

生物竹炭改良崇明滩涂盐渍化土壤的试验研究

张 瑞¹, 杨 昊¹, 张芙蓉¹, 唐东梅¹, 江 洪², 蔡保松^{1*}, 黄丹枫^{1*}

(1.上海交通大学农业与生物学院; 农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240; 2.多利农庄, 上海 200240)

摘 要:采用小白菜温室盆栽试验方法,研究了生物竹炭对盐渍化土壤的修复和对小白菜生长及其品质的影响。试验共设 4 个处理:对照、有机肥、生物竹炭、有机肥+生物竹炭。结果表明:生物竹炭有效降低了土壤的电导率,有机肥显著提高了土壤的电导率,生物竹炭与有机肥配施对土壤电导率无影响;生物竹炭使土壤中的总碳、有机质提高,促进了有效磷、速效钾的释放,降低了土壤总可溶性氮的含量,尤其使铵态氮、硝态氮含量显著降低,但土壤酸碱性和含水率无明显变化;生物竹炭处理显著提高了小白菜的株高、生物量和可溶性糖含量,降低了可食用部分的硝酸盐含量。盆栽试验结果显示,生物竹炭具有改良盐渍化土壤、促进小白菜产量增加和品质提高的作用。

关键词:生物竹炭;盐渍化土壤改良;小白菜;生物量;品质

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)12-2404-08 doi:10.11654/jaes.2014.12.018

Effects of Bamboo Biochar on Coastal Saline Soils of Chongming Island, Shanghai

ZHANG Rui¹, YANG Hao¹, ZHANG Fu-rong¹, TANG Dong-mei¹, JIANG Hong², CAI Bao-song^{1*}, HUANG Dan-feng^{1*}

(1.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University; Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China; 2.Tony's Farm, Shanghai 200240, China)

Abstract: A greenhouse pot trial was conducted to evaluate the changes in salinity and other physicochemical properties of soil, and biomass and quality of pakchoi after bamboo biochar additions. Four treatments, bamboo biochar, organic fertilizer, organic fertilizer plus bamboo biochar and control (no fertilizer or biochar added), were employed. The electrical conductivity (EC) of soil was decreased significantly by bamboo biochar amendments, but increased by organic fertilizer. Organic fertilizer plus bamboo biochar did not significantly affect EC. Applying bamboo biochar significantly increased the total carbon content, organic matter, available phosphorus and available potassium in soil. On the contrary, biochar additions significantly decreased total soluble nitrogen, especially ammonium nitrogen and nitrate nitrogen. Soil pH and moisture did not vary among treatments. Bamboo biochar profoundly increased pakchoi height, biomass and soluble sugar contents, and improved its overall quality, but significantly decreased nitrate concentration in edible parts. These results show that applying bamboo biochar could improve coastal saline soil and in turn increase pakchoi yield and quality.

Keywords: bamboo biochar; saline soil improvement; pakchoi; biomass; quality

上海市分布着约 630 km² 的滨海盐渍土, 占全市土壤资源的 15% 以上, 而且随着沿海滩涂的淤涨和围垦, 这部分土壤资源还在不断扩大^[1]。盐渍化土壤对植

物的危害主要有两个方面: 使植物根系吸水困难和影响植物养分吸收。崇明岛地处长江口, 是我国第三大岛, 被誉为“长江门户、东海瀛洲”, 是世界上最大的河口冲积岛, 其功能定位之一就是形成以有机农产品、特色种养业和绿色食品加工业为主体的生态农业。然而, 由于崇明岛地处河口、海拔较低、地下水位高, 土壤发育不完全、土层浅、土壤有机质含量低, 盐分含量高, 严重影响当地的农业生产。崇明岛现有问题土壤总面积在 500 km² 以上^[2], 亟待寻求一种适用于崇明滩涂盐渍化土壤的高效改良剂。

收稿日期: 2014-07-04

基金项目: 上海市科委(12231205103); 上海市农委(沪农科攻字(2012)第2号); SJTU-UNSW 联合研究与发展基金(13X120020003); 上海市园艺学重点学科培育与建设项目

作者简介: 张 瑞(1988—), 女, 河南方城人, 在读硕士, 从事园艺植物生理生态研究。E-mail: 281157917zr@sjtu.edu.cn

* 通信作者: 蔡保松 E-mail: czstl@sjtu.edu.cn

黄丹枫 E-mail: hdf@sjtu.edu.cn

目前,国内外对盐碱地的改良方法大致有物理^[3]、化学^[4]、生物^[5]、农业^[6]及水利工程改良^[7]五种措施。水利工程措施投入大;种植盐生植物改良盐碱地,投资小,可持续^[8],但见效慢。生物炭是指诸如木材、粪便、树叶等生物质在缺氧或者无氧条件下经高温裂解所得到的固体产物^[9],它的兴起与土壤管理和碳的封存密切相关^[10]。生物炭因具有有机质丰富、疏松多孔、比表面积大、表面活性强、吸附性以及吸水性强等特性^[11],有利于农田土壤固持养分^[12],提高养分利用率^[13],改善微生物环境^[14],从而达到提高土壤质量进而促进作物增产的效果。已有研究表明,生物炭对酸性土壤^[15-16]、白浆土^[17]、黄土高原典型土壤^[18]和盐渍化土^[19-20]均有较好的改良效果,而把生物炭作为土壤改良剂应用到滨海盐渍化土壤的研究鲜有报道。

