

# 江苏地区城市污水处理厂污泥泥质研究 I

## ——污泥养分特征与供肥潜力

张雪英<sup>1,2</sup>, 周立祥<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境学院, 江苏 南京 210095; 2. 南京工业大学城市建设与安全环境学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:**在 1 年内不同季节对江苏 5 个代表性城市污水处理厂的污泥泥质进行了分析研究。结果表明,脱水污泥 pH 通常呈弱碱性(pH=7.3~8.4),盐分含量普遍较低。采用污水二级处理工艺的污水处理厂污泥含有机质 40%~54%,氮 3%~6%,磷 0.8%~2%,高于采用污水一级处理工艺的污水处理厂的相应含量(有机质、氮、磷含量分别为 14.1%,0.85%和 0.29%);但采用污水一级处理工艺的污水处理厂的污泥钾含量(0.8%)略高于采用污水二级处理工艺的污水处理厂污泥(0.2%~0.4%),但均远低于农家肥。污泥中富含植物生长所必需的多种中微量元素,如 Ca(1%~3%),Fe(1%~2%),有效 S(5%~13%),Mg(3 000~7 300 mg·kg<sup>-1</sup>),Mn(160~650 mg·kg<sup>-1</sup>),B(60~140 mg·kg<sup>-1</sup>),Si(300~700 mg·kg<sup>-1</sup>)等。污泥中 81.1%的 N 和 44.6%的 P 主要以有机形态存在。在污泥有机氮中易矿化氮成分占 83.5%,这与污泥有机氮矿化培养试验结果相吻合。而污泥有机磷则主要以中等活性有机磷形态存在(60.7%)。污泥有机物中水溶性有机物、蛋白质和半纤维素等易降解成分约占 43%;而粗脂肪、纤维素和木质素等相对难降解组分约占 57%。由于污泥含有的大量有机成分,相当部分以易于降解的形态存在,且总养分十分丰富,因此,污泥供肥潜力较大,是一种值得合理利用的肥源。

**关键词:**城市污泥;养分;供肥潜力

**中图分类号:**X703 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2004)01-0110-05

### Components and Characterization of Sewage Sludge I: Contents and forms of nutrients and organic matter

ZHANG Xue-ying<sup>1,2</sup>, ZHOU Li-xiang<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China; 2. College of Urban Construction and Safety & Environmental Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** The composition and characteristics of municipal sewage sludge, obtained from JiangSu Province, were studied to evaluate potential utilization of the treated sewage sludge applied to cropland. The results showed that the sewage sludge from secondary sewage treatment plants were rich in organic matter, N, and P but poor in K. Additionally, the sewage sludge also contained many trace elements, such as Ca, Fe, S, Mg, Mn, Si, that are beneficial nutrients for plants. Water-soluble organic matter, proteins and hemicellulose accounted for 43% of total organic matter in the sewage sludge and over half of organic phosphorus was in moderate active. The mineralized organic N, 84% of sludge organic N, could be mineralized by 20 to 50% of nitrogen in sewage sludge during an incubation period of 4 weeks.

**Keywords:** municipal sewage sludge; composition; nutrients

城市污水处理厂的兴建与运行,是保护水资源和防止水体污染的重要举措。位于长江下游的江苏地区,城市污水处理厂发展十分迅速,已由 1980 年以前的 3 座发展到目前的 25 座,而且新的一批污水处理

厂正在规划或建设之中。然而在污水处理的同时产生的污泥,因无稳定合理的处置出路正越来越成为一个新问题。基于处置费用和废物再生利用的考虑,污泥的土地利用依然是当前国际上污泥处置的最重要途径<sup>[1]</sup>。将污泥应用于林地、园林绿肥地,甚至将污泥制成肥料后用于农地等,我国也有大量研究报道<sup>[2-4]</sup>。

污泥特性尤其是有益和有害物质的含量、存在形态直接影响到污泥的土地利用,并且因地区、季节、污水处理工艺不同,污泥的这些特性又会有明显差异。

收稿日期: 2003-04-02

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2001072);江苏省社会发展基金项目(BS2000009)

