

131 %、3500 %、587 % ,比美国低 52 %、44 %、8 %、39 % . 因此 ,发达国家所强调的城市污泥农用的重金属污染问题 ,在我国并不会像人们想像的那样可怕 .

2 不同时期城市污泥中重金属含量的变化

社会公众一直都担心城市污泥中会含有大量重金属 ,因此把重金属问题看作是限制其农用的主要障碍 . 近年来 ,我国环境污染管理制度和法规得到完善与实施 ,污水达标排放率不断提高 ,因此 ,城市污水中 Hg、Cd、As、Pb 等毒性较大的重金属含量逐年下降 (表 3) . 因为污水是城市污泥重金属的主要来源 ,也就使得城市污泥中的重金属含量呈现下降趋势 (表 4) ,这将会降低城市污泥土地利用的环境风险 .

20 世纪 70 年代 ,北京高碑店污水处理厂的污泥重金属含量普遍很高 ,重金属 Hg 的

表 3 中国某污水处理厂进水重金属检测结果¹⁾

Table 3 The heavy metal concentrations in input water of a sewage treatment plant

年代	重金属 ,mg/L						
	Hg	Cd	Cr	As	Pb	Cu	Zn
1987	0.007	0.0036	0.215	0.0243	0.0749	0.042	0.160
1988	0.0025	0.0065	0.010	0.0217	0.0340	0.060	0.197
1989	0.004	0.0007	0.200	0.0180	0.0428	0.061	0.162

1) 数据引自《〈城镇污水处理厂污染物排放标准(报批稿)〉编制说明》,国家环境保护总局,2002年5月

表 4 中国城市污泥重金属含量变化^[13,24,34,42,43]

Table 4 Change of heavy metal concentrations in sewage sludges of China

污水处理厂	年代	重金属 ,mg/kg						
		Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	Cr	As
北京 高碑店	1977	8.3	100	52	372	703	207	8.25
	1995	2.8	43.1	6.34	112	369	97.8	—
	年均降幅, %	3.7	3.2	4.9	3.9	2.7	2.9	—
天津 纪庄子	1988	6.8	351	10.6	624	1369	996	17.9
	1999	5.0	—	8.5	486	1335	565	13.7
	年均降幅, %	1.4	—	1.1	1.2	0.1	2.4	1.3

表 5 英国、美国、加拿大不同时期城市污泥中重金属含量

Table 5 Heavy metal concentrations in sewage sludges of UK, US and Canada

	年代	重金属 ,mg/kg						
		Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	Cr	Ni
英国	1982/1983	9	418	3	625	1205	124	59
	1990/1991	3.2	217	3.2	473	889	86	37
	年均降幅, %	8	6	-0.8	3	3.3	3.9	4.6
美国	1983	10	500	6	800	1700	500	—
	1988	4	76	2	456	755	39	—
	年均降幅, %	12	17	13	8.6	11	18	—
加拿大	1981	35	545	—	870	1390	1040	—
	1994	6.3	124	3.5	638	823	319	—
	年均降幅, %	6.3	5.9	—	2.1	3.2	5.3	—

含量更是超过现行国家标准 3 倍有余 (表 4) . 到 1995 年 ,该城市污泥中 Cd 下降 66 % ,Pb 下降 57 % , Hg 下降 88 % ,Cu 下降 70 % ,Zn 下降 48 % ,Cr 下降 53 % ,所有的重金属含量都以每年 2.7—4.9 % 的幅度下降 . 天津纪庄子污水处理厂的污泥重金属含量 ,在 1988—1999 年期间每年的下降幅度在 0.1 %—2.4 % 左右 .

我们从英美等国大量统计数据中也发现 ,随着社会、经济的发展和科技水平的提高 ,城市污泥中的重金属含量逐渐降低是一个普遍趋势 (表 5)^[44,45] . 英国和加拿大城市污泥中的重金属以 Cd、Pb 的下降幅度最大 ,年平均下降幅度在 6 %—8 % . 美国城市污泥则以 Cr、Pb 下降幅度最大 ,每年平均下降 17 %—18 % . 分析挪威 Bekkelaget 污水处理厂 15—20 年的资料发现 ,重金属的含量表现出明显的下降趋势 (图 2) . 其主要原因 2 个方面 :控制工业污水的排放、清洁技术的应用^[46] . 来自欧盟官方网站 (<http://europa.eu.int>) 的最新统计数据也支持这一观点 :在过去 20 年间 ,欧洲主要污水处理厂城市污泥中的

