

## 天津河道底泥特征及资源化利用分析

韩晓芳<sup>1,2</sup>, 杨永利<sup>1\*</sup>, 张清<sup>1</sup>, 聂阿秀<sup>1,2</sup>

(1. 天津泰达绿化集团有限公司, 天津 300457; 2. 天津泰达盐碱地绿化研究中心有限公司, 天津 300457)

**摘要** 为了评估天津市滨海新区河道底泥改良为园林种植土是否可行, 选取了天津市滨海新区开发区九大街与海滨高速交口的排水河道底泥为研究对象, 检测了河道底泥的基本理化性质及肥力和重金属含量。结果表明, 河道底泥的全盐含量在 31~89 g/kg, 属于重盐碱地, 远超过绿化种植土壤的含盐量标准; pH 在 7.0~7.5, 满足绿化种植土壤标准; 有机质含量在 37~99 g/kg, 略高于绿化种植土的标准 (20~80 g/kg), 含水率在 20%~67%, 各重金属含量也基本都在园林种植土国标允许的范围, 主要离子含量结果表明河道底泥为钠质盐碱土, 钠盐占全盐含量的 76.3%。综上所述, 河底底泥改良的主要限制因素是含盐量高, 其中钠离子为主要离子。

**关键词** 河道底泥; 绿化种植土; 理化性质; 肥力; 重金属

中图分类号 X 703 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)15-0085-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.15.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### River Sediment Characteristics and Resource Utilization Analysis in Tianjin

HAN Xiao-fang<sup>1,2</sup>, YANG Yong-li<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup> et al (1. Tianjin Taida Greening Group Co., Ltd., Tianjin 300457; 2. Tianjin Taida Saline-alkaline Soil Greening Research Center Co., Ltd., Tianjin 300457)

**Abstract** In order to evaluate the feasibility of improving river sediments in Tianjin Binhai New District as garden planting soil, we selected the drainage river sediments at the intersection of Jiudajie and Haihin Expressway in Tianjin Binhai New District Development Zone as the research object, and tested the physicochemical properties and fertility and heavy metal content of river sediments. The results showed that the total salt content of river sediment is 31-89 g/kg, which belongs to heavy saline-alkali land, far exceeding the salt content standard of green planting soil; pH is 7.0-7.5, which is in line with planting soil greening standard; organic matter content is 37-99 g/kg, which is slightly higher than the standard of green planting soil (20-80 g/kg); moisture content is 20%-67%; the content of each heavy metal is basically in the national standard of garden planting soil; the main ion content results showed that the river sediment is sodium saline alkaline soil, and the sodium salt accounts for 76.3% of the total salt content. In summary, the main limiting factor for the improvement of river sediment is the high salt content.

**Key words** River sediment; Green planting soil; Physical and chemical properties; Fertility; Heavy metal

为了改善河流、湖泊的水体水质, 近年许多城市开展了大规模的疏浚和清淤工程<sup>[1]</sup>, 由此带来了大量的疏浚底泥。例如, 苏州河治理时疏浚数十万方底泥, 太湖及滇池治理中疏浚数百万方底泥<sup>[2]</sup>。在珠江三角洲地带, 每年疏浚的底泥达到 8 000 万 m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>。2003 年, 有 12 681 万 m<sup>3</sup> 的疏浚底泥被倾倒入海洋<sup>[4]</sup>。在天津市, 大沽排污河、北塘排污河等污水河道进行清淤治理时, 仅大沽排污河就清出底泥量高达 230 万 t<sup>[5]</sup>。疏浚底泥泥量大, 含水率高, 组成成分复杂, 极易产生二次污染, 若处置不当将对环境造成不利影响, 因而疏浚底泥处理和处置成了人们普遍关注的问题。

河道底泥属于污泥的一种, 大多数国家污泥处置最主要方法是污泥农用、陆地填埋和污泥建材利用<sup>[6-8]</sup>。在我国虽然有淤泥制砖、填土等用作建筑材料的报道, 但由于前期需要脱水、固化等处置, 处理成本较高, 推广应用受限<sup>[9]</sup>。近年来, 随着淤泥处理处置难度的增加, 淤泥回归土地又得到重视。淤泥养分含量较高, 淤泥农用能提高农作物产量, 但用量有限<sup>[10]</sup>; 园林植物由于耐性强, 淤泥应用效果相对较好<sup>[11]</sup>。有研究显示, 2001 年上海市内河道底泥淤积量达 1.45 亿 m<sup>3</sup>, 其中 80% 都是中、轻度污染, 可以直接或是在一定预处理后, 作植物培植土再利用<sup>[12]</sup>。是否可以用作植物培植

