

互花米草/羊粪混合堆肥还田对滨海盐碱土壤的改良效应:实验室研究

陈金海, 王红丽, 王磊*, 李艳丽, 张文俊, 付小花, 乐毅全

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:外来物种互花米草由于缺乏资源化利用途径,近年来已在我国沿海滩涂蔓延扩展。为了探索互花米草的控制与资源化利用途径,尝试将互花米草作为秸秆资源用于滨海盐碱土壤改良,为此选择适合于堆肥和还田的收割季节和部位,首先研究了不同部位互花米草成分的季节差异,结果显示,秋季互花米草秸秆的营养组分及其生物量较适合于堆肥和还田。堆肥结果表明,在耐盐菌和VT菌的共同作用下,添加羊粪后的互花米草秸秆经54d堆肥后,水浸提液的E4/E6值由初始的3.35提高到9.21,腐解过程显著;10min水洗脱盐率达到81.83%,较生米草大幅提高。8个月的盆栽(50kg级)试验表明,投加腐熟堆料后,土壤容重和含盐量降低,土壤有机碳、TN、TP、蔗糖酶活性显著提高,植物生物量为对照的3.74倍。这些结果初步表明,互花米草/羊粪混合堆肥还田能改善土壤理化性质,提高土壤肥力,增加作物产量,是一条实现资源化的可能途径。

关键词:互花米草;土壤改良;堆肥;秸秆还田

中图分类号:S156.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)03-0513-09

Composting and Returning of *Spartina alterniflora* Straw/Goat Feces and Its Amelioration Effect on the Coastal Saline Soil: Laboratory Study

CHEN Jin-hai, WANG Hong-li, WANG Lei*, LI Yan-li, ZHANG Wen-quan, FU Xiao-hua, LE Yi-quan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: *Spartina alterniflora* as an alien species, has spread on coastal beach in China in recent years because of lacking resource utilization way, and has been a serious threat to the survival of indigenous living creatures, leading to the decline of biodiversity. In order to explore a possible way of utilizing *Spartina alterniflora* straw, the feasibility of using *Spartina alterniflora* as straw resource to ameliorate coastal saline soil was studied in this work. Firstly, the seasonal dynamic of different parts of *Spartina alterniflora* was studied, and then the *Spartina alterniflora* with proper seasonal and part was selected to compost for humifying and desalinizing before its returning land. The result showed that *Spartina alterniflora* straw harvested in autumn was much more suitable for aerobic composting and returning in the view of plant biomass and ratio of C/N. During the composting process, the E4/E6 value of the extract of *Spartina alterniflora*/goat feces compost increased from initial 3.35 to 9.21 of after 54 days under the interaction by salt-tolerant and VT bacteria, indicating the compost had preliminary humified. The desalination rate of the straw after composting by washing for 10 minutes was 81.83%; it was much higher than raw straw. The pot test (50 kg scale) showed that after returning composted *Spartina alterniflora* to saline soil for 8 months, soil bulk density and salinity reduced, while soil organic carbon, TN, TP and invertase significantly increased ($P < 0.05$). And plant biomass increased by 274% comparing to the control. These results preliminary indicated that composting and returning *Spartina alterniflora* straw/goat feces could improve the chemical and physical properties of saline soil, increase soil fertility and plant biomass yield, and was a possible utilization way. Pilot scale experiment has been in process in Chongming Dongtan, China.

Keywords: *Spartina alterniflora*; soil amelioration; compost; crop straw return

收稿日期:2010-08-30

基金项目:国家科技部科技支撑重大项目(2010BAK69B13);上海市科委重大科技攻关项目(10DZ1200903)

作者简介:陈金海(1987—),男,福建莆田人,在读硕士研究生,主要从事环境污染防治与土壤修复的研究工作。E-mail:chenjinhai1987@126.com

* 通讯作者:王磊 E-mail:celwang@yahoo.com

互花米草(*Spartina alterniflora*)是一种多年生耐盐植物,原产于大西洋沿岸,具有很高的生产力,在相同环境条件下,互花米草的净光合速率高,能够迅速进行生物量的生产和积累^[1],每年干物质产率^[2]高达3 154.8 g·m⁻²。1979 年引入我国沿海地区后,互花米草在固滩、护堤方面取得了良好效果^[3],同时可使根际土壤中有机碳含量增加^[4]。然而,由于缺乏资源化利用途径,近几年互花米草已在一些地区出现了迅速扩张的现象^[5],对当地土著生物的生长造成严重威胁,导致生物多样性下降^[6-7]。2003 年初我国环境保护部自然生态保护司在关于发布中国第一批外来入侵物种名单的通知中,已将其列入该名单。如何实现互花米草的资源化利用、控制其蔓延成为当前生态研究的热点之一^[8-11]。

崇明是上海的农业大县,然而其农业用地多来于沿海滩涂的围垦,土壤含盐量高、土壤贫瘠,导致作物生长发育不良,农业生产效率低下。同时崇明东滩湿地互花米草大量繁殖,由于缺乏有效的利用途径,面积已扩展到 910.17 hm²,约占植被总面积的 33.1%^[12],严重威胁东滩湿地的生物多样性。土壤贫瘠和盐碱化以及互花米草的蔓延已成为崇明建设生态岛,发展生态农业必须解决的两个重要问题。

农作物秸秆是重要的肥料资源。秸秆还田是秸秆的主要利用方式,也是土壤改良的重要手段^[13]。目前主要的还田措施有直接还田、堆沤还田和过腹还田3 种形式^[14]。堆肥是农业废弃物资源化利用的有效途径之一,在堆肥过程中,堆料有机物向腐殖化和稳定化方向转化^[15]。相关研究表明,秸秆堆肥还田具有改善土壤理化性质,增加作物产量等作用^[16-18]。

