

有机碳菌剂对4种植物肥料利用率和根系形态的影响

陈串, 孙保平, 张建锋, 申豪杰, 陈艺超

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:通过设置盆栽试验,研究丁香、红瑞木、油松和白蜡4种植物在6个有机碳菌剂施用水平下的生物量、肥料利用率及根系形态的变化,以此揭示有机碳菌剂对生物量和根系形态的影响,并确定干旱区造林最佳的肥料施用量。结果表明:在试验施用范围内,4种植物根系和总生物量在不同肥料水平下存在显著差异,与对照相比,4种植物总生物量增幅分别为22.41%~82.94%,42.22%~112.96%,10.60%~55.59%和9.46%~42.61%,最大值分别在T4(20 g/株)、T3(15 g/株)、T5(30 g/株)和T5(30 g/株)时出现。肥料利用率随有机碳菌剂施用水平的提高而降低,4种植物分别降低了0.903, 1.946, 0.037, 0.145 kg/kg。有机碳菌剂对丁香和红瑞木的根系形态特征(根长、根表面积、平均直径、根尖数、分叉数)的影响达到显著水平,油松和白蜡的根系平均直径受肥料施用的影响较小,其余4项随着施用量的不同呈现显著差异。4种植物最大根长较对照增加41.29%~112.77%,最大根表面积增加34.73%~154.26%,最大平均直径增加3.85%~42.62%,最大根尖数增加47.41%~70.15%,最大分叉数增加22.93%~109.10%。研究结果表明,灌木对有机碳菌剂的响应较乔木更为敏感,在高剂量有机碳菌剂施用条件下,乔木生长优于灌木;干旱区造林工作中,乔木的有机碳菌剂施用量应该稍大,如选用30 g/株,而灌木的施用量不应超过20 g/株。

关键词:有机碳肥; 生物量; 根系形态; 肥料利用率

中图分类号:S144.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2017)04-0272-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.043

Effect of Organic Carbon Fertilizer on Fertilizer Utilization Rate and Root Morphology of Four Plants

CHEN Chuan, SUN Baoping, ZHANG Jianfeng, SHEN Haojie, CHEN Yichao

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: The purpose of this study was to acquire the effect of organic carbon fertilizer on biomass and root morphology, and to determine the optimum amount of organic carbon fertilizer in the arid area afforestation, therefore a pot experiment was conducted to study the effect of 6 levels organic carbon fertilizer on biomass, fertilizer utilization rate, and root morphology of 4 plants (*Syringa oblata*, *Swida alba*, *Pinus tabuliformis*, and *Fraxinus chinensis*). The results showed that significant differences existed in 4 plants' root and total biomass among the different fertilizer application levels in the test dosage range. The 4 plants' total biomass increased by 22.41%~82.94%, 42.22%~112.96%, 10.60%~55.59%, and 9.46%~42.61% compared with the control groups, and the maximum value were at level T4 (20 g/strain), T3 (15 g/strain), T5 (30 g/strain), T5 (30 g/strain). With the increase of organic carbon fertilizer application, the fertilizer utilization efficiency of 4 plants decreased by 0.903 kg/kg, 1.946 kg/kg, 0.037 kg/kg, 0.145 kg/kg. The influence of fertilizer on root morphological characteristics (root length, surface area, average diameter, tips, crossings) of *S. oblata* and *S. alba* all reached a significant level. Average root diameters of *Pinus tabuliformis* and *Fraxinus chinensis* were less affected by fertilizer application, but the other four characteristics showed significant differences under different amount of fertilizer application. Compared with the control groups, longest root length of 4 plants increased by 41.29%~112.77%, the maximum root surface area increased by 34.73%~154.26%, the maximum average diameter increased by 3.85%~42.62%, the maximum tips increased by 47.41%~70.15%, the maximum crossings increased by 22.93%~109.10%. The results showed that the shrub was more sensitive to fertilizer than the tree, but the tree performed better than the

shrub at high level fertilizer utilization. The fertilizer utilization for tree should be higher, 30 g/strain for instance, and for shrub shouldn't be more than 20 g/strain in the arid area afforestation.