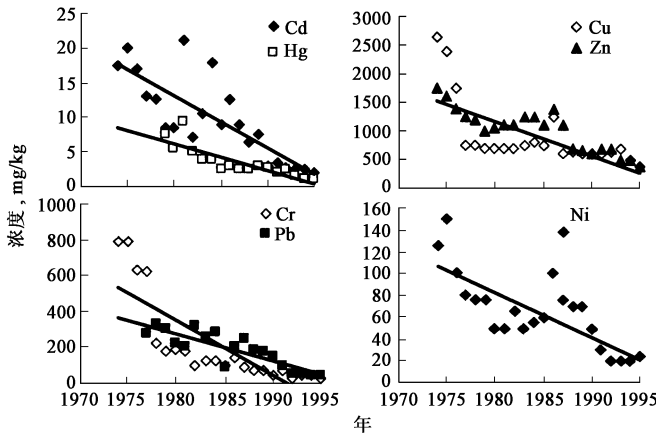


图2 挪威 Bekkelaget 污水处理厂城市污泥中重金属含量的变化趋势
 Fig. 2 Heavy metal concentrations in sewage sludge from Bekkelaget Wastewater Treatment Plant of Norway

重金属含量普遍下降. 图 3 中 Zn 和 Cd 含量的变化情况清楚地反映了这种趋势.

以上分析表明,我国城市污泥的重金属含量普遍低于英美发达国家,而且还将呈现逐渐下降的趋势. 因此,我国城市污泥在进行土地利用时重金属环境风险并不像人们想像的那样严重,近年来的相关研究也证明:合理进行城市污泥农用并不会造成土壤和农产品的重金属污染问题^[5,47].

3 城市污泥中重金属的形态及其生物有效性

影响城市污泥农用的另一个重要因素是重金属的形态及其生物有效性. 重金属在城市污泥和土壤中的存在形态较多,只有一部分能被植物吸收,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影响时,应主要考虑其有效态的含量.

试验发现,施用城市污泥后,重金属中相当部分以与有机物结合的形态存在,但不同重金属略有不同: Cd 往往以活性高的交换态和松结合有机态存在,而 Pb 的这两种形态所占比例最小. 由于交换态最易被植物吸收利用,其次为松结合有机态,其他形态往往活性较低,因此从不同重金属元素的形态角度分析,城市污泥中 Cd、Zn 活性最高, Pb 活性最低, Cu 居中^[37]. 最近的研究结果也证明了这一观点^[48].

一般而言,重金属的有效性大,则相对容易被作物吸收. 以活性相对较强的 Zn 为例,研究了连续施用城市污泥 2 年后作物体内重金属的含量. 结果发现,叶菜类蔬菜富集重金属能力较强,果实类蔬菜和粮食作物施用城市污泥则相对安全. 重金属进入植物体内主要分布在根系,其次才是茎叶,果实或籽粒内含量往往最低^[37]. 国内外已有学者用石灰来钝化城市污泥中的重金属,降低有效态重金属的含量^[49]. 在城市污泥的实际运用中,如果有效态重金属含量较高,就需要采取一定措施来降低重金属的环境风险.

由于重金属污染物的环境风险与其形态有关,因此制定国家标准时如果能够考虑重金属的形态则更加科学. 因此,在制定城市污泥土地利用标准时,如果条件成熟则可同时采用总量

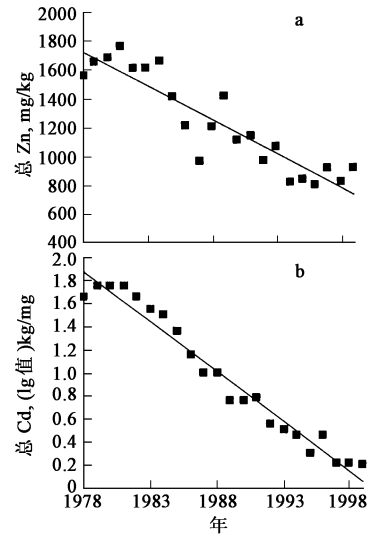


图3 英国诺丁汉污水处理厂城市污泥中 Zn 和 Cd 含量的变化 (Cd 的含量经过对数转换)

Fig. 3 Reduction in (a) Zn and (b) Cd concentration (log10 transformed data for Cd) in sewage sludge from Nottingham WWTP during 1978—1999

和有效态 2 个方面的指标.但是,鉴于目前我国各地重金属检测的设备条件和分析水平差异较大,一些地区并不具备测定重金属形态的条件,同时目前对城市污泥中的重金属有效性问题的认识也存在较大局限,因此从管理的角度出发,在城市污泥土地利用的标准中可以暂时不考虑重金属的形态.