互花米草秸秆是一种潜在的生物质资源,是崇明目前最丰富的秸秆资源之一。互花米草秸秆还田用于崇明滨海贫瘠土壤改良是一个资源化的可能途径,然而目前关于互花米草秸秆还田的研究鲜见报道。这可能是因为互花米草生长于海滩、含盐量高且不易洗脱,直接还田将导致土壤盐分的聚集等。为实现互花米草秸秆的还田,首先必须阐明不同季节互花米草的营养成分以期获得适合堆肥还田的收割季节,同时需要通过堆肥使互花米草初步腐殖化,并有利于盐分的洗脱。

本文从互花米草的资源化和滨海盐碱土壤改良角度出发,分析了不同季节互花米草的不同部位营养元素的差异,并在此基础上选择合适的季节收获互花米草的有效部位,添加羊粪作为外加氮源,通过好氧堆肥得到盐分易于洗脱的腐熟秸秆混合堆料,最后通过盆栽试验(50 kg 级)验证腐熟脱盐米草混合堆料对滨海盐碱土壤的改良效应。研究结果将为今后米草秸秆还田用于滨海盐碱土壤改良提供有益的参考数据和理论指导。

1 材料和方法

1.1 互花米草样本采集与预处理

选取崇明东滩滩涂湿地单优生长的互花米草群落作为试验材料。于 2008 年 5 月、7 月、9 月和 12 月分别代表春、夏、秋、冬 4 个季节,在崇明东滩湿地互花米草单优群落带取样。采样时选择植物长势、高度大体一致的互花米草群落的完整植株。

采用收获法采集植物样品,挖深 10 cm 左右刈割采集互花米草 10 株,包括地上部分和地下根茎。用聚乙烯袋包装,带回实验室。采集的互花米草样品先用自来水将表层泥沙冲洗干净,再用蒸馏水冲洗 2 遍。将植物样品在自然条件下风干,然后置于 105 ℃恒温干燥箱烘干,按植物不同部位分成根、茎、叶,对风干后的植物样品进行粉碎,过 60 目筛,筛下部分按每个季节每个部位分装成 3 个平行样,用于分析互花米草各部位 C、N、P、K、Na 含量的季节动态。

1.2 堆肥试验设计

首先进行预堆试验,利用纯互花米草进行堆沤,堆制 3 个月后发现由于含盐量高、含氮量低,秸秆腐化速度慢,质量变化不大,10 min 脱盐效率仅为 36.3%,不易堆沤成肥。预堆试验结果见表 1。

在后续试验中采取以下堆肥措施:取秋季互花米草,除去根部及含盐量较高的叶部,将其余部分切碎使粒径在 1~3 cm 之间,以羊粪作为氮源添加剂,按干物质质量比 2:1 投加互花米草和羊粪,调节至 C:N 比在 30:1 左右,加水调节含水率到 50%~55%,随后接种复合微生物菌剂。之后将堆料均匀混合后装入直径为 40 cm、高 60 cm 的堆肥装置中,同时设置 3

表 1 预实验互花米草质量变化与脱盐效率

Table 1 The weight variations and desalination efficiency of *Spartina alterniflora* in trial test

试验前质量/kg	堆制 3 个月后质量/kg	10 min 脱盐量/g·kg ⁻¹	2 h 脱盐量/g·kg ⁻¹	10 min 脱盐效率/%
10	8.2	2.95±0.12	8.12±0.18	36.3±0.16

注:表中质量以干基计;表中 10 min 脱盐量、2 h 脱盐量试验方法见 1.4 章节。

个重复处理。经 54 d 强制通风堆肥,随后进入自然通风发酵阶段,并备用于盆栽土壤改良,期间分别于 0、7、14、24、34、44、54、74、104 d 采样。堆肥装置见图 1。

互花米草 2008 年 9 月底收割于崇明东滩湿地互花米草优势群落。羊粪取自崇明岛陈家镇瀛东村山羊养殖厂。复合微生物菌剂来自北京沃土天地生物科技有限公司生产的 VT 菌剂和实验室筛选崇明东滩湿地土壤中的耐盐菌,经高盐度驯化后,成批培养备用。耐盐菌驯化培养过程如下(采用贫营养的 M9 培养基培养,培养时逐步提高含盐量 0.1%、0.5%、1%、2%对土壤中的耐盐菌加以驯化。):用天平称取 5 g 崇明盐碱土样加入盛有 50 mL 含盐量 0.1%的 M9 培养基的三角瓶中。将该三角瓶放在摇床上于 28 ℃振荡培养 24 h,使细菌充分生长后,再取其中 1 mL 含菌培养液继续转接到含盐量 0.5%的培养基中,直到其含盐量达到 2%,之后采用大桶充氧富集培养,待大桶内的菌量生长至一定程度时,于冷冻离心机 4 ℃下 10 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,收集菌液浓缩液于 4 ℃下保存。M9 培养基成分见表 2,堆肥材料的基本性质见表 3。

表 2 M9 培养基成分

Table 2 The ingredient of M9 culture medium					
品名	Na ₂ HPO ₄	KH ₂ PO ₄	NaCl	NH ₄ Cl	葡萄糖
质量/g	12.8	3	0.5	1	4

1.3 盆栽试验设计

盆栽试验于 2009 年 4 月至 11 月在同济大学环境学院生态楼楼顶进行。盆栽试验作物为崇明东滩本土植物田菁。试验花盆采用 PVC 材质,盆高 30 cm,长、宽各 40 cm,容量为 0.048 m³,盆底部有直径 2~4 cm 小孔若干,利于土壤通气渗水。花盆底部铺有 10 cm 厚的碎石垫层以防止土壤流失及增加土壤的通气透水性。设置 1 个不投加腐熟堆料的对照和 3 个添加互花米草腐熟堆料的平行处理盆。堆制 104 d 后腐熟混合堆料基本性质见表 4,供试土壤取自崇明东滩湿地公园,理化性质见表 5。