Keywords: organic carbon fertilizer; biomass; root morphology; fertilizer utilization rate

干旱区的造林工作中,土壤水肥条件较差是导致造林质量低下的重要原因之一。有机碳菌剂应用是近年来迅速发展的一项能提高造林质量的营林技术。有机碳菌剂是一种以磨细的煤炭、沸石粉、烟尘粉末等为载体,与多个菌种有效复合的新型肥料,其施用量仅为普通有机肥的10%左右^[1],具有高效、肥力持久等特点,在使用过程中几乎不会对土壤造成污染和破坏^[2]。

根系是植物最重要的吸收器官和代谢器官,根系特征直接影响着植物的水分营养水平,根系直接与土壤接触,对环境因素格外敏感,易对土壤环境做出响应^[3]。目前关于有机碳菌剂的理论研究大多针对植物的地上部分,尤其是农作物产量和花卉质量,而其在林业上的研究仍停留在探讨造林存活率和生物量的阶段,前人指出,有机碳菌剂的施用对植物地上部分的生长起到积极作用,提高了农产品质量和造林存活率^[4-8],但关于其对植物根系形态特征的影响的研究较少,而有机碳菌剂一般施用于土壤中,与根系直接接触,根系的生长与有机碳菌剂的施用密切相关,理论上研究二者之间的联系对干旱区造林具有指导作用。因此,本文采用盆栽试验的方式,选用4种在河北干旱区造林工作中常用的植物(丁香、红瑞木、油松、白蜡),研究6种肥料施用量(包括空白对照)下4种植物的生物量、肥料利用率和根系形态特征,探讨植物生物量和根系形态特征的关系,以此确定最佳的肥料施用量,为合理施用化肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验肥料

试验所用肥料为有机碳菌剂(以下简称有机碳肥),由山西省绿色承诺永宝腐肥有限公司生产,基本原料为煤炭腐植酸。该肥料有机质含量为40%,腐植酸含量20%,氮、磷、钾含量各3%,中微量元素含量15%,复合益生菌有效活菌数为5亿/克。

1.2 试验苗木

选用4种苗木,分别为丁香(*Syringa oblata* Lindl.)、红瑞木(*Swida alba* Opiz.)、油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)和白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb.),均为一年生小苗。同种苗木规格统一,丁香苗高约30 cm,红瑞木苗约40 cm,油松苗约10 cm,白蜡苗约30 cm。

1.3 其他材料

试验栽植苗木所用花盆高30 cm,盆口直径25 cm,盆底直径18 cm,每盆装土8 kg。试验地点为北

京林业大学八家苗圃示范基地,盆栽土为壤土,pH 8.39,全氮含量0.370 g/kg,全磷含量0.410 g/kg,速效磷含量0.010 g/kg,速效钾含量0.056 g/kg,有机质含量8.300 g/kg。

1.4 试验设计

以不施有机碳肥为对照(CK),另设置5个梯度的有机碳肥施用量,分别为5,10,15,20,30 g/株,用T1~T5指代这5种水平,4种植物共计24个组别,每个组设置3个重复,共计72个盆栽,每个盆中种植1株苗木。2016年4月初开始,待土壤和有机碳肥均匀混合后将一年生苗木种植于盆中。试验第一个月内,每周浇水一次,定量1 000 mL/盆以提高成活率,其后根据其生长特征及天气状况,进行定量浇水,尽可能确保每盆植物在试验阶段获得同样质量的水分。同年12月初,试验结束,取出完整植物样。