本研究以上海崇明岛滩涂的盐渍化土壤为研究对象,选择上海主要的叶菜种类——小白菜,依据土壤基本养分、酸碱性、电导率(水溶性盐分状况)的变化和小白菜的生物量及其品质等指标对改良效果进行综合评价,以期生物竹炭在改良滩涂盐渍化土壤上的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于上海市崇明县中兴镇北七漊低碳农业园区(31°29'N,121°46'E),属于围垦滩涂的盐渍化土壤,没有种植历史。试验地面积 80 m×80 m,于 2012 年 9 月将表层 0~40 cm 的土壤堆起来并添加作物秸秆和禽畜粪便等进行农业措施改良,培肥土壤,于 2013 年 7 月表土回填。2013 年 7—9 月种植绿肥(玉米),将绿肥地上部分粉碎回田,翻耕均匀。于 2013 年 11 月 25 日,取试验田耕作层(0~20 cm)的土壤(避免暴晒),全部过 2 mm 筛,混合均匀用于温室盆栽试验。供试土壤的理化性状见表 1。

1.2 试验材料

供试作物:小白菜品种为“华王”。

供试肥料:上海胜维有限公司生产的精制有机肥,生物竹炭由时科生物科技(上海)有限公司提供,350~550 ℃下限氧热裂解炭化制得。生物竹炭粉碎过 2 mm 筛备用。其特性如表 2。

表 2 供试生物竹炭和有机肥的理化参数

Table 2 Physicochemical properties of bamboo biochar and organic fertilizer

项目 Item	pH	总碳 TC/ %	总氮 TN/ %	全磷 TP/ %	全钾 TK/ %	灰分 Ash/ %
生物竹炭	8.51	70.2	2.48	0.29	2.85	18.56
有机肥	8.80	56.8	2.62	0.71	17.53	—

1.3 试验设计

试验在上海交通大学农业工程训练中心温室进行。设置 4 个处理:对照(CK);有机肥(F0);生物竹炭(B0);有机肥+生物竹炭(FB)。采用上口径 14 cm,底部直径 12 cm,高 14 cm 的试验盆,每盆装土 1.5 kg,每个处理均重复 5 次,每个处理 3 盆,共 60 盆(4 个处理×5 次重复×3 盆)。于 2013 年 12 月 1 日将有机肥和生物炭分别按照 15 t·hm⁻² 和 1.5 t·hm⁻² 的用量一次性施入土壤,搅拌均匀后装盆,加水至田间最大持水量的 60%,经 15 d 土壤稳定后播种,每盆播 30 粒“华王”种子。待小白菜长到一叶一心期,每盆留苗 15 株。小白菜生长期间不追施任何肥料,但进行定量浇水和除虫工作。每次浇水后按一定顺序改变盆的位置,确保每盆作物都能得到均匀的光照。40 d 后采集小白菜地上部分和土壤样品,用于测定小白菜和土壤的理化性状。

1.4 测定项目和方法

将每个试验处理的 3 盆土壤混合均匀后取样,用于土壤理化分析。土壤 pH 测定,采用 pH 计,风干土壤按土液比 1:2 加 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 所得的浸提液^[21];电导率(EC)采用 EcoScan 便携式电导率仪(Eutech,新加坡)测定风干土,按土液比 1:5 加超纯水振荡 3 min 后的土壤悬浮液;采用碳氮硫元素分析仪(德国 Elementar Vario EL III)测定土壤全碳(TC)和全氮(TN)含量;总可溶性氮(TSN)含量采用碱性过硫酸钾氧化法测定,硝态氮、铵态氮含量采用全自动间断化学分析仪(法国 Smartchem 200)进行测定;土壤含水率的测定采用双极平衡法^[22],土壤有机质(OM)、有效磷(AP)和速效钾(AK)的测定参考鲍士旦^[23]的方法。

每盆取 3 株长势较为一致的小白菜,3 盆共取 9 株,用电子天平(0.000 1 g)测其鲜重,并于 108 ℃ 杀青 30 min,60 ℃ 烘箱烘至恒重,用电子天平(0.000 1

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil used in pot trial

pH	电导率 EC/μS·cm ⁻¹	总氮 TN/g·kg ⁻¹	总碳 TC/g·kg ⁻¹	有效磷 AP/mg·kg ⁻¹	速效钾 AK/mg·kg ⁻¹	有机质 OM/g·kg ⁻¹
7.67	1038	1.46	19.76	85.32	405.31	21.56

g)测其干重。其他小白菜用于植物组织叶绿素、硝酸盐、可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖含量的测定,测定方法均参考李合生^[24]的方法。所有测定项目均平行测定 3 次。