先将腐熟堆料用水浸泡以洗去盐分,防止还田后盐分聚集。洗盐操作过程如下:将腐熟混合堆料放置于底部开一直径为 1 cm 圆孔的桶内,加水至淹没堆

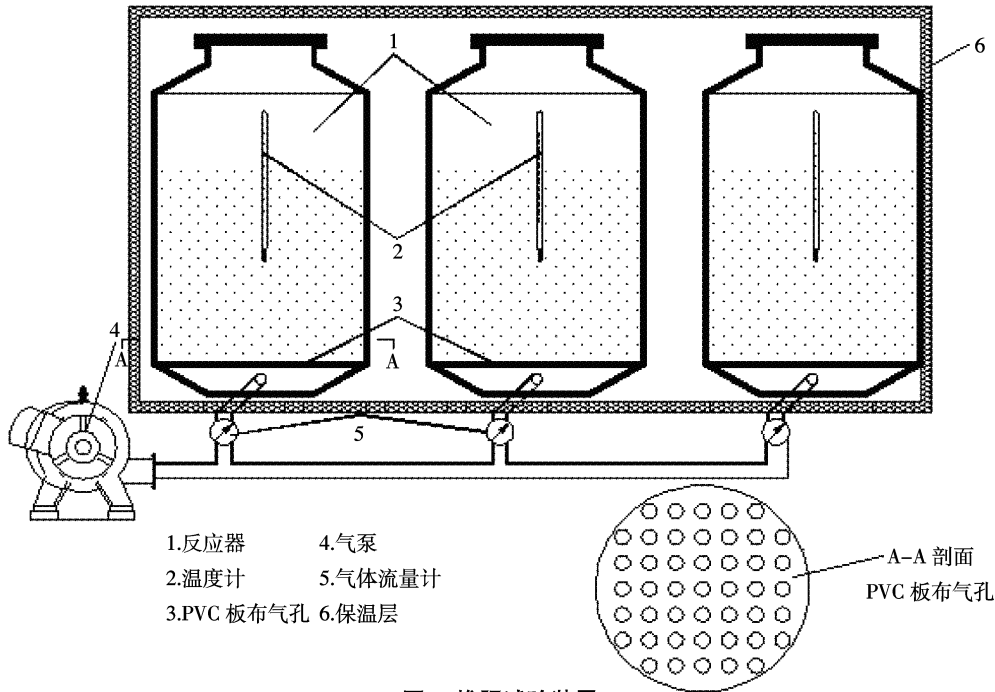


图 1 堆肥试验装置

Figure 1 Schematic of composting test

表 3 堆肥试验材料基本性质

Table 3 The basic properties of composting material

试验材料	全碳 TC/g·kg ⁻¹	全氮 TN/g·kg ⁻¹	碳/氮	全磷 TP/g·kg ⁻¹	全钾 TK/g·kg ⁻¹
互花米草	390.7	9.76	40.03	0.64	8.03
羊粪	339.1	20.86	16.26	5.55	6.22

表 4 腐熟堆料基本性质
Table 4 The basic properties of maturity compost

有机碳 TOC/g·kg ⁻¹	全氮 TN/g·kg ⁻¹	全磷 TP/g·kg ⁻¹	全钾 TK/g·kg ⁻¹	蔗糖转化酶/mg glucose·g ⁻¹ ·d ⁻¹	微生物量/CFU·g ⁻¹
34.31	2.36	0.11	0.58	30.36	8.37E+09

表 5 供试土壤理化性质
Table 5 Physical and chemical properties of test soils

容重/g·cm ⁻³	含水率/%	pH	有机碳 TOC/g·kg ⁻¹	全氮 TN/mg·kg ⁻¹	全磷 TP/mg·kg ⁻¹	全钾 TK/mg·kg ⁻¹	含盐量/g·kg ⁻¹
1.723	19.38	7.8	5.7	71.549	1.403	19.603	3.42

料,适当搅拌,浸泡 10 min 后从底部将水缓慢放出,水分沥干后即可备用于土壤改良。将 150 kg 土和约 30 kg 浸泡过的米草腐熟堆料混合均匀后分置于 3 个平行处理盆中,对照盆放入 50 kg 混合均匀的土,并于 2009 年 5 月均匀播种田菁种子(每盆 50 粒),放置在自然环境中生长。期间配合以传统的种养措施(和对照同步),包括除草灌溉,并在田菁生长季施加 2 次有机肥(每次每盆 1 kg),待 11 月份结籽收割植物。

1.4 分析方法

采用德国 Elementar 公司 Vario EL III 元素分析仪测定互花米草不同部位中 C、N 元素的含量。采用意大利 MileStone s.r.l.公司的 ETHOS E 微波消解仪消解互花米草各个部位,消解液稀释后采用美国 Jarrell-Ash corn-pany 的 J-A1 100 型电感耦合等离子体直读光谱仪(ICP-AES)测定微波消解液中的 P、K、Na。

每次翻堆后进行多点采样,力求样品具有代表性。E4/E6 测定:称取 5.00 g 堆料鲜样,加入 50 mL 蒸馏水,在室温下于 200 r·min⁻¹ 振荡 1 h 后,离心过滤,取滤液分别于 465 nm 和 665 nm 处比色测定得 E4/E6^[9]。

为研究堆肥腐化后互花米草的脱盐效率,取堆肥结束时干样 5.00 g,加入 50 mL 蒸馏水分别浸提 10 min 和 2 h。以未堆肥互花米草为对照,采用哈希 hydrolab 多参数仪分别测定其浸取液的电导率,并换算成含盐量。堆肥样品预处理和其余指标测定方法同土壤。

盆栽土壤于 2009 年 11 月底进行采样,去除表层 1~2 cm 土层,采用米字型布点采样,采取 5 份土样将其混合均匀后分成 3 份,每份待测土样再分为两份,一份置于 4℃冰箱用于土壤微生物指标测定,另一份迅速阴凉处风干、去杂、研磨、过 60 目筛,装入自封袋用于理化性质测定。