4 制定、完善和执行城市污泥中重金属的控制标准

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是以控制城市污泥和土壤中重金属浓度或累积量来制定的.美国城市污泥土地利用的历史较长,1983 年制订了城市污泥处置与利用条例(40 CFR Part 503).1993 年 2 月再度修订.新修订的城市污泥土地利用条例中(表 6),根据城市污泥重金属浓度的高低和生态风险评价结果将城市污泥分成两种类型:一种是所谓清洁城市污泥或“优质”城市污泥,另一种是满足重金属浓度控制标准的城市污泥(表 6).对满足“优质”要求的城市污泥,只要施用城市污泥时所带入的重金属不超过每年的限制量,就能直接在土地上施用.若其重金属含量高于“优质”城市污泥的标准,但不超过最高浓度控制标准也能在土地上施用,但必须同时满足 2 个条件:一是重金属进入农地的总量不超过限制标准;二是重金属年进入量不能超过每年单位土地面积的污染物控制标准.此外,新修订的标准还根据城市污泥病原物含量高低将城市污泥划分为 A 与 B 2 类,A 类指粪大肠菌低于 100 个/g(干重)的城市污泥,B 类指粪大肠菌低于 2×10^6 个/g(干重)的城市污泥.A 类城市污泥可施用在种植有食物链作物的土地上,而 B 类城市污泥的应用则有许多具体的规定.不满足最高重金属浓度控制标准的城市污泥不得在土地上施用,必须采取其他措施如焚烧、卫生填埋等处置.

表 6 美国城市污泥土地利用重金属控制标准(USEPA,2002)

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

重 金 属	土壤中最 大积累量, kg/hm ²	单位土地面积 的控制标准, kg/(hm ² a)	最高浓度 控制标准, mg/kg	“优质”城市污泥 控制标准, mg/kg
As	41	2.0	75	41
Cd	39	2.0	85	39
Cu	1500	75	4300	1500
Pb	300	15	840	300
Hg	17	0.85	57	17
Mb	—	—	75	—
Ni	420	21	420	420
Se	100	5.0	100	100
Zn	2800	140	7500	2800

欧盟也于 1986 年制订了城市污泥重金属控制标准、农田土壤重金属最大允许量以及城市污泥中重金属在农田中的最大投入量等,其标准要比美国的严格一些^[50].

我国 1984 年颁布的《农用污泥污染物控制标准》(GB4284-84),对于控制滥用城市污泥曾起到一定的指导作用.但是,从目前来看,该标准存在许多问题:

(1) 对重金属浓度的控制过于严格.由于当时的城市污泥产生量很少,相关的研究工作积累非常薄弱,重金属

元素限制浓度的标准值并不是针对我国的具体情况经过试验得出,而是参考国外标准制定的^[51].这显然不能很好地适合我国的土壤、作物、气候等基本国情,而且各种重金属浓度的控制标准值都引用发达国家中最低的标准值.因此,我国污泥农用的重金属控制标准几乎是世界上同类标准中最严的(表 6、表 7).当时,发达国家也只是刚刚颁布或正在制定相关的城市污泥土地利用标准,而我国在缺乏足够科学积累的前提下仓促制定《农用污泥污染物控制标准》(GB4284-84),显然会碰到许多实际问题.按照这一标准,我国相当多的城市污泥不能进行土地

利用.实际上,在不造成环境污染的前提下,只要不超过城市污泥土地利用的环境容量,应该鼓励城市污泥的土地利用.最近,在污水处理行业已经将“城市污泥(sewage sludge)”改称为“生物固体(biosolid)”,而且这一名称已不断得到不同行业的广泛接受.即使在美国国家环保局(USEPA)的正式刊物中也将“sewage sludge”改称为“biosolid”,以避免长期以来人们对 sewage sludge(城市污泥)的坏印象,推动城市污泥的土地利用.