1.5 数据处理

采用 SPSS 18.0 进行差异显著性分析(LSD 法),数据处理和图表制作采用 Microsoft Excel 2007。

2 结果与分析

2.1 生物竹炭对土壤的影响

2.1.1 生物竹炭对土壤理化性质的影响

生物竹炭对土壤理化性质的影响如表 3 所示。与 CK 相比,F0、B0 和 FB 三个处理的含水率分别增加了 9.66%、11.82% 和 17.51%,处理间差异不显著。不同处理对土壤 pH 没有显著影响。

土壤浸出液电导率的数值能反映土壤含盐量的高低。与 CK 相比,B0 处理土壤的 EC 值显著降低了 9.16%,达到 912 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;而 F0 处理土壤的 EC 值显著升高了 21.81%,达到 1223 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;FB 处理土壤的 EC 值升高不显著。结果表明,短期内生物竹炭显著降低土壤可溶性盐含量,有机肥吸附了土壤中的可溶性盐,生物竹炭和有机肥配施对盐渍化土壤可溶性盐含量无显著作用。与 F0 相比,FB 处理土壤的 EC 值降低了 16.11%,达显著水平,表明生物竹炭较大的比表面积和纳米性能,减少了土壤溶液中可溶性盐含量的积累。

一般来说,土壤有机质含量的多少,是土壤肥力高低的一个重要指标。由表 3 可以看出,FB 处理土壤

有机质含量最高,F0 和 B0 次之,CK 最低,FB 与其他处理之间差异显著,F0 和 B0 两个处理与 CK 之间差异显著。表明生物竹炭和有机肥均显著增加了土壤有机质含量,且两者配施对土壤有机质具有协同效应。

由表 3 可知,不同处理间土壤速效养分含量差异显著。FB 与其他处理的土壤有效磷含量差异显著,表现为最高,F0 显著高于 B0 和 CK,B0 和 CK 之间差异不显著。与 CK 相比,F0 和 B0 处理土壤有效磷含量分别增加了 29.87%和 4.10%;分别与 F0 和 B0 相比,FB 处理土壤有效磷含量增加了 6.31%和32.63%。这表明有机肥显著提高了土壤中有效磷含量,生物竹炭与有机肥配施促进了土壤中有效磷的释放。与 CK 相比,F0、B0 和 FB 处理土壤速效钾含量分别增加了 48.55%、7.70%和 41.69%,处理间差异显著,表明生物竹炭和有机肥均显著提高了土壤速效钾的含量。与 F0 相比,FB 处理土壤中的速效钾含量显著降低了 2.77 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能是由于生物炭自身的吸附效应所致。

2.1.2 生物竹炭对土壤氮素形态的影响

由表 4 可知,FB 处理的土壤总碳含量最高,达到了 21.90 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,F0 和 B0 次之,CK 最低。与 CK 相比,F0、B0 和 FB 处理的土壤总碳含量分别增加了 1.43、1.51、2.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。F0 和 FB 处理的土壤总氮含量显著高于 CK,分别增加了 0.13、0.16 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,B0 和 CK 之间差异不显著。B0 处理土壤的碳氮比最高。以上结果表明生物竹炭对土壤总碳量和碳氮比的贡献大于有机肥,而有机肥对土壤总氮量的贡献大于生物竹炭,这与它们自身的成分关系密切。

土壤中的氮素以有机和无机化合物两种形态存

表 3 生物竹炭对土壤理化性质的影响
Table 3 Effects of bamboo biochar on soil physicochemical properties

处理 Treatment	含水率 Moisture/%	pH	电导率 EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	有机质 OM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 AP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 AK/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	11.59±2.38a	7.57±0.15a	1004±25b	21.52±0.95c	68.30±2.77c	403.67±14.21d
F0	12.71±1.49a	7.66±0.08a	1223±47a	23.43±0.76b	88.66±3.03b	599.66±20.93a
B0	12.96±2.13a	7.60±0.24a	912±20c	22.06±0.71b	71.06±1.03c	434.80±14.22c
FB	13.62±1.47a	7.70±0.12a	1026±39b	23.95±1.24a	94.26±3.44a	572.00±42.39b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters within a column mean significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

表 4 生物竹炭对土壤氮素形态的影响
Table 4 Effects of bamboo biochar on nitrogen forms in soil

处理 Treatment	总碳 TC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮 TN/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碳氮比 C/N	总可溶性氮 TSN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮 $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	19.25±0.22c	1.44±0.02c	13.39±0.18bc	355.46±56.08a	6.25±0.59b	11.45±2.39a
F0	20.68±0.53b	1.57±0.07ab	13.18±0.30c	225.21±22.28b	12.57±2.26a	9.69±0.35b
B0	20.76±0.40b	1.50±0.04bc	13.81±0.15a	251.99±35.68b	4.59±0.37c	8.68±0.52b
FB	21.90±0.48a	1.60±0.06a	13.66±0.19ab	159.72±39.99c	6.46±1.93b	8.77±0.64b