土壤容重采用环刀法测定;土壤含盐量按 1:5 土水比浸泡,水相采用 Hydrolab 多参数测定仪测电导

率,并换算成土壤含盐量;总有机碳(TOC)采用岛津有机碳/总氮测定仪 TOC-VPN 测定;TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;TP、TK 测定同互花米草相应元素测定;蔗糖转化酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[20];土壤 β-糖苷酶活性测定:土壤 β-糖苷酶活性的测定采用对硝基苯葡萄糖苷法。以对硝基苯-β-D-葡萄糖苷为底物,在 37℃条件下恒温培养 1 h,410 nm 下比色法测定反应生成的产物对硝基酚(p-nitrophenol, PNP)的量/(mg PNP·kg⁻¹土·h⁻¹);微生物量测定采用稀释平板法-混菌法分离、计数;植物生物量采用恒温干燥烘干法测定。

1.5 数据处理

统计分析采用 SPSS13.0 软件完成,对数据进行 ANOVA 方差分析,盆栽试验数据进行 LSD 多重比较,绘图由 Origin 7.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 互花米草不同部位营养成分的季节差异

由图 2 可见,互花米草根部分与茎部 TC 含量季节动态表现为:夏秋季较高,冬春季较低。根部 TC 含量春季最低为 247.10 g·kg⁻¹,夏季最高为 325.55 g·kg⁻¹;茎部 TC 含量春季最低为 316.84 g·kg⁻¹,秋季达到最高值为 390.70 g·kg⁻¹。叶部 TC 含量季节动态表现为:春秋季较高,夏冬季较低,秋季 TC 含量最高为 399.80 g·kg⁻¹,冬季最低为 318.40 g·kg⁻¹。互花米草在不同季节各部位的 TC 含量基本呈现:秋季含量较高,根部 TC 含量最低,茎叶 TC 含量相对较高。

互花米草体内不同部位 TN 含量随着季节的更替含量呈逐渐下降趋势。根部和茎部 TN 含量春季最高分别为 9.28 g·kg⁻¹ 和 13.08 g·kg⁻¹,后逐渐降低,冬季最低。叶部的 TN 含量春季最高为 16.96 g·kg⁻¹,冬季 TN 含量降至最低为 8.08 g·kg⁻¹。互花米草在不同季节各部位的 TN 含量变化基本呈现春季较高,夏秋含量较为接近,冬季最低的特点,且叶>茎>根。

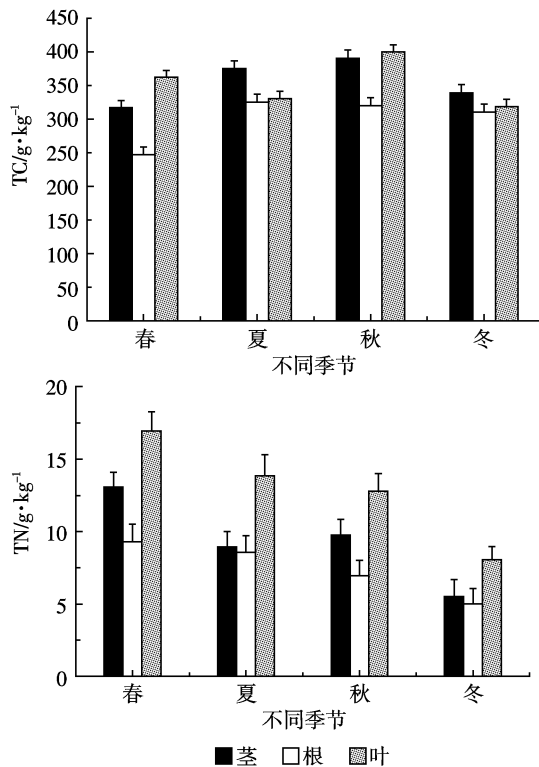


图2 互花米草不同部位 TC 和 TN 含量的季节变化

Figure 2 Seasonal variations of TC and TN in different part of *Spartina alterniflora*

由图3可见互花米草体内不同部位 TP 含量季节动态总体趋势较为接近,随着生长期的增长,各部位内的 TP 含量逐渐降低。茎部 TP 秋季含量最低为 $0.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。叶部 TP 春季含量最高为 $2.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。互花米草在不同季节各部位的 TP 含量变化基本呈现:叶>根>茎。

图3显示互花米草体内各部位 TK 含量季节动态总体趋势没有明显规律。春季叶部 TK 含量最高为 $12.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 冬季叶部 TK 含量降至最低为 $2.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根部 TK 含量冬季最低为 $3.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秋季含量最高为 $8.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。茎部 TK 含量季节变化不大。互花米草在不同季节各部位的 TK 含量变化基本呈现:夏秋季叶部 TK 含量最高,秋冬季茎部 TK 含量最高,根部 TK 含量相对较低。

由图4可见互花米草体各部位 Na 含量季节动态,夏秋季较高,冬春季较低。根部 Na 含量春季生长初期含量最低为 $5.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 夏季达到最大值为 $15.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秋冬季节含量下降。茎、叶部 Na 含量的季节动态与根部一致,秋季叶部 Na 含量较高达 $19.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表6为不同季节互花米草不同部位的 C:N 比值。