1.5 测定项目与方法

2016年12月份,取出完整植物样后,用蒸馏水小心洗净根部土壤,除净土壤颗粒后带回实验室,剪除地上部分,采用WinRHIZO根系扫描仪及其数据分析软件,对总根长、总根表面积、平均根系直径、根尖数及分叉数进行分析,之后将整株植物置于105℃烘箱中杀青30 min,然后调到80℃烘干直至恒重,称得根系和地上部分干重。总生物量=根系生物量+地上部分生物量。

在针对农产品的研究中,常采用处理组果实产量减去空白对照组产量得到的值,除以肥料施用量来获得肥料利用率。本试验的4种植物没有“果实”产出,试验结束时植物生物量是最直观的产出,因此用处理组生物量减去对照组生物量来表征肥料利用率:

肥料利用效率=(处理组植物生物量-对照组植物生物量)/处理组施肥量,单位为kg/kg。

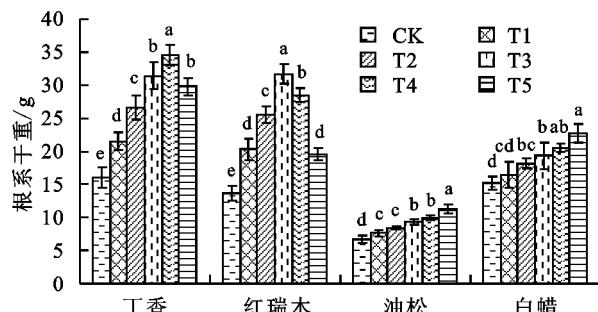
采用Excel 2010进行数据计算,PASW Statistics 19.0进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同浓度有机碳肥对植物生物量的影响

从图1可以看出,丁香在T4有机碳肥水平下,根系生物量达到最大值,5种不同水平处理的丁香根系生物量均高于对照组,分别提高了34.18%,65.94%,95.82%,115.59%,85.71%;红瑞木根系生物量最大值则是在T3水平时出现,各水平处理后的红瑞木根系生物量较对照组,分别提高了48.79%,87.16%,132.57%,108.80%,43.28%。两种灌木(丁香和红

瑞木)各相邻组别间的根系生物量差异性均达到显著水平;油松和白蜡根系生物量随着有机碳肥施用量的增加而提高,其中油松的 5 组处理下的根系生物量较对照组分别提高了 13.07%, 25.11%, 38.78%, 47.99%, 67.61%, 白蜡提高了 8.01%, 19.11%, 27.12%, 34.93%, 49.44%。油松在 T1 和 T2, T3 和 T4 水平下的组间差异不显著,白蜡相邻组别的根系生物量差异性均不显著。



注: 同组不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 4 种植物在不同有机碳肥用量水平下的根系生物量

由图 2 可知,4 种植物的总生物量与根系生物量的变化规律基本相同,但根系生物量相较于植株总生物量,组间差值更大;尤其是乔木组,油松和白蜡相邻组间的总生物量差异性不显著。5 个处理组别下,丁香总生物量较对照组增幅为 22.41%, 42.62%, 62.50%, 82.94%, 58.19%;红瑞木为 42.22%, 76.17%, 112.96%, 100.03%, 43.16%;油松为 10.60%, 19.91%, 28.79%, 37.46%, 55.59%;白蜡为 9.46%, 18.76%, 26.95%, 31.81%, 42.61%。