在。其中能够直接被植物吸收利用的氮是可溶性部分,即总可溶性氮,可以反映土壤近期内的氮素供应情况。表 4 显示,CK 处理土壤中总可溶性氮的含量最高,FB 最低,且均与 F0 和 B0 存在显著性差异;F0 和 B0 之间差异不显著。与 CK 相比,B0 处理的土壤中铵态氮和硝态氮含量分别降低了 26.56%和 24.19%,差异显著;与 F0 相比,FB 处理的土壤中铵态氮和硝态氮含量分别降低了 48.61%和 9.49%。这表明生物竹炭显著降低了土壤中铵态氮和硝态氮含量,而有机肥却在降低土壤硝态氮含量的同时明显提高了土壤中铵态氮的含量,这可能和有机肥的降解有关。

2.2 生物竹炭对小白菜生长的影响

2.2.1 生物竹炭对小白菜生物学性状的影响

由图 1 可知,与 CK 相比,F0、B0 和 FB 处理后小白菜的株高分别增长了 13.85%、16.91%和 18.03%,其中 FB 处理地上部植株最高,达到 7.33 cm(图 1a)。FB 处理的小白菜地上部鲜重高达 317.5 mg·株⁻¹,比 CK 高出 13.92%(图 1b);B0 处理的小白菜地上部干重最高达到了 5.8 mg·株⁻¹,比 CK 高出 36.10%(图 1c)。与 CK 相比,F0、B0 和 FB 处理后小白菜的叶绿素浓度分别提高了 120.52%、74.66%和 66.05%,其中

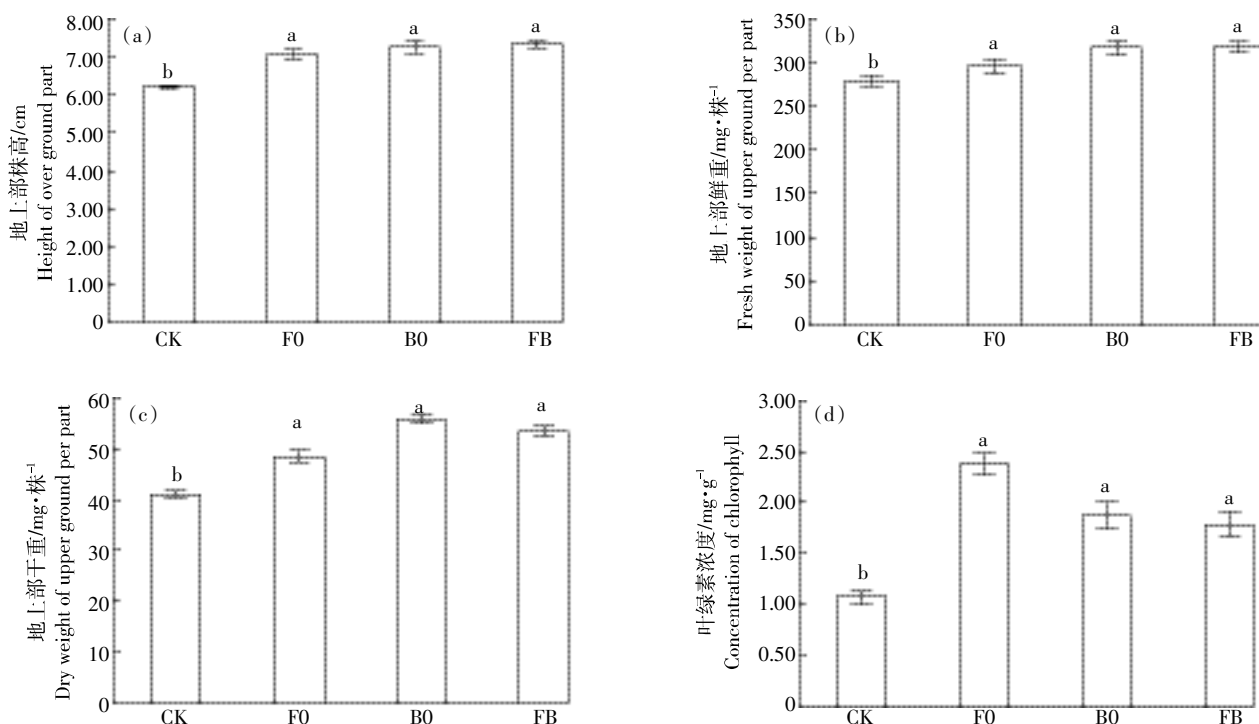
F0 处理的小白菜叶绿素浓度高达 2.38 mg·g⁻¹(图 1d)。小白菜的株高、地上部分的干鲜重和叶绿素浓度均表现为 CK 与其他处理之间差异显著,而 F0、B0 和 FB 彼此之间差异不显著。表明生物竹炭和有机肥均显著增加了小白菜的生物学性状,但两者的贡献相似。