作者简介:张雪英(1976—),女,南京农业大学在职博士生,现在南京工业大学工作。

联系人:周立祥,lxzhou@njau.edu.cn

深入了解这些变化和特性对污泥合理土地利用十分重要,为此,本研究选择了 5 个具有一定规模、日常运行良好、并能代表不同污水处理级别和城市发展水平的苏南、苏北部分城市污水处理厂,进行了不同季节污泥采样分析,为指导污泥的合理土地利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥样品的采集

在 1999—2000 年分别对南京江心洲污水处理

厂、苏州新区污水处理厂、无锡芦村污水处理厂、常州城北污水处理厂、徐州奎河污水处理厂(以下简称南京、苏州、无锡、常州、徐州)进行调查,收集污水处理厂实际运行有关资料(见表 1),并于 1999 年 11 月(16~20 日)、2000 年 1 月(11~16 日)、4 月(1~5 日)、7 月(8~14 日)对上述污水处理厂的排出污泥进行取样分析。取样时在污泥脱水传送带出口处每 15 min 取样一次,共收集 4 次,一共约 1.0 kg 左右。污泥混合后,部分 4℃ 冷藏;部分风干后,磨细,贮存备用。

表 1 供试污水处理厂污水污泥处理工艺简介

Table 1 Treatment processes of wastewater and sewage sludge from selected five wastewater treatment plants

地点	处理规模 /万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	处理深度	处理工艺	工业废水 /%	污泥处理		污泥处置
					产生量/t·d <sup>-1</sup>	处理工艺	
苏州	4	二级	三槽式氧化沟	> 50	4.5	重力浓缩压滤	填埋
无锡	一级 20	二级	活性污泥法和 A <sub>2</sub> O 工艺	5	34	消化压滤	填埋
	二级 10						
常州	5	二级	活性污泥法	5	5	消化压滤	外运
徐州	10	二级	活性污泥法	50	25	重力浓缩压滤	外运
南京	26	一级	物理沉淀	—	28.8	消化压滤	填埋

### 1.2 测定方法

污泥化学成分的常规分析参照《土壤农化分析》<sup>[5]</sup>方法进行;污泥有机物的分组采用 Waksman (1930)提出经周立祥修改的方法<sup>[6]</sup>;污泥有机磷的分组采用采用 Bowman 和 Cole(1978)提出的方法;污泥有机氮的分组采用 Brenner(1983)提出的方法。

### 1.3 污泥有机氮矿化试验

采用嫌气培养的方法:称取 20.0 g(过 20 目)黄棕壤,分别加入 5 个污水处理厂污泥样品(过 20 目)0.60 g,充分混匀后装入 200 mL 塑料瓶中,然后加入去离子水 50 mL,用塑料薄膜封口,并戳几个小孔以便通气,放入恒温培养箱中,于 38℃ 下培养。每周用称重法补充因蒸发所失的水分。定期取出每个处理的样品,加入 100 mL 浓度为 3 mol·L<sup>-1</sup> 的 KCl 溶液,振荡提取 30 min,离心过滤,测定溶液中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。同时设置不加污泥的空白对照处理。每处理设置 15 个重复,分别在第 1,2,4,6,8 周时各取出 3 个重复供测定。

矿化率% = (提取液中氨态氮 - 空白处理氨态氮) × 100% / 污泥有机氮含量

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水处理厂污水污泥的产生

表 2 以苏州新区污水处理厂为例,列举了污水进

水水质及污泥产生的月变化状况。统计分析日均污水进量、污水 BOD<sub>5</sub>、COD 及 SS 浓度与污泥产生量的测定数据,发现只有日均污水进量与污泥的产生量之间有较好的正相关关系,而其它 3 个参数与污泥的产生量之间不存在相关性。由污水中污染物的年总量来看, BOD<sub>5</sub>、COD 总量与污泥的产生量仍无明显相关,只有污水 SS 总量与污泥的产生量之间有一定的相关性( $r = 0.51$ )。这说明在污水的二级处理工艺中,污泥的产生量与污水进量有关,与污水 COD、BOD<sub>5</sub> 的浓度及总量不存在明显的相关性,但污水悬浮物总量对污泥的产生有一定的影响。

### 2.2 城市污泥的养分含量

污泥的组分性质及含量常依污水来源、处理工艺不同而有差异。表 3 列出了各供试污水处理厂污泥养分全年的平均含量。从总体上来看,供试污水处理厂的污泥具有以下几个特征。