土再利用, 关键在于河底底泥的污染程度。

天津滨海新区濒临渤海, 地势低洼, 地下水位高, 矿化度高, 土壤的含盐量高<sup>[13]</sup>。含盐量高可能也是天津滨海新区河道底泥存在的一个问题, 另外, 由于河道不同输入源, 重金属可能也是重要污染源之一, 但是目前很少有研究对天津滨海新区的河道底泥进行污染分析。同时鉴于目前盐碱地绿化工艺主要还是采用暗管排盐、抬高地面、客土改良等方式处理, 因此, 绿化需要大量土源<sup>[13-14]</sup>。随着绿化面积的快速增加, 其周边可利用的土源日益匮乏, 客土质量越来越差, 客土的运距越来越远, 致使客土的成本成倍增长, 新土源的寻找迫在眉睫<sup>[13, 15]</sup>。该研究通过采集并分析天津滨海新区某河道底泥理化性质和重金属污染特性, 根据绿化种植土标准, 评价底泥作为绿化种植土的可行性, 以期为污泥资源化利用提供数据支撑和理论依据, 也为滨海新区绿化用土寻找新的土源。

### 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 该项目样品来自滨海新区开发区九大街与东海路交口的东排明渠河道底泥, 是开发区防汛排水的重要设施之一, 开发区东区内 70% 的雨水通过该明渠排放入海, 此东排明渠起止断面为天津开发区第八大街与东海路交口至天津港东疆海堤, 明渠全长 2.38 km, 平均宽 30 m, 设计流速约 82 m<sup>3</sup>/s, 终点处设 6 台防潮闸。五大街、东海路、泰丰和十一大街 4 座雨水泵站排放的雨水分别汇入东排明渠, 沿途流经新港七号路、跃进路及天津港部分区域, 经防潮闸

**基金项目** 天津市科技计划重点支撑项目(16YFZCNC00740)。

**作者简介** 韩晓芳(1986—), 女, 山西临汾人, 工程师, 博士, 从事生态修复、盐碱地生态治理与土壤改良研究。\*通信作者, 博士, 研究员, 从事生态修复、盐碱地生态治理与土壤改良研究。

**收稿日期** 2020-03-24

控制最终排入渤海湾。

**1.2 采集样品及分析方法** 样品采集于2019年6月底—7月初采集,通过实地调查,于排水河道起始段河道中部区域进行采集样品并分析河道底泥的污染状况。取样时此河道水体已经被排出半年多,底泥清晰可见,呈浅棕或深黑色或深褐色,略带臭味。多年来此河道没有经过清淤工作,具体底泥厚度不得而知。按照传统土壤取样深度,该研究取开发区东排明渠河道0~5 cm(样1)、5~20 cm土层(样2)和20~40 cm(样3)3个土样,每个深度的土采用5个点采样混合土进行试验分析。样品于实验室内50℃低温烘干,剔除碎石、砂砾及植物残体等杂质,研磨过5 mm筛,然后实验室分析,得到河道底泥土壤的基本理化性质、肥力状况及重金属含量情况。检测项目及分析方法见表1。

表1 检测项目  
Table 1 Test items

序号 No.	指标 Index	监测分析方法 Monitoring and analysis methods	采用标准 Standard
1	pH	玻璃电极法	CJ/T 221
2	EC值	电导法	LY/T 1251
3	有机质含量	重铬酸钾-外加热法	LY/T 1237
4	污泥含水率	重量法	CJ/T 221
5	水解性氮	碱解-扩散法	LY/T 1228
6	有效磷	钼锑抗比色法	LY/T 1232
7	速效钾	火焰光度法	LY/T 1234
8	总镉	石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T 17141
9	总汞	冷原子吸收分光光度法	GB/T 17136
10	总铅	石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T 17141
11	总铬	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17137
12	总砷	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17141
13	总镍	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17139
14	总锌	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17138
15	总铜	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17138