(2)对 Zn 等元素的限制标准不符合我国的国情.根据对现有资料的统计分析,55%的城市污泥样本 Zn 含量超标(表 1),如果严格执行 GB4284-84 国家标准,这些城市污泥都不能进行土地利用,只能采取填埋或焚烧等其他处置方式.实际上,从我国的国情考虑,这是一个相当大的资源浪费.根据第二次全国土壤普查的资料,我国有 0.49 亿 hm^2 耕地缺锌,占耕地总面积的 51.1%^[52].有关研究者在

表 7 欧洲及中国的城市污泥土地利用重金属控制标准

Table 7 The heavy metal limits for land application of Europe and China

	重金属,mg/kg							
	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb	Hg	As
欧盟标准 ¹⁾	1750	4000	40	400	1000	1200	25	—
德国标准	1000	3000	15	200	1000	800	10	—
法国标准	800	2500	10	200	900	900	8	—
瑞典标准	600	800	2	50	100	100	2.5	—
中国标准 GB4284-84								
Soil pH 6.5	500	1000	20	200	1000	1000	15	75
Soil pH < 6.5	250	500	5	100	600	300	5	75
中国 2002 年新标准 ²⁾								
Soil pH 6.5	1500	3000	20	200	1000	1000	15	75
Soil pH < 6.5	800	2000	5	100	600	300	5	75

1) 欧盟官方网站 2002 年数据,http://europa.eu.int

2) 《处理厂污染物排放标准(报批稿)》,国家环境保护总局,2002 年 5 月.

1998 年对深圳 988 名 1—7 岁儿童头发中的锌含量进行了调查,结果表明男性儿童缺锌占男性调查儿童的 78.9%,女性儿童缺锌占女性调查儿童的 75.6%^[53],说明我国儿童缺锌现象相当普遍.一方面是我国有一半以上的耕地缺锌,需要在农业生产中广泛地使用锌肥、在各种食品中添加锌,另一方面却又制定比美国和欧盟还要严格的标准来限制城市污泥中的锌含量.这是一个非常明显的错误,而且从公平的角度考虑也很不合理.显然,我国农用城市污泥施用标准中的 Zn 含量的标准过于严格.

国内城市污水处理行业的有关人士已经注意到我国问题,在新报批的《城镇污水处理厂污染物排放标准(报批稿)》中顺便将城市污泥农用的重金属限制标准进行了修改.在这一修改的标准中,Zn 的限制标准提高到 3000 mg/kg(pH 6.5 的土壤).按照这个标准,现有样本中 Zn 的超标率仅为 9%.但是,这只是一个控制城镇污水处理厂的污染物排放的标准,而不是针对城市污泥农用所制定的标准,因此该标准对城市污泥土地利用(不仅仅只是狭义的“农用”)中的许多问题并没有细化.

(3) 当城市污泥用于园林绿化地、废弃地改良时尚缺乏重金属等污染物控制标准.参照美国现行标准的制定方法,对于农牧地和园林绿化地、废弃改良地,应该制定出相应细化的标准,不宜将一套标准应用于所有情况.

(4) 有关病原污染物控制标准没有加以考虑.为使城市污泥土地利用更加安全,应尽快继续完善和制定城市污泥和城市污泥施用地中病原污染物的控制标准.

(5) 我国现行的控制标准只对污泥农用的污染物浓度作了限制,但对污泥施用地中最多能容纳多少污染物却没有明确的规定.即使城市污泥的重金属浓度没有超过其控制标准,如果

长期过量施用也可能会对土壤性质和生态环境造成一定危害。

《农用城市污泥中污染物控制标准》的制定距今已近 20 年。20 世纪 80 年代初期,全国的污水处理行业还不发达,标准的作用还显得不很突出。现在,我国每年有几百万 t 的城市污泥产生^[54],城市污泥的处理处置问题已经成为城市污水处理行业的“瓶颈”,因此亟待制定一整套规范、可行的标准来管理和指导城市污泥的土地利用。美国国家环保局的数据表明,1998 年城市污泥堆肥和土地利用已高达城市污泥产生量的 53%,2010 年将上升到 70%^[55]。从美国的发展情况来看,土地利用无疑是解决城市污泥问题的一种重要方式。因此,根据我国的实际情况,城市污泥经过无害化处理后进行土地利用也是适合我国国情的一个重要途径。但是,到目前为止,城市污泥中的许多污染物的含量、形态及其在土壤中的行为等科学问题均需要开展更加系统、深入的田间试验研究。