(1) 城市脱水污泥呈碱性或弱碱性, pH 范围在 7.3~8.4 之间。Wong 也发现香港脱水污泥的 pH 甚至高达 8.8,但有报道指出某些污水厂污泥的 pH 为中性(pH = 6.6~6.9)<sup>[7,8]</sup>。进一步分析发现,这些污水厂污泥基本为未脱水污泥。看来污泥 pH 变化迥异可能与污水处理厂在污泥中投入絮凝剂的种类和数量有关。

(2) 城市脱水污泥盐分含量普遍较低,参照电导

表 2 1999 年苏州新区污水处理厂进水水质及污泥产生量每月统计报表

Table 2 Monthly statistics report of wastewater properties and sewage sludge discharged amount from Suzhou New - district wastewater treatment plants in 1999

月份	日均污水进量/万 m <sup>3</sup>	pH	BOD <sub>5</sub> /mg · kg <sup>-1</sup>	COD/mg · kg <sup>-1</sup>	SS/mg · kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N/mg · kg <sup>-1</sup>	脱水污泥 t
1	2.02	7.7	70.2	163.7	128.0	24.9	150
2	2.21	7.5	137.2	311.8	201.8	20.3	151
3	2.58	7.6	61.7	142.8	123.3	27.1	135
4	3.06	7.9	111.6	227.6	149.0	46.6	268
5	3.01	7.6	146.4	287.9	189.8	43.4	281
6	3.77	7.1	94.5	185.0	114.6	28.5	109
7	5.69	7.2	54.4	116.7	89.3	26.4	380.5
8	4.16	7.3	56.6	122.7	96.9	30.4	270.5
9	15.0	7.3	46.8	100.1	70.2	24.2	330.5
10	4.09	7.2	43.3	98.2	78.5	22.2	170
11	3.67	7.3	61.4	137.4	96.6	23.8	175.5
12	3.42	7.4	64.5	148.2	106.8	28.0	207
与污泥产生量的相关性 r	0.689*	—	0.106	0.094 5	0.227	—	—

注: \*  $r_{0.05} = 0.576$ ,  $r_{0.01} = 0.708$

率与盐分%和作物生长关系<sup>[5]</sup>,发现苏州、常州、南京3家污泥的盐分 <0.1%,对作物不产生盐害;无锡芦村污泥的盐分为0.1%~0.3%,一些对盐分极敏感的作物产量可能会受到影响;徐州奎河污泥盐分含量最高,为0.5%~1.0%,能显著影响植物种子发芽和作物产量。各供试污水处理厂污泥盐分的差别可能与各厂的污水来源有很大关系。

(3) 二级处理污水污泥含有有机质、氮、磷较高,有机质为40%~54%,氮为3%~6%,磷为0.8%~2%,氮、磷含量大大高于普通农家肥猪牛粪,而和优质的农家肥鸡粪相当。污水处理深度的差别使污泥的养分含量存在差异,仅进行污水简单曝气沉砂一级处理的污水污泥相对养分含量较低,污泥的有机质、氮、

磷含量仅为14.1%,0.85%和0.29%。从表3结果发现污水污泥的C/N比均较低,为5~9。

(4) 二级处理污水污泥含钾量很低,全钾含量0.2%~0.4%左右,远低于普通农家肥的含钾量以及一级处理污水污泥(0.8%)。这可能是污水中钾的移动性较强,容易随水流失所致。

(5) 污泥中含有多种植物生长所必需的中微量元素,如Ca、Fe、有效S、Mg含量为1%~13%;Mn、B、有效Si含量为100~700 mg · kg<sup>-1</sup>,这些微量元素的含量高于或相当于土壤的背景浓度。如以有效S为例,土壤含S量一般为0.01%~0.5%,土壤的临界S含量为6~12 mg · kg<sup>-1</sup>[9],污泥S含量是土壤含量的15~30倍。

表 3 各污水处理厂污泥中元素的含量(以干重计)

Table 3 Physico - chemical properties of municipal sewage sludge from various wastewater treatment plants (in dry weight basis)