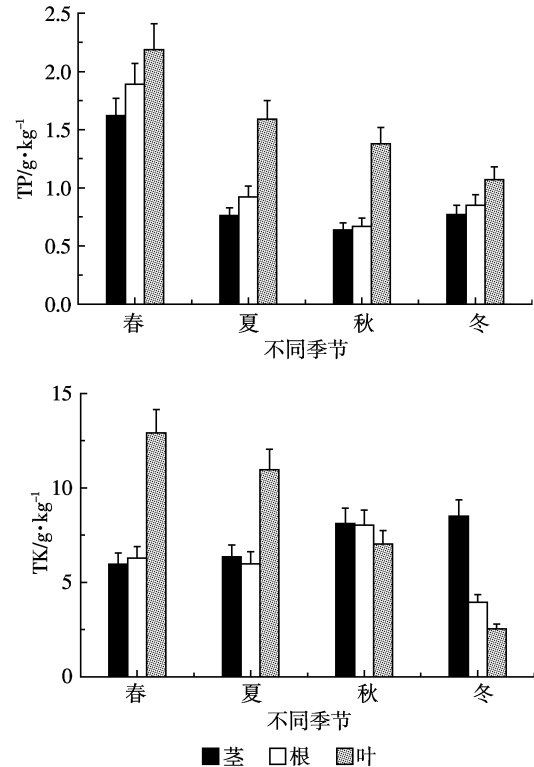


图3 互花米草不同部位 TP 和 TK 含量的季节变化

Figure 3 Seasonal variations of TP and TK in different part of *Spartina alterniflora*

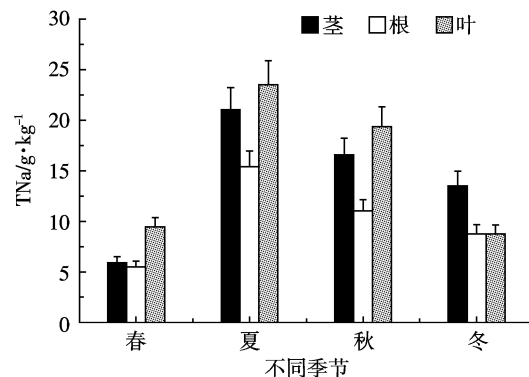


图4 互花米草不同部位 TNa 含量的季节变化

Figure 4 Seasonal variations of TNa in different part of *Spartina alterniflora*

表6 不同季节不同部位米草的 C:N 比值

Table 6 C/N ratio of different part and season of *Spartina alterniflora*

季节	茎	根	叶
春	24.22	26.62	21.35
夏	41.92	38.03	23.82
秋	40.03	45.99	31.25
冬	61.35	61.88	39.40

春季最低,适合堆肥的比例,但由于生物量太低不适合收割堆肥。秋季茎部的比例约为 40,较符合堆肥的要求,且此时生物量较大,含盐率较低,是收割堆肥的良好选择。同时贫瘠土壤含氮量一般较低,秋季米草茎部 TN 含量较高,含氮量较高的秸秆还田也更有利于提高土壤肥力。因此,从堆肥和还田两方面考虑,秋季互花米草秸秆均较为理想。

2.2 堆肥对互花米草/羊粪混合堆料腐殖化和脱盐效率的影响

根据 2.1 的结果,收割秋季的互花米草,并初步除叶和去根,切碎后和羊粪、复合菌剂混合堆肥。由图 5 可见,堆肥过程中 E4/E6 总体呈上升后略下降趋于稳定的趋势。堆肥初期,堆料水浸提液的 E4/E6 上升

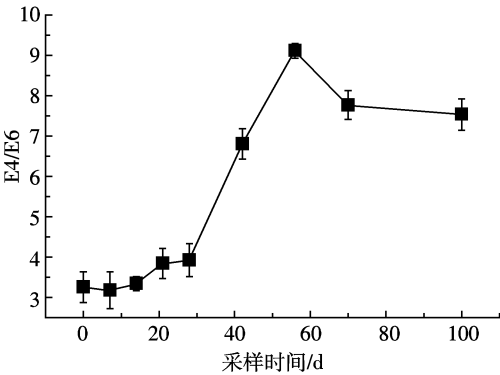


图 5 堆肥过程中 E4/E6 的变化
Figure 5 Variation of E4/E6 ratio during the composting

速率较快,在 54 d 时达到峰值 9.21,为初始值的 2.75 倍。进一步观察发现了进入自然通风后堆料的 E4/E6 值有所下降,基本维持在 7.5~8 之间。这表明经 54 d 强制通风好氧堆肥后堆料已显著腐殖化,随后进一步趋向稳定。

由表 7 可见,生互花米草与腐熟堆料水浸提 10 min 后浸提液含盐量分别为 2.37、8.87 g·kg⁻¹,浸提 2 h 后分别为 7.93、10.84 g·kg⁻¹。假设浸提 2 h 后盐分可全部浸出,经过堆肥腐熟后 10 min 洗脱盐率达 81.83%,较未堆肥的 29.87%大幅提高。这表明堆肥后米草中的盐分较易流失,经初步水洗就可脱去大部分盐分,还田后不会导致盐分在土壤中的聚集。

2.3 腐熟互花米草/羊粪混合堆料对贫瘠土壤的改良效应分析

将腐熟的混合堆料经水洗后用于盆栽改良崇明东滩的盐碱土壤,并配合以传统的种养措施(和对照同步),除草灌溉,并在田菁生长季施加一定量的有机肥,8 个月后对土壤和所种植的植物进行全面分析,结果见表 8、表 9。

由表 8 可见,投加腐熟堆料处理的 3 个平行样的土壤容重较对照处理降低 11.9%,下降程度显著($P<0.05$)。土壤有机碳及 TN、TP 较对照大幅提高,增加显著($P<0.05$)。TK 含量略有上升,土壤含盐量略有降低,但统计结果表明无显著差异。

表 7 生互花米草与腐熟堆料脱盐效率比较

Table 7 Comparison desalination efficiency of *Spartina alterniflora* and compost

试验材料	浸提时间				10 min 洗脱盐率/%
	10 min		2 h		
	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	含盐量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	含盐量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	
生互花米草	962.3±35.8	2.37±0.05	3 322.3±102.5	7.93±0.12	29.87±1.32
腐熟堆料	3 720±95.6	8.87±0.12	4 555±123.6	10.84±0.16	81.83±2.36