2.2.2 生物竹炭对小白菜品质的影响

小白菜营养丰富,但极易富集硝酸盐。研究表明,人体内摄入的硝酸盐 80%~85%来自蔬菜^[25],叶菜类蔬菜尤为严重。由图 2a 可知,与 CK 相比,F0、B0 和 FB 处理后小白菜可食用部分硝态氮含量分别降低了 37.04%、53.28%和 33.73%,其中 B0 处理硝态氮含量最低(2.47 mg·g⁻¹),且与其他处理之间差异显著。与 F0 相比,FB 处理后小白菜可食用部分硝态氮含量降低了 8.08%,但差异不显著。

可溶性糖含量是影响小白菜口感的主要指标。与 CK 相比,F0、B0 和 FB 处理小白菜可食用部分可溶性糖含量分别提高了 54.56%、75.61%和 98.39%,但 F0 和 B0 之间差异不显著(图 2b)。

小白菜叶片组织的可溶性蛋白和游离氨基酸含量不仅是影响小白菜营养品质的主要指标,还是植物



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Different small letters mean significant difference between treatments at 0.05 level. The same below

图 1 生物竹炭对小白菜生物学性状的影响

Figure 1 Effects of bamboo biochar on pakchoi biological characteristics

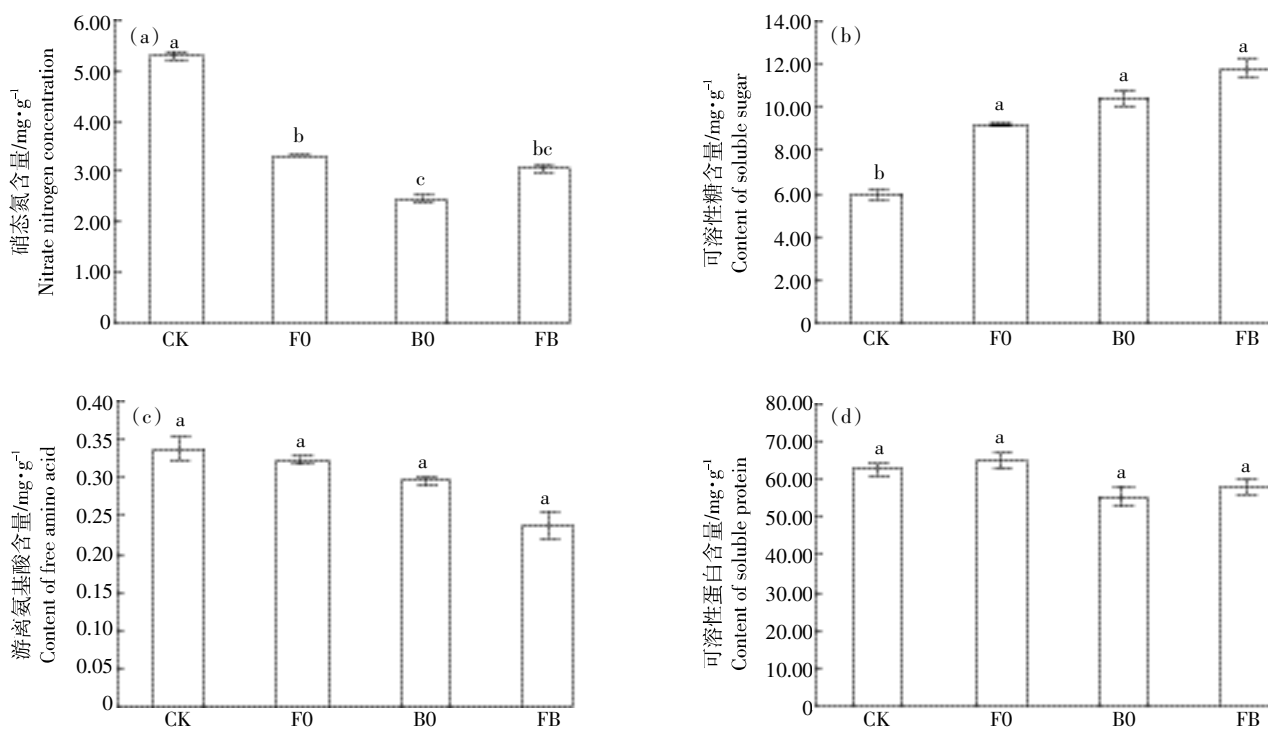


图2 生物竹炭对小白菜可食用部分品质的影响

Figure 2 Effects of bamboo biochar on quality of fresh edible parts of pakchoi

组织氮素累积的重要物质。CK 处理小白菜可食用部分的游离氨基酸含量最高,为 $0.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; F0 处理小白菜可食用部分中可溶性蛋白含量最高,为 $64.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。但各处理间小白菜可食用部分的游离氨基酸和可溶性蛋白含量差异不显著(图 2c、图 2d)。