**1.3 数据处理** 数据分析采用Microsoft Excel 2010和SPSS 22.0进行数据处理及统计分析。

## 2 结果与分析

**2.1 河道底泥土壤基本性能** 如表2所示,河道底泥的3个土壤样品含盐量分别为88.67、53.4、31.07 g/kg,都远远超过中华人民共和国城镇建设行业标准(CJ/T 340—2016)绿化种植土壤的标准1 g/kg,为重度盐碱土。但是3个底泥样品的pH在7.0~7.5,均未超过8,根据CJ/T 340—2016,满足绿化种植土壤要求。

底泥含水率高一直是河道底泥处理的一个难题,所以含水率被作为一个重点指标观测。如表所示,河道底泥的3个土壤样品含水率分别为20.54%、67.00%、55.4%。由于河道没有水已经半年有余,采集样品多在没有水的土壤处采集,所以采样点表层含水率低,中下层底泥土壤含水率略高,和培植土要求相近,但由于处于胶粘状态,自然脱盐比较难。

**2.2 河道底泥土壤肥力指标** 如表3所示,河道底泥土壤

有机质含量则分别为37.1、99.2、70.8 g/kg,与国标相比,样1和样2有机质含量在标准范围内,而样3超过了国标范围的最大值,表明河道底泥有机质含量较高。

表2 河道底泥土壤全盐和pH  
Table 2 Total salt and pH of river sediment

项目 Item	样1 Sample 1	样2 Sample 1	样3 Sample 3	CJ/T 340 —2016
全盐 Whole salt//g/kg	88.67±1.97	53.40±0.20	31.07±0.58	1
pH	7.29±0.01	7.32±0.04	7.47±0.02	5~8
底泥含水率 Sediment mois- ture//%	20.54±4.87	55.40±5.21	67.00±0.47	—

3个样品水解氮平均含量276 mg/kg,有效磷平均含量95 mg/kg,速效钾平均含量839 mg/kg。与国标相比,3个样品的水解氮、有效磷、速效钾含量远远高于国标技术指标要求。这一结果表明河道底泥速效氮、磷、钾含量都较高。

表3 河道底泥土壤干物质和有机质含量  
Table 3 Dry matter and organic matter content of river sediment

项目 Item	样1 Sample 1	样2 Sample 1	样3 Sample 3	CJ/T 340 —2016
有机质 Organic matter g/kg	37.1±34.27	70.8±6.98	99.2±102.15	20~80
水解氮 Hydrolyzed nitrogen mg/kg	277±29.54	268±34.33	283±31.21	40~200
有效磷 Available phosphorus mg/kg	98±12.74	95±11.02	92±8.95	5~60
速效钾 Quick-acting potassium//mg/kg	772±85.65	941±96.87	804±74.68	60~300

**2.3 河道底泥土壤重金属含量** 如表4所示,样品中所有重金属含量远远低于农用污泥A级污染物限值含量(GB 4284—2018),满足耕地要求;同时,所有样品中重金属含量也符合《中华人民共和国城镇建设行业标准》(CJ/T 340—2016)对绿化种植土壤重金属含量的技术要求,除了铬含量外,其他重金属含量基本都在Ⅲ级范围内,所以此河道底泥基本可以经过脱盐后用于道路绿化带、工厂附属绿地等有潜在污染源的绿(林)地或防护林等与人接触较少的绿(林)地,或是废弃矿地、污染土壤修复等重金属潜在污染严重或曾经受污染的绿(林)地用土。

**2.4 河道底泥土壤主要离子** 为了探究河道底泥主要离子含量,将3个土样混合后测定了样品土壤主要离子含量,表5显示的样品中除钾离子含量在标准范围内,氯离子、钙离子、镁离子、钠离子含量均超出CJ/T 340—2016行业规定标准,其中钠离子含量最高,占总盐含量的76.3%,约是钙离子含量的10倍。这些结果表明,河道底泥是钠质盐碱土,必须经过脱盐降低土壤含盐量,才能达到绿化种植土要求。