表 8 不同处理土壤理化性质的变化

Table 8 Variation of physical and chemical properties of soil in different treatment

	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	含盐量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
还田处理	1.469±0.12a	8.6±0.3a	283.56±8.5a	2.30±0.15a	23.70±1.25a	2.78±0.12a
对照	1.667±0.13b	5.2±0.2b	82.60±5.6b	1.50±0.08b	18.01±1.02a	3.35±0.15a

注:有相同字母标识说明不同处理间无显著差异(LSD 法, $P>0.05$),下表同。

表 9 不同处理土壤微生物活性及植物生物量的变化

Table 9 Variation of microbiological activity of soil and plant biomass in different treatment

	微生物量/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	β -糖苷酶/ $\text{mg}(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2)\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	蔗糖转化酶/ $\text{mg glucose}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	植物生物量/g
还田处理	2.10E+09±3.0E+08a	3.85±0.26a	12.99±1.20a	149.31±9.2a
对照	1.38E+08±2.5E+07b	1.60±0.15b	5.26±0.78b	39.96±1.6b

由表9可见,投加腐熟堆料处理的3个平行样的土壤微生物量显著增加,蔗糖转化酶活性和 β -糖苷酶与对照相比差异显著($P<0.05$)。植物生物量为对照的3.74倍,且差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 互花米草适合堆肥的季节和部位选择

堆肥原料C/N对微生物的生长有重要的作用,因此直接影响堆肥产品品质^[21]。C/N比过高,微生物增殖时由于氮不足,生长受到限制,堆体温度降低,有机物降解速度变得缓慢,堆肥时间变长;C/N比过低,可利用的碳完全被利用,而过量的氮会以氨气形式损失,导致堆料的肥力丢失。国内外普遍认为堆料初始C/N在25:1~35:1范围内比较适宜。由表3可见,春秋季米草茎部、秋季米草叶部C/N较为适合,但由于秋季米草叶部含盐量太高不适合堆肥还田,春季米草尚处于生长初期,生物量较少。另外,贫瘠土壤的含氮量普遍较低,因此施加氮肥是贫瘠土壤改良的重要手段^[22],因此从还田角度考虑,秋季米草茎部TN含量较高,还田也有利于补充土壤氮素。因此综合考虑,可采用秋季的米草初步除去含盐量较高的叶后作为堆肥还田的原料。故本研究中堆肥的原料即为2008年秋季采集于崇明东滩的互花米草秸秆。

3.2 堆肥对互花米草结构和稳定性的影响

堆料浸提液中腐植酸在波长465 nm和665 nm处具有特异吸收峰,两处吸光度比值为E4/E6,一般可表征堆料的腐殖化和稳定化程度^[23]。堆料的E4/E6测定方法有水浸提和碱浸提两种,前者萃取出的物质主要是一些通过微生物生化作用新形成的小分子腐植酸(主要是溶于水和稀酸的富里酸,在波长465 nm处有特异性吸收峰),而不溶于水的大分子腐植酸(主要是胡敏酸,在波长665 nm处有特异性吸收峰)较少;后者提取出的物质除了富里酸外,还含有大量结合态的大分子腐植酸^[23-24]。随着堆肥的进行,纤维素类物质不断转变为小分子的腐植酸(富里酸),同时也进一步转化为更稳定的大分子腐植酸(胡敏酸)^[24]。本文采用水浸提法提取腐植酸,因此浸提液中大分子的腐植酸(胡敏酸)较少,主要是小分子的富里酸,E4/E6比值主要由小分子富里酸的浓度变化确定。图5结果显示互花米草秸秆在54 d堆肥过程中其水浸提的E4/E6值呈上升趋势,说明在强制通风的条件下,大量小分子的腐植酸不断生成,表明已初步腐殖化。进入自然通风阶段后,随着腐解时间的延长,E4/E6呈

下降趋势,表明堆料中的纤维素类物质转化为小分子腐植酸的过程已显著趋缓,但小分子腐植酸还继续转化为大分子的腐植酸,堆料中腐殖质的缩合度和稳定性进一步提高^[25-26],此时还田更有利于增加土壤的腐殖质,改善土壤结构^[14]。而对于碱浸提,由于浸提液可有效萃取大分子的腐植酸(胡敏酸),因此随着堆肥的进行,堆料中大分子腐植酸的不断积累,E4/E6往往呈不断下降趋势,因此两种浸提方法所得出的堆料E4/E6值的变化趋势可能有差异,但其内涵相同。

互花米草的高含盐量是限制其秸秆堆肥还田的重要因素。高含盐既抑制了微生物对互花米草的分解和稳定,一旦还田后也会导致盐分在土壤中的聚集。表4结果表明互花米草经过堆肥处理,盐分易于洗脱。这可能与互花米草的内部结构被破坏有关。杨世关等^[27]对互花米草秸秆生物结构的电镜观察结果发现,互花米草维管束组织和薄壁细胞的邻角区可以作为微生物和酶进入原料结构内部的通道。在堆肥过程中会产生大量的耐盐微生物,这些微生物和分泌的酶进入米草结构内部对其进行矿化作用^[28],从而破坏了米草内部的纤维结构,使大分子有机物质分解产生大量小分子物质,导致内部的盐分易洗脱。因此堆肥后的米草秸秆水洗后盐分即可快速流失,此时还田不会导致土壤中盐分的聚集。