综上所述,现行的《农用城市污泥中污染物控制标准》有许多不尽合理的地方,特别是在重金属、病原菌的控制标准等方面都需要尽快完善。因此,相关职能部门应尽快组织力量制定新的标准,在控制城市污泥土地利用环境风险的同时,积极推动我国城市污泥的资源化利用。

参考文献:

- [1] 中国环境年鉴编辑委员会. 2001 中国环境年鉴[M]. 北京:中国环境年鉴社, 2002
- [2] Edward S R, Cliff I D. 工程与环境引论[M]. 北京:清华大学出版社, 2002
- [3] 陈同斌, 李艳霞, 金 燕, 等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 643—648
- [4] 李艳霞, 赵 莉, 陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草成长的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 797—801
- [5] 赵莉, 李艳霞, 陈同斌, 等. 城市污泥堆肥在冷季型草皮专用复合肥生产中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(5): 501—503, 506
- [6] 周立祥, 胡霏堂, 戈乃玢. 城市生活污泥中锌及病原体对作物及土壤环境的影响[J]. 农业环境保护, 1994, 13(4): 158—162
- [7] 周立祥, 胡霏堂, 戈乃玢. 苏州市生活污泥成分性质及其对蔬菜和菜地土壤的影响[J]. 南京农业大学学报, 1994, 17(2): 54—59
- [8] 陈怀满, 郑春荣, 王慎强, 等. 不同来源重金属污染的土壤对水稻的影响[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2): 35—40
- [9] 邓晓林, 王国华, 任鹤云. 上海城市污水处理厂的污泥处置途径探讨[J]. 中国给水排水, 2000, 16(5): 19—22
- [10] 戈乃玢, 马淑芳, 秦怀英, 等. 脱水污泥的组分和农用评价[J]. 农业环境保护, 1995, 14(5): 202—206
- [11] 郝以琼, 丁文川. 关于重庆城市污水污泥的处理处置问题[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(6): 1—5
- [12] 解庆林, 王敦球, 李金城, 等. 桂林市污水处理厂污泥农业利用[J]. 广西科学院学报, 2000, 16(3): 131—134
- [13] 冷平生, 李树蓉. 桧柏富集重金属研究初报[J]. 北京农学院学报, 1995, 10(1): 87—92
- [14] 廖宗文, 林东教, 江东荣, 等. 广州市污泥垃圾农用资源化的初步研究[J]. 自然资源学报, 1994, 9(3): 247—252
- [15] 刘善江, 徐建铭, 李国学. 高碑店污泥农用肥效及重金属污染防治[J]. 华北农学报, 1999, 14(1): 118—122
- [16] 卢迎红. 沈阳市北部污水处理厂污泥及恶臭污染现状与防治对策[J]. 环境保护科学, 1999, 25(3): 13—15
- [17] 马 芸, 孟昭福, 高坤瑞, 等. 西安市污水处理厂污泥施用于土壤中的探讨[J]. 农业环境保护, 2000, 19(2): 76—78
- [18] 马志毅, 候红娟, 刘瑞强, 等. 污水厂污泥作吸附剂的试验研究[J]. 中国给水排水, 1997, 13(4): 10—13, 2—3
- [19] 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 等. 论城市污泥农用资源化与可持续发展[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 157—160
- [20] 莫测辉, 吴启堂, 周友平. 城市污泥对作物种子发芽及幼苗生长影响的初步研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(6): 645—649
- [21] 乔 艳, 熊桂云, 李双来. 武汉市城市污泥的组成及对水稻秧苗生长的影响[J]. 湖北农业科学, 1998, 6: 45—46, 54—55
- [22] 苏德纯, 张福锁, Wong J W C. 粉煤灰钝化污泥对土壤理化性质及玉米重金属累积的影响[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 321—325