表 4 河道底泥土壤重金属含量

Table 4 Contents of heavy metals in river sediment

mg/kg

项目 Item	样 1 Sample 1	样 2 Sample 1	样 3 Sample 3	GB 4284—2018		CJ/T 340—2016			
				A 级(≤)	B 级(≤)	I(≤)	II(≤)	III(≤)	IV(≤)
铜 Cu	57	136	159	500	1 500	40	300	400	600
镍 Ni	22	85	129	100	200	40	80	150	220
铅 Pb	14.1	108	103	300	1 000	85	300	450	530
镉 Cd	0.12	0.43	0.79	3	15	0.4	0.8	1.2	2
砷 As	10.9	11.7	14.7	30	75	30	30	35	45
汞 Hg	0.22	0.7	1.33	3	15	0.4	1.2	1.5	2
铬 Cr	48	154	215	500	1 000	100	200	250	400
锌 Zn	262	517	692	1 200	3 000	150	350	500	800

表 5 河道底泥土壤主要离子含量

Table 5 Main ion content in river sediment

项目 Item	样 3 Sample 3/mg/kg	CJ/T 340—2016
Cl <sup>-</sup>	1 020±320	>10 mg/L
Ca <sup>2+</sup>	2 170±140	200~500 mg/kg
Mg <sup>2+</sup>	1 640±100	50~280 mg/kg
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1 120±210	—
K <sup>+</sup>	250±30	60~300 mg/kg
Na <sup>+</sup>	20 700±1 990	120 mg/kg
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	240±20	—

### 3 讨论

天津滨海新区为重盐碱地<sup>[13]</sup>,该研究中的河道底泥土壤含盐量也均远远超过 3 g/kg(天津市园林绿化土壤质量标准 DB/T 29-226-2014)的绿化种植土要求,属于重盐碱土,主要离子分析表明,底泥土壤中钠盐占全盐含量的 76.3%,这种高钠盐特征是符合天津滨海新区的实际情况,主要原因是,此明渠是开发区防汛排水的重要设施之一,开发区东区内 70%的雨水通过该明渠排放入海,而开发区土壤因长期遭受海水浸渍,土壤多为重盐碱性土壤,且比重大,盐渍化程度高<sup>[16]</sup>,雨水等通过径流和淋洗作用将地表土壤汇集到排水渠,经过沉积作用导致明渠底泥呈现高盐特征。

很多研究均表明,河道底泥富含有机质,该研究结果和文献[17-18]一致,河道底泥不仅有机质含量高,速效氮、磷、钾含量也都较高。

在底泥质量评价中,重金属含量是一项重要指标<sup>[19]</sup>,因此该研究对底泥重金属含量进行了分析,结果显示,所测样品中所有重金属含量远远低于农用污泥 A 级污染物限值含量(GB 4284—2018),满足耕地要求;同时,所有样品中重金属含量也符合《中华人民共和国城镇建设行业标准》(CJ/T 340—2016)对绿化种植土壤重金属含量的技术要求,除了铬含量外,其他重金属含量基本都在Ⅲ级范围内,所以此河道底泥基本可以用于道路绿化带、工厂附属绿地等有潜在污染源的绿(林)地或防护林等与人接触较少的绿(林)地,或是废弃矿地、污染土壤修复等重金属潜在污染严重或曾经受污染的绿(林)地。由于重金属有富集作用,含有重金属的土壤要避免用于农作物等进入食物链的植物,而园林植物不进入食物链,如果低含量重金属的土壤被用于园林绿化,不仅能

够解决低洼沿海地区绿化土源缺乏这一现实问题,而且部分园林植物能够吸收、固定重金属<sup>[20-21]</sup>,有利于土壤中重金属的提取与固定。

近年,天津市园林绿化建设需要的大量园林回填方土和种植土方,特别是滨海新区,大多用农田土代替园林种植土,一方面对农业生产和农村的生态环境造成破坏,另一方面,绿化种植土购买价格逐年走高,增加了绿地建设成本,寻找园林绿化新土源已迫在眉睫<sup>[22]</sup>。天津自古以来就有九河下梢、海河要冲之称<sup>[23]</sup>。2017 年随着河长制的全面推行,水资源的保护利用用于防治、改善与修复水生态工作被重视。河道底泥疏浚是城市水体综合整治中重要一环,由此产生了疏浚底泥消纳问题<sup>[24-25]</sup>。目前,疏浚底泥消纳的基本途径主要有水下弃置、隔离处置和资源化利用。水下弃置疏浚底泥存在污染转移的可能;隔离处置常用于受重度污染的疏浚底泥,但成本高;资源化利用是目前优先考虑轻、中度污染的底泥消纳方法。轻、中度污染底泥作为土地利用,具有用量大、技术简单和经济性好等优点,并且在绿地中具有避开食物链,对环境相对安全,是城市受污染底泥利用的有效可行途径之一<sup>[26]</sup>。邵立明等<sup>[12]</sup>对上海市河底底泥进行评价指出,上海市河底淤泥 80%都是中、轻度污染,可以直接或是在一定预处理后作植物培植土再利用。而天津市河道底泥具体处于什么情况不得而知。该研究中的河道底泥属于轻度污染,可以经过一定的处理后就近用于土地利用,而园林绿化用土一方面因为不进入食物链,大量就近应用具有明显优势,另一方面河道底泥用于园林绿化还可以缓解天津滨海新区绿化用土缺土的现实问题,因此具有一定的经济性、可行性。