从总体上看,生物竹炭显著降低了小白菜可食用部分的硝态氮含量,增加了可溶性糖含量,但对可溶性蛋白和游离氨基酸含量无显著影响。

3 讨论

崇明滩涂盐渍化土壤表层盐分随地下水位变化波动很大,土壤结构性差,肥力低,改良治理之前不能进行农业生产。生物炭密度低,能够有效降低土壤容重。与对照相比,生物竹炭对盐基离子具有吸附能力,并能够改善土壤的物理结构,从而降低了土壤溶液中的盐基离子浓度,使土壤的电导率显著降低,有效改善了作物生长环境。这在 Lashari 等^[19]和 Thomas 等^[20]的研究中也有提及。试验中有机肥的施入导致土壤的电导率增加,可能是土壤可溶性盐累积的原因,与刘媛媛等^[26]的研究结果一致,在施用有机肥的同时添加生物炭有可能消除这一现象。张祥等^[27]研究表明,生物炭能够提高酸性土壤的 pH 值,这在吴志丹等^[16]和袁金华等^[15]的研究中也有提到。但本试验中土壤的 pH

没有明显变化,这不符合生物炭显著改变土壤 pH 的特点^[28],其可能的三个原因是:其一,供试土壤呈中性,具有一定的酸碱缓冲能力;其二,生物竹炭的施用量偏低,每公顷土地用量仅 1.5 t ;其三,本试验中小白菜的生长期比较短,施加到土壤中的生物竹炭与土壤微环境的相互作用尚未形成充足的有机酸来中和盐土的碱性。本试验的周期相对较短,且盆栽试验在盐分淋溶上与田间试验存在差异,也没有受到地下水位变化的影响,因此生物竹炭降低滩涂盐渍化土壤中可溶性盐含量的效应有待于通过田间定位试验进一步验证。

生物竹炭的碳含量很高且不易被微生物降解,是增加土壤总碳和有机质含量的主要原因,曾爱等^[29]和陈红霞等^[30]的研究中都有论证。由于生物竹炭中磷的含量很低,会吸附土壤中的磷酸根,减少有效磷的淋溶,促进有机态磷的矿化,因此施入土壤后综合表现为显著增加了有效磷的含量。生物竹炭直接的供钾效应和间接减少钾的淋溶作用共同导致速效钾含量的增加,与曾爱等^[29]的结论一致。郭伟等^[31]研究华北高产农田连续 3 年施用生物炭,发现耕作层土壤的总可溶性氮(也称土壤有效氮)没有表现显著差异,而 Ding 等^[32]和 Lehmann 等^[33]的室内培养试验表明:生物炭通过阳离子交换而增强土壤中硝态氮、铵态氮的吸附,

从而使土壤有效氮质量分数大幅增加。这与本试验中生物竹炭施入土壤后引起土壤总氮增加而总可溶性氮显著降低不一致,可能有以下两方面原因:其一,生物竹炭为土壤微生物提供附着位点和栖息环境,促进有机氮的转化,进而被植物吸收利用,提高了氮素利用效率,减少了土壤中的有效氮;其二,生物竹炭提高了土壤中微生物态氮、氨基酸态氮和大分子蛋白质等不可溶的有机态氮的累积。无机态氮不仅是植物吸收利用的主要氮素形态,也是氮素淋失的主要形式。硝态氮是土壤次生盐渍化的诱因,对盐渍化的贡献率可达60%以上^[34],同时影响植物体内硝态氮的累积^[35-36]。生物竹炭施入土壤后无机态氮的含量显著降低,和杨帆等^[37]和 Cheng 等^[38]得到的结果一致,可能是生物竹炭的吸附、固持效应和土壤硝化细菌共同作用的结果。此外,生物竹炭的施入对土壤呼吸和土壤微生物群落及其多样性的影响,有待通过下一步的定位试验来研究。

植物生长情况能够反映土壤改良的综合效应。迄今为止,生物炭促进水稻^[39]、玉米^[40]、小麦^[41]、小白菜^[42-43]、菠菜^[44]、西红柿^[45-46]、芹菜^[46]等作物的生长已有报道。本研究结果表明,生物竹炭明显提高了小白菜地上部分生物量和株高。鉴于从蔬菜中摄取的硝酸盐对人体的危害之大,硝酸盐含量一直是蔬菜安全生产的一项重要指标。本试验中生物竹炭处理后小白菜可食用部分硝酸盐含量大幅下降,与对照相比差异显著,可能与生物竹炭能够控制氮肥释放、降低土壤硝态氮含量有关。可溶性糖含量的增加,改善了小白菜的口感。生物竹炭对小白菜可食用部分的可溶性蛋白和游离氨基酸含量等无显著影响,可能与生物竹炭的用量有关。总之,有待下一步试验探究不同生物竹炭用量对小白菜品质的影响。

4 结论

生物竹炭显著降低土壤的电导率,有机肥却显著提高土壤的电导率。两者配施,生物竹炭可消除有机肥增加土壤可溶性盐含量的效应。生物竹炭显著提高了土壤有效磷和速效钾的含量,在增加土壤碳固存、提高土壤养分有效性以及减少养分淋失方面的贡献大于有机肥。生物竹炭对崇明滩涂盐渍化土壤的pH没有影响,但增加了土壤的保水性能。