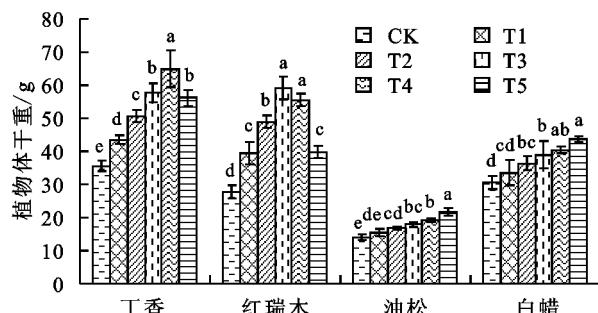


图 2 4 种植物在不同有机碳肥用量水平下的总生物量

2.2 施用有机碳肥对土壤肥料利用率的影响

由图 3 可知,4 种植物的肥料利用率随着有机碳肥施用量的提升而下降,丁香在前 4 个施用水平下的肥料利用率为 1.592, 1.514, 1.480, 1.473 kg/kg, 当施用水平从 20 g/株升到 30 g/株时,丁香对肥料的利用率大幅下降,从 1.473 kg/kg 下降到 0.689 kg/kg; 红瑞木在前 3 个施用水平下的肥料利用率为 2.346, 2.116, 2.092 kg/kg, 当有机碳施用水平从 15 g/株升到 20 g/株, 再升到 30 g/株时, 肥料利用率显著下降, 从 2.092 kg/kg 降至 1.389 kg/kg 和 0.400 kg/kg; 油松和白蜡肥料利用率也随着有机碳肥施用量提

高而降低,但是降低的幅度远小于两种灌木。5 种有机碳施用水平下,油松的肥料利用率为 0.296, 0.278, 0.268, 0.261, 0.259 kg/kg, 白蜡为 0.580, 0.575, 0.551, 0.487, 0.435 kg/kg。

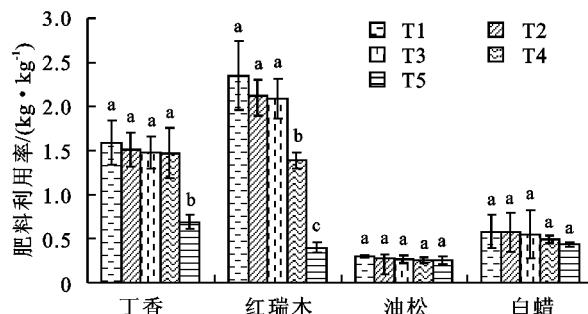


图 3 4 种植物在不同有机碳肥用量水平下的肥料利用率

2.3 不同浓度有机碳肥对植物根系形态的影响

由表 1 可知,有机碳肥对两种灌木(丁香和红瑞木)的根系形态有显著影响,但对于不同种的植物影响程度各不相同,根系各指标随有机碳肥浓度的变化趋势也不尽相同。两种灌木,根系长度、表面积、平均直径、根尖数及分叉数这 5 项指标呈现出随有机碳肥施用量的提高先增加后下降的趋势。丁香的根系长度、表面积及平均直径的大小排序为 T4>T5>T3>T2>T1>CK, 显著性分析表明 T3 和 T5 水平下这 3 项指标无显著差异;根尖数和分叉数这两个指标的大小排序为 T3>T4>T2>T5>T1>CK。

红瑞木的 5 项指标的峰值均出现在 T3 水平,即 15 g/株。根长、表面积及平均直径这 3 项指标在 T2 和 T4 水平下差异性不显著,排序为 T3>T2>T4>T1>T5>CK, 根长及平均直径在 T1 和 T5 水平下的差异性不显著,而根尖数排序为 T3>T2>T1>T4>T5>CK, 分叉数排序为 T3>T2>T4>T1>T5>CK。

将表 2 与表 1 对比可知,乔木(油松和白蜡)呈现出与灌木(丁香和红瑞木)不同的变化趋势和组间差异性,乔木 5 项指标的变化趋势较为平滑,除油松根尖数在 T1 到 T2 时略微有所下降,其余指标在试验选取的 6 种有机碳肥水平内呈现出随施用量提高而递增的趋势,5 项指标的极大值均出现在 T5, 即 30 g/株, 相邻水平的结果差异性也没有灌木显著,油松的根长、根表面积、平均直径、根尖数及分叉数的最大值相较于对照组分别提高了 67.36%, 72.17%, 3.85%, 70.15%, 63.53%, 而白蜡的分别提高了 41.29%, 34.73%, 4.30%, 58.46%, 109.10%。在平均根系直径方面,两种乔木的变化均不明显,油松和白蜡根系的平均直径虽随着有机碳肥施用水平提高有微量提升,但差异不显著。