### 4 结论

该研究中河道底泥营养丰富,富含植物必须的氮、磷、钾,有机质含量高,重金属含量低于污泥农用的标准,符合园林绿化国标,但含盐量高,钠为主要离子,占总离子量的 76.3%。这是天津滨海地区盐碱土普遍存在的问题,经过改良后,被用于绿化种植,是可行的天津市疏浚底泥消纳与利用途径,既可以缓解底泥消纳问题,也可以增加园林绿化种植土的来源。

对于类似此河道底泥,速效植物养分和有机质含量高,污染较轻,重金属含量低于污泥农用的标准,但是含盐过高的其他河道底泥,可以通过洗盐降低盐分后应用于绿地,再

选择生长快速、需肥量大、对重金属有隔离固定等作用的植物品种。

该项目只针对滨海新区一条主要河道底泥进行了分析,样品量少,今后还需要增加市区多条河道底泥的取样分析,为高盐河道淤泥改良为绿化种植土提供更多数据和技术支撑。

#### 参考文献

- [1] SINGH S P, TACK F M G, GABRIELS D, et al. Heavy metal transport from dredged sediment derived surface soils in a laboratory rainfall simulation experiment [J]. *Water, air and soil pollution*, 2000, 118(1/2): 73-86.
- [2] 朱广伟, 陈英旭, 王凤平, 等. 景观水体疏浚底泥的农业利用研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 335-339.
- [3] 朱伟, 张春雷, 刘汉龙, 等. 疏浚底泥处理再生资源技术的现状[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(4): 39-41.
- [4] 李睿. 《2012年中国海洋环境状况公报》发布近岸海域污染严重[J]. *珠江水运*, 2013(11): 28.
- [5] 刘彦诚. 天津市大沽排污河淤泥的综合处理处置方案研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [6] USEPA. Biosolids generation, use, and disposal in the United States [R]. Washington DC: Office of Solid Waste Response Emergency, 1999.
- [7] QI Y N, BEECHER N, STONE L. A national survey of biogas use at wastewater treatment plants in the United States: The results [J]. *European journal of marketing*, 2013(5): 655-666.
- [8] PAUL MOLONEY. Cultivating a market for sewage, (Toronto Star City Hall Bureau). *The Toronto Star* [R]. 2000.
- [9] 陈维华, 季树凯, 沈海涵. 天津滨海地区入海河道淤泥利用的对策研究[J]. *水利科技与经济*, 2007, 13(7): 461-463.
- [10] 杨丹, 范欣柯, 刘燕, 等. 河道疏浚底泥农业利用可行性分析[J]. *科技通报*, 2017, 33(1): 235-239.
- [11] 张明霞. 疏浚底泥在城市绿化中的应用[J]. *中国城市林业*, 2011, 9

(上接第84页)

平均级别为3.3级;空间分布上,中东部地区自然质量、生产质量、综合质量优于西部地区,绿色质量西部地区优于中东部地区。

(4)分析耕地质量空间集聚格局。绿色质量高等级耕地主要集聚于西部地区,低等级耕地主要集聚于东南部地区;自然质量、生产质量、综合质量高等级耕地主要集聚于东南部地区,低等级耕地主要集聚于西部地区。

#### 参考文献

- [1] PIERI C, DUMANSKI J, HAMBLIN A, et al. Land quality indicators [R]. World Bank Discussion Papers, 1995: 315.
- [2] 周生路, 李如海, 王黎明. 江苏省农用地资源分等研究 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
- [3] 姜广辉, 赵婷婷, 段增强, 等. 北京山区耕地质量变化及未来趋势模拟 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 304-311.
- [4] 路捷, 李玲, 吴克宁, 等. 基于农用地分等和土壤环境质量评价的耕地综合质量评价 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 323-329.
- [5] 郇文聚. 农用地分等及其应用研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [6] 高丽丽. 土地质量地球化学评估与农用地分等整合方法及成果应用研

(5): 50-51.