生物竹炭对小白菜生长的促进作用表现为小白菜株高、干鲜重和可食用部分可溶性糖均显著增加。其中,小白菜可食用部分硝酸盐含量的显著下降,是

生物竹炭对叶菜类蔬菜品质的一个巨大改善。

参考文献:

- [1] 魏凤巢,夏瑞妹,沈哲东.上海市滨海盐渍土改良技术的研究与实践[J]. 中国园林, 2008, 2: 85-89.
WEI Feng-chao, XIA Rui-mei, SHEN Zhe-dong. Research and practice on amelioration technologies of coastal saline soil in Shanghai[J]. *Chinese Landscape*, 2008, 2: 85-89.
- [2] 李玉奇. 设施盐渍化土壤离子互作及生态修复研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
LI Yu-qi. Studies on the ionic interaction of greenhouse soil salinity and the ecological remediation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [3] 纪永福, 蔺海明, 杨自辉, 等. 夏季覆盖盐碱地表面对土壤盐分和水分的影 响[J]. 干旱区研究, 2007, 24(3): 375-381.
JI Yong-fu, LIN Hai-ming, YANG Zi-hui, et al. Study on the effects of covering land on salt and moisture contents in saline or alkaline in summer[J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(3): 375-381.
- [4] 张江辉, 白云岗, 张胜江, 等. 两种化学改良剂对盐渍化土壤作用机制及对棉花生长的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 384-388.
ZHANG Jiang-hui, BAI Yun-gang, ZHANG Sheng-jiang, et al. Effects of two chemical improvers on mechanism of action on salinity[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3): 384-388.
- [5] 张俊伟. 盐碱地的改良利用及发展方向[J]. 农业科技与信息, 2011, 4: 63-64.
ZHANG Jun-wei. Amelioration, Utilization and development direction on saline soil[J]. *Agricultural Science and Technology and Information*, 2011, 4: 63-64.
- [6] 廉晓娟, 李明悦, 王 艳, 等. 滨海盐渍土改良剂的筛选及应用效果研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14): 150-154.
LIAN Xiao-juan, LI Ming-yue, WANG Yan, et al. Selection and application effect of soil amendments on coastal saline soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(14): 150-154.
- [7] 李建国, 濮励杰, 朱 明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.
LI Jian-guo, PU Li-jie, ZHU Ming, et al. Status of research on soil salinization and hot spot in future[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [8] 张凌云, 赵庚星, 徐嗣英, 等. 滨海盐渍土适宜土壤盐碱改良剂的筛选研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 21-23.
ZHANG Ling-yun, ZHAO Geng-xing, XU Si-ying, et al. Filtration of suitable saline alkali soil amendments on coastal saline soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 21-23.
- [9] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [10] Ennis C J, Evans A G, Islam M, et al. Biochar: Carbon sequestration, land remediation, and impacts on soil microbiology[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, 42(22): 2311-2364.
- [11] Joseph S D, Camps-Arbestain M, Lin Y, et al. An investigation into the reactions of biochar in soil[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 501-515.
- [12] Steiner C, Das K C, Melear N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. *Journal of Environmental*