表1 有机碳肥对两种灌木根系形态的影响

植物种	处理	总根长/cm	总表面积/cm ²	平均直径/mm	根尖数	分叉数
丁香	T1	1936.79±16.76d	581.53±15.75d	0.97±0.02c	6306±18e	16578±482d
	T2	2302.44±57.48c	780.88±27.91c	1.07±0.02b	7873±70c	18447±347c
	T3	2948.11±51.49b	1012.21±39.92b	1.11±0.06ab	9546±145a	22105±539a
	T4	3593.07±8.34a	1290.19±11.85a	1.16±0.02a	8159±65b	19628±551b
	T5	2969.28±116.85b	1016.04±45.26b	1.12±0.03ab	6949±92d	18155±253c
	CK	1688.72±32.57e	507.42±22.49e	0.96±0.02c	5535±68f	15967±185d
红瑞木	T1	3319.71±65.47c	790.21±11.11c	0.70±0.02c	7697±156c	21701±792c
	T2	3801.60±25.19b	892.69±9.51b	0.76±0.02b	8654±121b	25927±587b
	T3	4371.00±138.08a	1296.55±36.36a	0.87±0.02a	9633±612a	35010±1614a
	T4	3644.05±154.52b	883.24±10.99b	0.77±0.02b	6305±144d	22359±1016c
	T5	3252.27±50.85c	725.98±24.00d	0.69±0.01c	6013±158d	18571±1131d
	CK	2968.11±64.82d	537.87±36.31e	0.61±0.01d	5956±57d	18485±700d

注:表中数字后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表2 有机碳肥对两种乔木根系形态的影响

植物种	处理	总根长/cm	总表面积/cm ²	平均直径/mm	根尖数	分叉数
油松	T1	529.55±16.63d	165.34±11.52cd	1.05±0.01a	1737±214cd	2809±136de
	T2	578.02±3.30cd	197.04±12.00c	1.07±0.03a	1718±61cd	3064±184d
	T3	614.31±21.99c	234.95±26.37b	1.08±0.02a	1891±58c	3366±207c
	T4	710.30±25.78b	257.98±2.96ab	1.08±0.02a	2287±219b	3707±177b
	T5	801.68±33.47a	278.57±23.67a	1.08±0.03a	2559±133a	4350±150a
	CK	479.04±6.43e	161.80±20.23d	1.04±0.04a	1504±81d	2660±91e
白蜡	T1	1560.05±32.74e	469.99±24.30cd	0.94±0.04a	3372±241e	10300±1277d
	T2	1664.31±49.55d	491.68±13.94cd	0.96±0.01a	3694±52d	12401±662c
	T3	1804.07±78.53c	507.06±17.21c	0.96±0.02a	4113±218c	15174±687b
	T4	1950.97±55.19b	567.55±31.10b	0.97±0.02a	4583±50b	16244±1106b
	T5	2082.63±54.85a	630.80±21.09a	0.97±0.04a	5139±58a	18786±662a
	CK	1473.99±36.22e	468.18±18.54d	0.93±0.06a	3243±160e	8984±702d

3 讨论

每种植物的总生物量变化趋势均与其根系生物量变化趋势相同,丁香和红瑞木表现出相似的变化规律为先增大后减小,最大生物量分别出现在20 g/株和15 g/株,而油松和白蜡的变化趋势相似,且与灌木有明显区别,其生物量随着施肥水平的升高而提高,这说明不同植物对于施肥水平有着不同的适应范围。丁香和红瑞木在高剂量的有机碳肥处理中,根系和植物体生物量下降的原因可能是肥料施用量超过植物最适用量,有研究表明,过量施肥时作物产量并不会一直增加,反而有所下降^[9],而且过高的营养水平会导致植物的光合作用受到抑制,而光合作用是生物量增加的关键^[10-11],而乔木的耐肥性比灌木更好,在30 g/株的有机碳肥组别中仍然保持了正增长。