- [12] 邵立明, 何晶晶, 洪祖喜. 受污染疏浚底泥用作植物培植土的环境影响分析 [J]. *环境科学研究*, 2004, 17(3): 51-54, 74.
- [13] 黄明勇, 张民胜, 张兴, 等. 滨海盐碱地地区城市绿化技术途径研究——天津开发区盐滩绿化20年回顾 [J]. *中国园林*, 2009, 25(9): 7-10.
- [14] 张帮明, 岳俊杰. 天津滨海新区绿化客土资源的几点思考 [J]. *中国科技博览*, 2012(16): 314, 308.
- [15] 张金龙, 王振宇, 张清, 等. 天津滨海新区盐碱土绿化综合治理技术研究 [J]. *天津农业科学*, 2012, 18(6): 147-151.
- [16] 崔静. 天津市滨海新区土壤污染状况及防治措施初探 [C] // 中国环境科学学会. 2011中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [17] 陈如海, 詹良通, 陈云敏, 等. 西溪湿地底泥氮、磷和有机质含量竖向分布规律 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(4): 493-498.
- [18] 姜翠玲, 章亦兵, 范晓秋. 沟渠湿地水体和底泥中有机质时空分布规律研究 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(6): 618-621.
- [19] 彭旭更, 胡保安. 面向污染水体的底泥环保疏浚技术与资源化利用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(6): 95-97, 102.
- [20] 徐旭, 孙振元, 潘远智, 等. 园林植物对重金属胁迫的响应研究现状 [J]. *世界林业研究*, 2007, 20(6): 36-41.
- [21] 王广林, 张金池, 庄家尧, 等. 31种园林植物对重金属的富集研究 [J]. *皖西学院学报*, 2011, 27(5): 83-87.
- [22] 洪祖喜, 何晶晶. 受污染底泥易地处理处置技术 [J]. *上海环境科学*, 2002, 21(4): 233-236, 260.
- [23] 李慧. 天津城市社区文化建设与发展研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [24] 曹雷. 天津市河道淤泥脱水技术与资源化利用技术要求研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [25] 贾海峰, 马洪涛. 城市河湖底泥疏浚对水生态的影响分析与对策探讨 [J]. *北京水务*, 2006(1): 48-51.
- [26] 朱广伟, 陈英旭, 王凤平, 等. 城市河道底泥直接园林应用的初步研究 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2001, 27(1): 47-48.

究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.

- [7] ESWARAN H, KIMBLE J. Land quality assessment and monitoring: The next challenge for soil science [J]. *Pedosphere*, 2003, 13(1): 1-10.
- [8] 陈朝, 吕昌河. 基于综合指数的湖北省耕地质量变化分析 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2018-2029.
- [9] 聂艳, 周勇, 于婧, 等. 基于GIS和模糊物元贴适度聚类分析模型的耕地质量评价 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 551-558.
- [10] 张广星, 于东升, 张忠启, 等. BIO-NORM与EO耕地质量评价方法对比研究 [J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 1012-1018.
- [11] 于东升, 张广星, 张忠启, 等. BIO-NORM与NORM耕地质量评价方法对比研究 [J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 238-245.
- [12] SHAO J A, GE X F, WEI C F, et al. Classification and gradation of cultivated land quality in Bishan County of Chongqing, China [J]. *Chinese geographical science*, 2007, 17(1): 82-91.
- [13] 夏家洪, 蔡道基, 夏增禄, 等. 土壤环境质量标准: GB 15618—1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [14] 吕贞龙, 王小兵, 仲晓春, 等. 基于地理信息系统的滨海盐土土壤肥力评价 [J]. *系统工程理论与实践*, 2008(9): 166-171.
- [15] 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价: 以江苏太仓市为例 [J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 395-400.
- [16] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值 [J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1363-1378.