- [23] 孙升学, 肖玲. 硫化钠对污泥中 Cu、Zn、Ni 有效性的影响[J]. 陕西环境, 1996, 3(2): 32—34
- [24] 田宁宁, 王凯军, 柯建明. 剩余污泥好氧堆肥生产有机复混肥的肥分及效益分析[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(1): 9—11
- [25] 王才, 韩超, 刘喜光, 等. 污泥消化处理试验研究[J]. 给水排水, 1999, 25(6): 17—21
- [26] 王敦球, 解庆林, 李金城, 等. 城市污水污泥的处理及综合利用[J]. 桂林工程院学报, 1999, 19(4): 387—390
- [27] 王惠珍, 张清敏. 污泥处理及有效利用[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(4): 42—44
- [28] 温琰茂, 韦照韬. 广州城市污泥和土壤重金属含量及其有效性研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996, 35 卷(增刊), 217—221
- [29] 吴新民. 生活污水的性质和农业利用可行性研究[J]. 安徽师范大学学报, 1999, 22(4): 359—360, 374
- [30] 许亚, 韩晓梅, 黄众. 昆明市城市污水污泥的肥效及其资源化利用[J]. 云南环境科学, 1999, 18(3): 44—46
- [31] 叶军, 窦春菊, 刘莉. 污水处理厂污泥回用问题初探[J]. 山东环境, 1999, 6: 33
- [32] 张学洪, 李金城, 解庆林, 等. 城市污水污泥有机复合肥水稻施肥试验[J]. 广西科学, 2000, 7(3): 232—234
- [33] 张衍国, 奉华, 邓高峰, 等. 城市污水污泥焚烧过程中的重金属迁移特性[J]. 环境保护, 2000, 12: 35—36
- [34] 赵丽君, 杨意东, 胡振苓. 城市污泥堆肥技术研究[J]. 中国给水排水, 1999, 15(9): 58—60
- [35] 赵明, 陈建美, 蔡葵. 城市污泥农用资源化前景广阔[J]. 山东环境, 2000 年增刊, 115
- [36] 郑纪慈, 俞林火, 景金富. 城市污泥的水稻肥用效果及环境影响的研究[J]. 环境导报, 2000, 4: 39—41
- [37] 周立祥, 胡雷堂, 戈乃玢, 等. 城市污泥土地利用研究[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 185—193
- [38] 周立祥, 占新华, 沈其荣, 等. 热喷处理污泥及其复混肥的养分效率与生物效应[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 95—100
- [39] 周立祥, 张雪英, 占新华, 等. 苏南地区城市污泥的基本性质及农业利用效果问题与对策[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22 卷增刊, 91—96
- [40] 周志宇, 付华, 张洪荣, 等. 施用污泥对无芒雀麦生育的影响[J]. 草地学报, 2000, 8(2): 144—150
- [41] McGrath S P. Metal concentrations in sludges and soil from a long-term field trial [J]. J Agric Sci, 1994, 103: 25—35
- [42] 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究协作组. 北京东南郊环境污染调查防治途径研究(报告集)[C]. 1980, 北京: 中国科学院地理研究所
- [43] 李应学, 曹仁林, 周毅, 等. 天津市农用污泥和土壤有害物质安全控制标准的研究[J]. 农业环境保护, 1988, 7(1): 12—18
- [44] Consultants in Environmental Sciences. Limited UK Sewage Sludge Survey, Final Report [M]. London: Consultants in Environmental Sciences Ltd. 1993
- [45] Webber M D, Nichols J A. Organic and metal contaminants in Canadian municipal sludges and sludge compost [M]. Burlington: Wastewater Technology Centre. 1995
- [46] Bjarne P, Kjell T N W. Strategy for land application of sewage sludge in Norway [J]. Sci Tech, 1997, 36(11): 283—290
- [47] 金燕, 李艳霞, 陈同斌, 等. 污泥及其复合肥对蔬菜产量及重金属积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 288—291
- [48] Monday O, Michael L, Thompson J S C, et al. Distribution and movement of sludge-derived trace metals in selected Nigerian soils [J]. J Environ Qual, 2001, 30(3): 1667—1674
- [49] Fang M, Wong J W C. Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting [J]. Environ Pollut, 1999, 106(1): 83—89
- [50] McGrath S P, Chang A C, Page A L, et al. Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States [J]. Environ Rev, 1994, 2(1): 91—107
- [51] 杨景辉. 土壤污染与防治[M]. 北京: 科学出版社. 1995
- [52] 唐近春. 全国土地资源保护和利用的概况与对策[A]. 见: 中国土壤学会编, 中国土壤学在前进: 中国土壤学会成立 50 周年纪念[C]. 北京: 中国科学技术出版社. 1995
- [53] 韦创建, 孔励敏, 薛红. 深圳市儿童发锌含量的分析研究[J]. 广东微量元素科学, 1998, 5(8): 44—47
- [54] 张清敏, 陈卫平, 胡国臣, 等. 污泥有效利用研究进展[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1): 58—61
- [55] 李艳霞, 陈同斌, 黄启飞, 等. 中国城市污泥的有机质和养分含量与土地利用. 生态学报(审稿中)