元素	苏州	无锡	常州	徐州	南京	猪厩肥①	牛厩肥②	鸡粪③
pH	7.35 ± 0.13	8.1 ± 0.40	7.92 ± 0.51	7.99 ± 0.05	8.07 ± 0.37			
EC/ms · cm <sup>-1</sup>	2.01 ± 1.46	2.55 ± 0.04	1.14 ± 0.19	8.78 ± 0.08	1.88 ± 1.31			
有机质/%	40.4 ± 2.1	40.7 ± 5.7	53.4 ± 22.2	48.9 ± 27.8	14.1 ± 1.2	52.5	52.3	60
全 N/%	3.86 ± 0.29	2.91 ± 0.31	5.16 ± 0.34	5.31 ± 3.89	0.58 ± 0.02	1.63	1.51	0.31
全 P/%	0.8 ± 0.1	1.16 ± 0.21	0.77 ± 0.12	1.07 ± 0.58	0.29 ± 0.03	0.30	0.31	1.06
全 K/%	0.4 ± 0.1	0.35 ± 0.09	0.24 ± 0.13	0.27 ± 0.13	0.79 ± 0.11	1.77	1.47	1.24
C/N 比	6.07	8.11	6.00	5.34	9.62			
Ca/%	1.0 ± 0.1	2.98 ± 0.18	1.05 ± 0.13	2.27 ± 1.04	2.39 ± 0.14			
有效 S/%	4.74 ± 1.9	12.16 ± 2.63	10.8 ± 9.04	8.83 ± 0.4	7.73 ± 6.66			
有效 Si/mg · kg <sup>-1</sup>	484 ± 412	368 ± 367	595 ± 503	702 ± 646	283 ± 165			
Mg/mg · kg <sup>-1</sup>	3 365 ± 383	3 468 ± 222	2 905 ± 590	6 009 ± 164	7 269 ± 687			
Mn/mg · kg <sup>-1</sup>	641 ± 123	505 ± 80	320 ± 82	160 ± 67	384 ± 20			
B/mg · kg <sup>-1</sup>	133 ± 33	86 ± 13	59 ± 5	66 ± 11	87 ± 14			
A/%	2.6 ± 0.4	2.38 ± 0.22	1.42 ± 0.41	1.06 ± 0.58	3.63 ± 0.25			
Fe/%	1.37 ± 0.42	1.45 ± 0.15	1.07 ± 0.5	1.02 ± 0.67	2.06 ± 0.4			

注:资料来源①为孙曦(1983)②为中国农科院土肥所(1996)。

(6) 污水处理深度的不同会造成有机质、氮、磷、钾等的差异。在相同的污水二级处理中,因污水来源以及污水、污泥处理工艺的不同,也会对污泥的泥质产生一定的影响。如苏州新区、徐州奎河污水处理厂污泥中,前者的有机质、N、P、Ca、S、Si 等是后者的 30% ~ 80%, 但 K、Mn、B、Al 等前者是后者的 1 ~ 4 倍。

## 2.3 污泥的有机物及有机养分的组成特征

### 2.3.1 污泥有机物的不同组分

污泥的养分供应强度和培肥地力的效果,不仅与其所含的无机养分有关,还受到污泥有机物矿化速度的影响,但污泥有机物矿化速度与污泥本身有机物的组成有密切关系。表 4 列出了无锡芦村污水处理厂污泥中有机物的不同组分含量。从表中可看出,污泥有机物组分中,木质素和蛋白质含量最高,其次是粗脂肪,再次是水溶性有机物,而半纤维素和纤维素含量相对较低。

污泥中水溶性有机物主要包括了大量小分子的

表 4 污泥有机物不同组分含量(占污泥干重%)

Table 4 Contents of different organic components in the sewage sludge (%)

易降解物				难降解物			有机物总量
水溶物	半纤维素	粗蛋白质	合计	粗脂肪	纤维素	木质素	
7.45	2.20	18.44	28.09	12.20	1.31	23.75	65.35

表 5 污泥有机磷的不同存在形态

Table 5 Various forms of organic phosphorus in the sewage sludge

有机磷总量		活性有机磷		中等活性有机磷		中稳性有机磷		高稳性有机磷	
含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	分配系数/%								
5 179	127	2.5	3 142	60.67	817	15.78	1 063	20.53	