3.3 互花米草/羊粪混合堆料还田对土壤理化性质和微生物活性的影响

黄继川等^[29]施用玉米秸秆堆肥还田发现施用玉米秸秆堆肥处理相比于其他处理土壤有机质含量最高,较不施肥提高69.74%,差异显著。顾兵等^[30]研究施用不同量的绿化植物废弃物堆肥后,土壤TN、TP都有了很大的提高。本试验结果发现,施用互花米草/羊粪混合堆肥能够显著提高土壤有机质含量(提高39.53%),TN、TP含量也显著增加($P<0.05$)。这表明与其他农作物秸秆堆料相比,投加腐熟的互花米草/羊粪混合堆料还田也可提高土壤肥力,这是由于互花米草与羊粪具有丰富的有机质及养分,且互花米草经堆肥稳定后,可供给有效养分含量增加。土壤容重是土壤空隙度和通透性的综合表现,土壤通气透水条件良好能促进土壤微生物活动,从而增强土壤养分的转化和供应,有利于作物生长^[31]。高新昊等^[32]添加鸡粪和尿素作为氮源对麦秸进行堆肥,发现施用不同腐熟度混合堆料后,土壤容重均下降,孔隙比均提高。黄继川等^[33]施用玉米秸秆堆肥进行生菜盆栽试验,发现施用堆肥后土壤真菌、细菌、放线菌增加,

微生物多样性提高,土壤相关酶活性显著提高。本研究中使用互花米草/羊粪混合堆料后,土壤容重较对照(仅施加有机肥)下降 11.9%,这可能是堆料中互花米草所起的作用,而微生物量、蔗糖酶、 β -糖苷酶活性和植物生物量均较对照有显著提高,这与黄继川和高新昊的结果相似。虽然互花米草的盐分较普通农业秸秆高,但在本次堆肥还田中,土壤的盐分仍有所下降,这主要是由于腐熟的互花米堆料含盐量已较低,且土壤通透性改善后,土壤中的盐分较对照更易流失。

上述分析表明互花米草/羊粪混合堆肥还田对于土壤的改良效应和普通农业秸秆没有显著差异,土壤含盐量也没有上升,甚至有所下降。因此互花米草/羊粪混合堆肥还田是一种改善土壤理化性质,提高土壤肥力,增加作物产量的可行方法。

4 结论

(1)不同季节不同部位互花米草碳及营养元素含量有明显差异,综合考虑,秋季互花米草秸秆较适合作为原料堆肥。

(2)强制通风堆肥 54 d 后,堆料水浸提液的 E4/E6 大幅提高,堆料已初步腐殖化,后续自然通风堆肥后,水浸提液的 E4/E6 趋于下降,表明堆料进一步趋于稳定;腐化后互花米草/羊粪混合堆料脱盐效率得到显著提高,适宜还田。

(3)互花米草/羊粪腐熟混合堆料还田后,土壤结构得到改善,土壤养分提高,土壤微生物活性增强,植物生物量显著优于对照,其对土壤的改良效果和普通农业秸秆无显著差异。

(4)互花米草/羊粪混合堆肥还田用于贫瘠土壤改良基本可行,是互花米草控制与资源化的一个可选择的途径。当然大规模应用前还需经过中试规模的长期验证,目前该工作正在进行之中。

参考文献:

- [1] 赵广崎, 张利权, 梁 霞. 芦苇与入侵植物互花米草的光合特性比较[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1604-1611.
ZHAO Guang-qi, ZHANG Li-quan, LIANG Xia. A comparison of photosynthetic characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and an indigenous plant *Phragmites australis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1604-1611.
- [2] 钦 佩, 安树青, 颜京松. 生态工程[M]. (第二版), 南京: 南京大学出版社, 2002.
QIN Pei, AN Shu-qing, YAN Jing-song. *Ecological engineering* [M]. (Second Edition), Nanjing: Nanjing University Press, 2002.
- [3] 唐廷贵, 张万钧. 论中国海岸带大米草生态工程效益与“生态入侵”[J]. 中国工程科学, 2003, 5(3): 15-20.
TANG Ting-gui, ZHANG Wan-jun. A discussion of ecological engineering benefits of *Spartina spp* and its ecological invasion [J]. *Engineering Science*, 2003, 5(3): 15-20.
- [4] Zhang Y H, Ding W X, Luo J F. et al. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C4 plant *Spartina alterniflora* [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(10): 1712-1720.
- [5] 李加林. 互花米草海滩生态系统及其综合效益: 以江浙沿海为例[J]. 宁波大学学报(理工版), 2004, 17(1): 38-42.
LI Jia-lin. *Spartina alterniflora* tidal land ecosystem and its integrative benefits: A case study of Jiangsu and Zhejiang coast[J]. *Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition)*, 2004, 17(1): 38-42.
- [6] 陈中义, 李 博, 陈家宽. 互花米草与海三棱藨草的生长特征和相对竞争能力[J]. 生物多样性, 2005, 13(2): 130-136.
CHEN Zhong-yi, LI Bo, CHEN Jia-kuan. Some growth characteristics and relative competitive ability of invasive *Spartina alterniflora* and native *Scirpus mariqueter*[J]. *Chinese Biodiversity*, 2005, 13(2): 130-136.
- [7] Ma Z J, Li B, Jing K, et al. Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbirds? A case study on Chongming Island, China[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2004, 13: 333-350.
- [8] 平 原, 张利权. 物理措施控制互花米草的长期效果研究[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 32-35.
PING Yuan, ZHANG Li-quan. Study on long-term effects of physical control measures on *Spartina alterniflora*[J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(1): 32-35.
- [9] 李继红, 杨世关, 郑 正, 等. 互花米草厌氧发酵产沼气初步试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1254-1258.
LI Ji-hong, YANG Shi-guan, ZHENG Zheng, et al. Pilot study on anaerobic digestion of *Spartina alterniflora* to produce biogas[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 1254-1258.
- [10] 朱洪光, 陈小华, 唐集兴. 以互花米草为原料生产沼气的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 201-204.
ZHU Hong-guang, CHEN Xiao-hua, TANG Ji-xing. Pilot study on employing *Spartina alterniflora* as material for producing biogas by biogasification[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(5): 201-204.
- [11] Chen G Y, Zheng Z, Yang SG. et al. Improving conversion of *Spartina alterniflora* into biogas by co-digestion with cow feces[J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(11): 1415-1421.
- [12] 赵广琦, 李贺鹏. 上海地区外来植物互花米草的入侵现状与治理探讨[J]. 园林科技, 2008(1): 37-42.
ZHAO Guang-qi, LI He-peng. Management discussion and invasion of *Spartina alterniflora* in Shanghai area[J]. *Gardening Technology*, 2008(1): 37-42.
- [13] 申源源, 陈 宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 25(19): 291-292.
SHEN Yuan-yuan, CHEN Hong. The progress of study on soil improve-

