: 1039-1047.
- [18] 李发生, 韩梅, 熊代群, 等. 不同浸提剂对几种典型土壤中重金属有效态的浸提效率研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 704-706.
- [19] 陈同斌, 黄起飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2003, 23(5): 561-568.
- [20] 鲍士旦, 江荣风, 杨朝光, 等. 土壤农化分析: 第 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [21] 肖玲, 王秀琴. 西安市污水处理厂污泥成分月际变化及其农业利用问题探讨[J]. 环境杂志, 1993, 9(2): 36-39.
- [22] Harrison E Z. Land application of sewage sludge: an appraisal of the US regulations[J]. Environment and Pollution, 1999, 11(1): 4.

(上接第 214 页)

- [12] 杨述河, 闫海利, 郭丽英. 北方农牧交错带土地利用变化及其生态环境效应——以陕北榆林市为例[J]. 地理科学进展, 2004, 23(6): 49-55.
- [13] 王永军, 李团胜, 刘康. 榆林地区景观格局分析及其破碎化评价[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 161-166.
- [14] 高小红, 王一谋, 杨国靖. 基于 RS 与 GIS 的榆林地区景观格局动态变化研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 168-172.
- [15] 党安荣, 王晓栋, 陈晓峰, 等. ERDAS IMAGINE 遥感图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [16] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(2): 1031-1040.
- [17] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 近 10 年来长江下游土地利用变化及其生态环境效应[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 659-667.
- [18] 樊红, 詹小国. ARC/INFO 应用与开发技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [19] 张明. 区域土地利用结构及其驱动因子的统计分析[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 381-384.
- [20] 张华, 张勃, 石惠春. 干旱区土地利用/土地覆盖变化研究——以黑河流域为例[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 49-54.
- [21] Petit C, Scudder T, Lambin E. Quantify in processes of land cover change by remote sensing: resettlement and rapid land cover changes in south-eastern Zambia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(7): 3435-3456.