注:分配系数 = 各形态含量与有机磷总量比值的百分数。

量最低,仅占有机磷总量的 2.5%。

经统计分析,有机物料施入土壤以后,其含有的活性有机磷、中等活性有机磷和中稳性有机磷直接影响着土壤有效磷的含量,3 者与土壤磷酸酶的活性之间存在显著或极显著的相关关系<sup>[10]</sup>。污泥施入土壤以后,可以明显提高土壤有机磷的含量,特别是大幅度提高了这 3 种组分的含量,这些组分是土壤速效磷的直接有机给源,而高稳性有机磷是土壤磷素的有机贮库。污泥有机物这种组成特征,使污泥比一般有机

简单碳水化合物和氨基酸等,它们极易被微生物分解利用,是促进微生物代谢的重要能量和营养来源。在污泥中这类物质的含量可占污泥的 7.5%。在污泥有机物中含量仅次于木质素的蛋白质,在环境中也极易降解。因此当大量污泥施用到土壤后,前期往往会因为蛋白质类含 N 化合物的分解而发出恶臭<sup>[6]</sup>。若将水溶性有机物、蛋白质和半纤维素作为污泥中相对易降解成分,这类组分可占污泥干重的 28%,占污泥有机物总量的 43%。而粗脂肪、纤维素和木质素是一类相对难降解的有机物,这些有机物在污泥中的含量为 37.35%,占污泥有机物总量的 57%。

### 2.3.2 污泥有机磷的存在形态

按有机磷的活性大小,污泥中的有机磷可分为活性有机磷、中等活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷 4 种形态,其结果列于表 5。各形态含量占污泥有机磷总量的比例结果表明,污泥中有机磷主要以中等活性有机磷形态存在,占有有机磷总量的 61%,其次是高稳性有机磷和中稳性有机磷,而活性有机磷含

肥肥效快,同时又具有较好的培肥效果。

### 2.3.3 污泥有机氮的不同形态

表 6 列出了污泥有机氮不同形态的含量,污泥中有 80% 以上氮是以有机氮形式存在的。比较而言,氨基酸态氮、酸解氨态氮、氨基糖态氮易于矿化,植物有效性相对较高,可称之为易矿化态有机氮,污泥中易矿化氮占污泥有机氮的 83.5%,是污泥全氮的 67.8%。土壤为当季作物提供氮素的能力,主要受易矿化有机氮含量的制约<sup>[11]</sup>。所以,污泥施入土壤以后

表 6 污泥有机氮的不同存在形态

Table 6 Various forms of organic nitrogen in the sewage sludge

组分	全氮	酸解总氮	易矿化氮			合计	难矿化氮酸解未知氮
			氨基酸氮	氨基糖氮	酸解氨氮		
含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	29.7	24.1	9.3	7.68	3.15	20.13	3.97
分配系数/%	—	—	38.6	31.1	13.1	83.5	16.50

注:分配系数 = 各形态含量与酸解总氮比值的百分数。

可大大提高土壤氮的有效性。而酸解未知氮难于矿化, 活性最低, 可称之为难矿化态有机氮。有研究表明, 土壤酸解氮中各组分含量与作物产量之间均有正相关关系, 但作用最大的是酸解氨基酸氮<sup>[12]</sup>。占污泥全氮 18.8% 的非酸解性氮, 因与腐殖质紧密结合而在短期内很难矿化成有效态氮, 但可以作为作物的长效肥。

## 2.4 污泥有机氮的矿化动态

在整个培养过程中, 各供试污泥的有机氮均在初期矿化快, 矿化累积量持续上升, 培养一段时间以后, 氮累积矿化率迅速下降, 但到第 6 周以后, 矿化率变化较为恒定, 整个矿化累积曲线呈抛物线形状, 见图 1。徐州奎河污水处理厂污泥的矿化过程可分为速增、速降、平缓 3 个阶段, 在培养 1 周时, 污泥有机氮的矿化率为 44.9%, 到第 2 周时达到最大为 50%, 随后急剧下降, 到第 6 周时, 矿化累积量降为 10.3%, 随后保持基本恒定。苏州、无锡、南京、常州各厂的污泥有机氮矿化也有相同的变化趋势。各供试污泥累积矿化量的减少是由于在淹水连续培养过程中, 矿化出来的氮可能有一部分会被微生物重新吸收产生所谓的“生物固定”效应而造成的<sup>[13]</sup>。