- Quality, 2010, 39(4): 1236–1242.
- [13] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719–1730.
- [14] Anderson C R, Condron L M, Clough T J, et al. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. *Pedobiologia*, 2011, 54(5): 309–320.
- [15] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472–476.
YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Effects of rice-hull-based biochar regulating acidity of red soil and yellow brown soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(5): 472–476.
- [16] 吴志丹, 尤志明, 江福英, 等. 生物黑炭对酸化茶园土壤的改良效果[J]. 福建农业学报, 2012, 27(2): 167–172.
WU Zhi-dan, YOU Zhi-ming, JIANG Fu-ying, et al. Ameliorating effect of biochar on acidity of tea garden soil[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 27(2): 167–172.
- [17] 殷大伟. 生物炭改良白浆土的初步研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
YIN Da-wei. Preliminary study on the improvement of albic soil by using biochar[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013.
- [18] 刘祥宏. 生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
LIU Xiang-hong. Effects of biochar application on soil improvement on the Loess Plateau[D]. Beijing: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, The University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [19] Lashari M S, Liu Y, Li L, et al. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 113–118.
- [20] Thomas S C, Frye S, Gale N, et al. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 62–68.
- [21] Carter M R. Soil sampling and methods of analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [22] Ge T D, Nie S A, Wu J, et al. Chemical properties, microbial biomass, and activity differ between soils of organic and conventional horticultural systems under greenhouse and open field management: A case study[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(1): 25–36.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI He-sheng. Principles and Techniques of plant physiological and biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [25] 张百俊, 杨和连, 杨东平. 氮肥对鸡毛菜硝酸盐积累及其酶活性的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(9): 189–191.
ZHANG Bai-jun, YANG He-lian, YANG Dong-ping. Effects of nitrogen fertilizer on nitrate accumulation and reductase activity of chinese cabbage[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(9): 189–191.
- [26] 刘媛媛, 李廷轩, 余海英, 等. 有机肥与尿素配施对设施土壤盐分含量与组成变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 292–298.
LIU Yuan-yuan, LI Ting-xuan, YU Hai-ying, et al. Effect of interaction between manure and inorganic fertilizers on salt content and ion composition in greenhouse soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 292–298.
- [27] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭及其对酸性土壤改良的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(5): 997–1000.
ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cun-cang, et al. Biochar and research advances of biochar in acidic soil improvement[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(5): 997–1000.
- [28] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812–1836.
- [29] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1009–1015.
ZENG Ai, LIAO Yun-cheng, ZHANG Jun-li, et al. Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in natural loessial soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1009–1015.
- [30] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930–2934.
CHEN Hong-xia, DU Zhang-liu, GUO Wei, et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2930–2934.
- [31] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 等. 华北高产农田施用生物炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 425–428.
GUO Wei, CHEN Hong-xia, ZHANG Qing-zhong, et al. Effects of biochar application on content of topsoil total nitrogen and alkaline hydrolysis nitrogen in productive farmland of North China[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2011, 20(3): 425–428.
- [32] Ding Y, Liu Y, Wu W, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2010, 213(1–4): 47–55.
- [33] Lehmann J, da Silva Jr J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [34] 薛继澄, 毕德义, 李家金, 等. 保护地栽培蔬菜生理障碍的土壤因子与对策[J]. 土壤肥料, 1994(1): 4–9.
XUE Ji-cheng, BI De-yi, LI Jia-jin, et al. Difficult physiological soil factors and countermeasures of protected cultivation vegetable[J]. *Soil fertilizer*, 1994(1): 4–9.
- [35] 李明悦, 朱静华, 廉晓娟, 等. 有机无机氮肥配施对芹菜产量、品质及土壤硝酸盐含量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(13): 178–

- 181.
- LI Ming-yue, ZHU Jing-hua, LIAN Xiao-juan, et al. Effect of combined application of organic nitrogen and inorganic nitrogen fertilizer on yield, quality of celery and soil nitrate content[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(13):178-181.
- [36] 曾宪军, 刘登魁. 有机无机氮肥配施对蔬菜和土壤硝酸盐含量的影响[J]. 湖南农业科学, 2006(1):37-39.
- ZENG Xian-jun, LIU Deng-kui. Effects of the organo-inorgano-mixed fertilizers application on nitrate contents of vegetable and soil[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2006(1):37-39.
- [37] 杨 帆, 李飞跃, 赵 玲, 等. 生物炭对土壤氨氮转化的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):1016-1020.
- YANG Fan, LI Fei-yue, ZHAO Ling, et al. Influence of biochar on the transformation of ammonia nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1016-1020.
- [38] Cheng Y, Cai Z, Chang S X, et al. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N_2O production in a cultivated Black Chernozem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(8):941-946.
- [39] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 等. 小麦秸秆生物炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3):288-293.
- QU Jing-jing, ZHENG Jin-wei, ZHENG Ju-feng, et al. Effects of wheat-based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3):288-293.
- [40] 冯爱青, 张 民, 路艳艳, 等. 控释氮用量及生物炭对玉米产量及土壤生物化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):159-164.
- FENG Ai-qing, ZHANG Min, LU Yan-yan, et al. Effects of controlled release nitrogen application rate and biochar on maize yield and soil biochemical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):159-164.
- [41] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20):6534-6542.
- CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20):6534-6542.
- [42] 李 冬, 陈 蕾, 夏 阳, 等. 生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9):2384-2391.
- LI Dong, CHEN Lei, XIA Yang, et al. The effects of biochar on growth and uptake of nitrogen and phosphorus for chinese cabbage in poor quality soil in Ningxia[J]. *Acta Scientiae Circumstance*, 2014, 34(9):2384-2391.
- [43] 付嘉英, 乔志刚, 郑金伟, 等. 不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(34):162-165.
- FU Jia-ying, QIAO Zhi-gang, ZHENG Jin-wei, et al. Effects of different biochar-based fertilizer on nitrate content, yield and quality of cabbage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(34):162-165.
- [44] 张万杰, 李志芳, 张庆忠, 等. 生物质炭和氮肥配施对菠菜产量和硝酸盐含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):1946-1952.
- ZHANG Wan-jie, LI Zhi-fang, ZHANG Qing-zhong, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot experiment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):1946-1952.
- [45] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1348-1352.
- GOU Mang-mang, QU Zhong-yi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1348-1352.
- [46] 潘 洁, 肖 辉, 程文娟, 等. 生物黑炭对设施土壤理化性质及蔬菜产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31):174-178.
- PAN Jie, XIAO Hui, CHENG Wen-juan, et al. Effect of biochar on vegetable yields and the soil physical and chemical properties in greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(31):174-178.