根系是植物最主要的吸收养分和向地上部分输送养分的器官,同时能合成多种激素和有机酸,根系直接影响了整株植物的生长发育^[12-14],这解释了每种植物的总生物量和根系生物量表现出完全一致的变化趋势的试验结果,同时有研究指出,与地上部分相比,生产相同的单位干物质量,根系需要两倍于地上部分的能量^[15],这可能是4种植物总生物量相较于根系生物量具有更小的组间差异的原因之一。

4种植物的肥料利用率均表现出一致的规律,即

随着有机碳肥施用量的提高而降低。从图3可以看出,在高剂量的有机碳肥施用量下,丁香和红瑞木的肥料利用率下降程度高于油松和白蜡。刘小虎等^[16]通过计算得出肥料提供养分的能力是有极限的,肥料施用量与可提供的养分量之间呈二次函数关系。施肥量高时,肥料利用率低;施肥量少时,肥料利用率高;当施肥量和肥料利用率取值适宜时,肥料实际提供养分量达到极大值,这与本文得到的结果相同。造成这一结果的原因可能是当有机碳肥施用较少时,能更加均匀地分布于土壤中,随着根系的生长,肥料与根系的接触更加充分,因此施用量较小,利用效率反而更大。

有研究表明,根系的生长极易受到环境因素的影响,且可以通过调整自身形态和生理生化特征以适应外界水肥条件的改变^[17],而根系形态特征的变化又会影响植物对土壤水肥的吸收效率^[18]。根据本试验的结果,油松和白蜡的5项根系形态特征(根长、总表面积、平均直径、根尖数和分叉数)的变化趋势分别与其根系生物量乃至总生物量的变化趋势相同;丁香和红瑞木的根长、总表面积及平均直径的变化与生物量变化趋势相同,但根尖数和分叉数的变化与其他指标存在细微差异,说明有机碳肥对乔灌根系特征的影响不尽相同。

两种灌木的根系平均直径相邻组间的差异性相

较其他 4 项指标不显著,两种乔木的根系平均直径组间差异性更弱,说明有机碳肥对植物根系的平均直径的影响并不强烈;有机碳肥显著影响了 4 种植物的根长,根系形态的直观变化是根长的改变而不是粗细的差异;而观察根尖数和分叉数这两项数据可以发现,有机碳肥的施用显著影响了根系的分蘖能力。根尖的形成机制非常复杂,可能与特殊的蛋白质和生长素有关^[19-23],有机碳肥可能导致植物在合成和运输有关蛋白质和激素时做出了调整。

从表 1 和表 2 可以发现,灌木的变化较乔木更剧烈(平均根径除外),说明灌木对有机碳肥的反应更灵敏,这可能是乔木具有更好的耐肥性的原因之一。

综上可知,在高剂量的有机碳肥施用条件下(T5),丁香和红瑞木的根系形态特征和植物生物量并没有继续增长,而是有所下降,其中红瑞木在 T4 水平已经显示下降趋势,两种灌木的肥料利用率在 T5 时均出现大幅下降,说明在 8 kg/盆的土壤量下,30 g/株有机碳肥施用意味着向 8 kg 土壤中加入了超过 12 g 的有机质、超过 6 g 的腐殖酸等大量营养成分,土壤肥力急剧升高,太高的营养水平抑制了灌木根系的生长,从而导致了生物量等指标的下降;而乔木在有机碳肥施用量发生变化时,生物量等指标的变化率弱于灌木,在 T1 至 T5 的范围内保持了连续正增长,说明乔木更好地适应了土壤养分的剧烈增加,虽然乔木对肥料的敏感性弱于灌木,但最适施用浓度高于灌木。