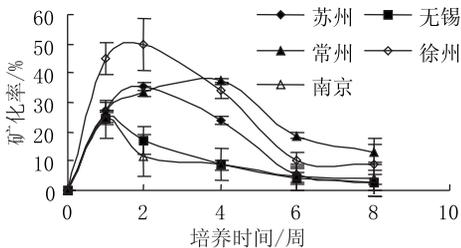


图 1 各供试污水处理厂污泥有机氮的矿化率  
Figure 1 The mineralization rate of organic nitrogen of the sewage sludge

从曲线所表征的结果来看, 污泥有机氮的累积矿化率在第 2 周时达到最大, 高于农家肥猪粪 (第 2 周时有机氮矿化率为 18%) 和鸡粪 (第 2 周时有机氮矿化率为 12%) 的矿化率<sup>[7]</sup>, 约是土壤有机氮矿化率 (5%) 的 5~10 倍。这说明污泥供应氮的能力较强, 短期内较之农家肥可提供更多的有效氮, 这与污泥 C/N 比值 (5~9) 较农家肥 (15.0) 低, 尤其与污泥中易矿化氮含量占有有机氮的比例较高有关。

## 3 结论

(1) 在污水二级处理中, 污泥的产生量与污水进水量呈正相关关系 ( $r = 0.689^*$ )。产生的脱水污泥 pH

呈碱性或弱碱性 ( $pH = 7.3 \sim 8.4$ ), 盐分普遍  $< 0.1\%$ , 对作物不会产生盐害。

(2) 城市脱水污泥的 C/N 比均  $< 10$ 。二级处理污水污泥含有机质为 40%~54%, 氮为 3%~6%, 磷为 0.8%~2%, 但其含钾量很低, 全钾含量为 0.2%~0.4%。一级处理污泥的有机质、氮、磷含量较低, 但含钾量高于二级处理污水污泥。同时, 污泥中含有多种植物生长所必需的微量元素, 如 Ca、Fe、Al、有效 S、Mg、Mn、B、有效 Si 等, 其含量高于或相当于土壤的背景浓度。

(3) 污泥有机物中水溶性有机物、蛋白质和半纤维素这些易降解成分占有有机物总量的 43%; 而有机磷中以中等活性有机磷含量最高 (60.67%)。污泥有机氮的矿化率较高, 有机氮中易矿化氮占污泥有机氮总量的 83.5%。从污泥有机氮的矿化培养实验来看, 污泥有机氮的矿化累积量在第 2 周时达到最大, 整个矿化累积曲线呈抛物线形状。

## 参考文献:

- [1] 周立祥. 我国产生污泥农业利用的发展趋势[A]. 中国青年学者论环境[C], 1996, 414-417.
- [2] 郭媚兰, 王 逵, 等. 太原市污水污泥农业利用研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(6): 258-262.
- [3] 蒋成爱, 黄国峰, 吴启堂. 城市污水污泥处理利用研究进展[J]. 农业环境与发展, 1999, 1: 13-17.
- [4] 薛澄泽, 马 芸, 张增强, 等. 污泥制作堆肥及复合有机肥料的研究[J]. 农业环境保护, 1997, 16(1): 11-15.
- [5] 南京农业大学. 土壤农化分析(第二版)[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [6] 周立祥, 胡霭堂, 胡志明. 厌氧消化污泥化学组成及其环境化学性质[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 2: 176-181.
- [7] 周立祥, 胡霭堂, 胡志明. 城市污泥有机氮矿化动态及其影响因素的研究[J]. 环境科学学报, 1997b, 17(3): 359-364.
- [8] 徐 颖. 污泥用作农肥处理及其环境影响[J]. 农村生态环境, 1993, (3): 32-35.
- [9] 刘 铮, 朱其清, 唐丽华, 徐俊祥, 尹楚良. 我国缺乏微量元素的土壤及其分布[J]. 土壤学报, 1982, 19(3): 209-223.
- [10] 李和生, 马宏瑞, 赵春生. 根际土壤有机磷的分组及其有效性分析[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 116-118.
- [11] 王维进. 土壤资源的特性与利用[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1992. 393.
- [12] 韩晓日, 陈恩凤, 郭鹏程, 邹德乙. 长期施肥对作物产量及土壤氮素肥力的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(6): 241-246.
- [13] 李生秀, 艾绍英, 何 华. 连续淹水培养条件下土壤氮素的矿化过程[J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(1): 1-5.