- ment research with straw stalk[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 25(19):291-292.
- [14] 韩义飞. 浅谈秸秆还田应用现状、效益及方法[J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(10):68-69.
- HAN Yi-fei. Discussion of benefits and methods and application of the straw returning to soil[J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2010, 16(10):68-69.
- [15] 陈广银, 王德汉, 吴艳, 等. 落叶堆肥过程中有机物的动态变化[J]. *华南农业大学学报*, 2007, 28(2):1-4.
- CHEN Guang-yin, WANG De-han, WU Yan, et al. Dynamic transformation of organic matter during thermophilic composting of litter[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2007, 28(2):1-4.
- [16] Mahmoud E, Ibrahim M, Robin P, et al. Rice straw composting and its effect on soil properties[J]. *Compost Science and Utilization*, 2009, 17(3):146-150.
- [17] Stoffella PJ, Graetz DA. Utilization of sugarcane compost as a soil amendment in a tomato production system[J]. *Compost Science and Utilization*, 2000, 8(3):210-214.
- [18] Watanabe T, Man LH, Vien DM, et al. Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(6):754-763.
- [19] 张福锁, 龚元石, 李晓林. 土壤与植物营养研究新动态[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995:319-349.
- ZHANG Fu-suo, GONG Yuan-shi, LI Xiao-lin. New trends of soil and plant nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995:319-349.
- [20] 姚槐应, 黄昌勇, 等. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- YAO Hui-ying, HUANG Chang-yong, et al. Soil microbial ecology and experiment technology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [21] Sadaka S, El-Taweel A. Effects of aeration and C:N ratio on household waste composting in Egypt[J]. *Compost Science & Utilization*, 2003, 11(1):36-41.
- [22] 许晓平, 冯浩, 赵西宁, 等. 土壤改良剂与氮肥配施对玉米生长及其养分含量的影响[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(3):139-142.
- XU Xiao-ping, FENG Hao, ZHAO Xi-ning, et al. Effect of coupling of soil amendments and nitrogen fertilizer on the growth and nutrient content of corn[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 17(3):139-142.
- [23] Zbytniewski R, Buszewski B. Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: Chemical and spectroscopic properties[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(4):471-478.
- [24] 秦莉, 李玉春, 李国学, 等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12):192.
- QIN Li, LI Yu-chun, LI Guo-xue, et al. Maturity indexes and operational parameters during composting municipal solid waste[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12):192.
- [25] 鲍艳宇, 颜丽, 娄翼来, 等. 鸡粪堆肥过程中各种碳有机化合物及腐熟度指标的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4):822-823.
- BAO Yan-yu, YAN Li, LOU Yi-lai, et al. Dynamics of organic carbons during composting of chicken manure and evaluation of maturity parameters[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(4):822-823.
- [26] 文启孝, 等. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- WEN Qi-xiao, et al. The research method of soil organic[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984.
- [27] 杨世关, 李继红, 郑正, 等. 互花米草厌氧生物转化可行性分析与试验研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5):196-199.
- YANG Shi-guan, LI Ji-hong, ZHENG Zheng, et al. Feasibility analysis and experiment of anaerobic digestion of *Spartina alterniflora*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(5):196-199.
- [28] 刘白贵. 闽江河口湿地芦苇、短叶荇菜和互花米草三种植物枯落物分解研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- LIU Bai-gui. Litter decomposition of *Phragmites australis*, *Cyperus malaccensis* and *Spartina alterniflora* in the wetland of Minjiang River Estuary[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2008.
- [29] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 玉米秸秆堆肥处理对芥菜品质及土壤肥力的影响[J]. *广东农业科学*, 2009, 12:88-91.
- HUANG Ji-chuan, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, et al. The impact of applying corn-straw compost on quality of mustard and soil fertility[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009, 12:88-91.
- [30] 顾兵, 吕子文, 方海兰, 等. 绿化植物废弃物堆肥对城市绿地土壤的改良效果[J]. *土壤*, 2009, 41(6):940-946.
- GU Bing, LV Zi-wen, FANG Hai-lan, et al. Effects of green plant waste compost on soil remediation in urban greenbelts[J]. *Soils*, 2009, 41(6):940-946.
- [31] 吴婕, 朱钟麟, 郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(2):192-195.
- WU Jie, ZHU Zhong-lin, ZHENG Jia-guo, et al. Influences of straw mulching treatment on soil physical and chemical properties and crop yields[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19(2):192-195.
- [32] 高新昊, 刘兆辉, 张志斌, 等. 不同腐熟程度麦秸堆肥在温室番茄栽培中应用效果研究[J]. *土壤*, 2009, 41(2):253-257.
- GAO Xin-hao, LIU Zhao-hui, ZHANG Zhi-bin, et al. Wheat straw compost as soil amendment in greenhouse tomato production system[J]. *Soils*, 2009, 41(2):253-257.
- [33] 黄继川, 彭智平, 李文英, 等. 施用堆肥对生菜品质和土壤生物活性及土壤肥力的影响[J]. *热带作物学报*, 2010, 31(5):705-710.
- HUANG Ji-chuan, PENG Zhi-ping, LI Wen-ying, et al. The impact of applying compost on the quality of lettuce, soil biological activity and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(5):705-710.