4 结论

(1) 有机碳肥的施加显著影响了植物的根系特征和总生物量,乔木的最适浓度比灌木更高。从相邻组别的生物量变化率上可以看出灌木对有机碳肥的响应较乔木更灵敏。

(2) 有机碳肥的施加显著影响了 4 种植物的根长、根表面积、根尖数、分叉数及 2 种灌木的平均根径,不同于灌木,乔木根系平均直径的变化并不显著。4 种植物的根系形态特征分别与其生物量的变化趋势相同。灌木根系的 5 项指标组间变化率均大于乔木,进一步证明了灌木对有机碳肥的响应较乔木更灵敏。

(3) 随着有机碳肥施用量的提高,4 种植物的肥料利用率反而下降。相较乔木,灌木的肥料利用率下降得更为明显,说明乔木对高浓度肥料的耐受能力比灌木更好。

(4) 有机碳肥显著影响了根尖数和分叉数两个指标,在一年生小苗的试验中,有机碳肥可能是通过诱导根系产生更多的分蘖来影响植物早期的生长发育。

(5) 干旱区的造林工作中,选用丁香、红瑞木等灌木时,有机碳菌剂的施用量选择 15,20 g/株时,即可

获得最佳效果,而油松、白蜡等乔木的有机碳菌剂施用量可以选择更高浓度,在 30 g/株时效果最佳。

参考文献:

- [1] 李瑞波,吴少全. 生物腐植酸与有机碳肥 [M]. 北京:化学工业出版社,2014.
- [2] 廖宗文,刘可星,毛小云. 施用有机碳肥弥补碳短板 [J]. 中国农资,2013(46):22.
- [3] 戈良朋,王祖伟. 盐胁迫下 3 种滨海盐生植物的根系生长和分布 [J]. 生态学报,2011,31(5):1195-1202.
- [4] 孙玉良,曹齐卫,张卫华,等. 微生物菌肥对黄瓜幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 西北农业学报,2012,21(2):132-136.
- [5] 林多,赵磊,陈宁,等. 光合菌肥对黄瓜生长和品质的影响 [J]. 北方园艺,2010(3):9-11.
- [6] 陶武辉. 施肥对黄土高原水蚀风蚀交错区植物产量及土壤矿质氮、水溶性有机碳/氮的影响 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [7] 李昌见,屈忠义,勾芒芒,等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究 [J]. 农业环境科学学报,2014,33(11):2187-2193.
- [8] Chang K H, Wu R Y, Keng chang C, et al. Effects of chemical and organic fertilizers on the growth, flower quality and nutrient uptake of *Anthurium andeanum*, cultivated for cut flower production [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(3):434-441.
- [9] 刘立军,王康君,卞金龙,等. 水稻产量对氮肥响应的品种间差异及其与根系形态生理的关系 [J]. 作物学报,2014,40(11):1999-2007.
- [10] 李杰,贾豪语,颉建明,等. 生物肥部分替代化肥对花椰菜产量、品质、光合特性及肥料利用率的影响 [J]. 草业学报,2015,24(1):47-55.
- [11] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响 [J]. 应用生态学报,2012,23(2):419-425.
- [12] Kiba T, Kudo T, Kojima M, et al. Hormonal control of nitrogen acquisition: roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(4):1399-1409.
- [13] Latif K A, Muhammad H, Kang S M, et al. Endophytic fungal association via gibberellins and indole acetic acid can improve plant growth under abiotic stress: An example of *Paecilomyces formosus* LHL10 [J]. BMC Microbiology, 2012, 12(1):1-14.
- [14] Uga Y, Sugimoto K, Ogawa S, et al. Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions [J]. Nature Genetics, 2013, 45(9):1097-1102.
- [15] Passioura J B. Root signals control leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1988, 15(5):687-693.