

环保型土壤改良剂对沙区植物叶绿素和光合速率的影响

李志洪, 郭建斌, 张宾宾, 吴 凤, 吴玉晴, 唐思凌

(北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要:为探索改善沙区沙化土壤的理化性状和肥力状况、促进植物优良生长。应用特定生产工艺将天然黏土矿物、城市生活污水和污泥按一定比例加工成自制天然环保型土壤改良剂(简称环保型土壤改良剂),并采用正交试验设计盆栽法,以沙区主要造林树种紫穗槐、白榆、欧美杨 108 和沙柳为研究对象,通过观测植物叶片叶绿素含量和光合作用特性,研究了不同环保型土壤改良剂的应用效果。结果表明:在提高植物叶绿素含量方面,以沙柳、环保型土壤改良剂③、矿物添加量 150 g、污泥添加量 250 g 组合效果最佳;在增强植物光合速率方面,以欧美杨 108、环保型土壤改良剂①、矿物添加量 250 g、污泥添加量 200 g 组合效果最好。该研究对我国北方干旱半干旱地区改良沙化土壤理化性质、提高植被覆盖率具有非常重要的意义。

关键词:环保型土壤改良剂;沙区植物;正交试验;叶绿素含量;光合速率

中图分类号:Q945.79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)04-0182-06

Influences of Environment-friendly Soil Conditioner on Chlorophyll and Photosynthetic Rate of Sand Plants

LI Zhi-hong, GUO Jian-bin, ZHANG Bin-bin, WU Feng, WU Yu-qing, TANG Si-ling

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating,

Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the way to improve the physical and chemical properties, fertility status of sandy soil and promote vegetation growth excellently, this study focused on the self-made natural environment-friendly soil conditioner which was processed with natural clay minerals, municipal sewage and sludge by a certain percentage through specific production craft through pot culture method using orthogonal experimental design, and using the *Amorpha fruticosa*, *Ulmus laevis*, *Populus canadensis* Moench 108 and *Salix psammophila* for object of study, which were main afforestation tree species in North China. By observing leaf chlorophyll content and photosynthetic characteristics of the species, the application effect of environment-friendly soil conditioner was tested. The results showed that in terms of increasing chlorophyll content, the best outcome was the group of *Salix psammophila*, environment-friendly soil conditioner③, mineral additive amount of 150 g and sludge additive amount of 250 g; with regard to increasing photosynthetic rate, the best outcome was the group of *Populus canadensis* Moench 108, environment-friendly soil conditioner①, mineral additive amount of 250 g and sludge additive amount of 200 g. Research has an extraordinary important significance on improving physical and chemical properties of sandy soil and making the vegetation coverage better in arid and semi-arid areas of north China.

Key words: environment-friendly soil conditioner; sand plant; orthogonal; chlorophyll content; photosynthetic rate

我国是世界上受沙化危害最严重的国家之一,我国西北、华北、东北,形成一条西起塔里木盆地,东至

松嫩平原西部,东西长约 4 500 km、南北宽约 600 km 的风沙带,危害北方大部分地区。据观测,20 世纪 70

收稿日期:2011-12-11

修回日期:2012-01-11

资助项目:“948”国家林业局引进国际先进林业科学技术项目“天然高效环保土壤改良剂及应用技术引进”(2008-4-44)

作者简介:李志洪(1986—),男,贵州省瓮安县人,硕士研究生,主要研究方向:生态环境工程。E-mail:lizhihongbox@126.com

通信作者:郭建斌(1962—),男,陕西省韩城市人,副教授,主要研究方向:生态环境工程,林业生态工程及水土保持。E-mail:jianbinguo@bjfu.edu.cn

年代,我国土地沙化扩展速度为 $1\,560\text{ km}^2/\text{a}$,80年代为 $2\,100\text{ km}^2/\text{a}$,90年代达 $2\,460\text{ km}^2/\text{a}$,21世纪初达到 $3\,436\text{ km}^2/\text{a}$,沙化速度呈迅速增大趋势,沙化面积不断扩大^[1]。随着经济与社会的不断发展,土壤退化问题日益突出,主要表现为土壤紧实与硬化、侵蚀、盐碱化、酸化、元素失衡、化学污染、有机质流失和动植物区系的退化等^[2],造成了土地生产力的下降,严重影响着森林植被的产量和质量。为了改善贫瘠立地条件下的退化土壤,促进植被生长,采用外加土壤改良剂的措施改善土壤理化性质成为恢复退化土壤的重要措施之一。

在我国北方干旱半干旱地区广泛分布着肥力低下的沙化土地,严重影响着植被的恢复。为尽量降低土壤退化所带来的损失,近年来各种土壤改良剂虽有其明显的改良效果,但或多或少都有其各自的缺点^[3-6]。目前,已研发出的土壤改良剂很少有专门针对沙区沙化土壤的改良,而且很少从天然环保的角度入手。为此,本文将天然黏土矿物、城市生活污水和污泥等含植物生长所需的营养基质按一定比例和特定工艺加工,新研发出一种自制天然环保型土壤改良剂(简称环保型土壤改良剂)。通过试种紫穗槐、白榆、欧美杨108、沙柳,分析环保型土壤改良剂对植物叶片叶绿素含量和光合作用特性的影响,探索该土壤改良剂改良沙化土的理化性状、促进植物生长的效果。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究试验地位于北京市鹫峰国家森林公园的温室内,盆栽试验基质来源于内蒙古库布齐沙漠的沙化土壤。本试验于2011年5—10月进行,用紫穗槐、白榆、欧美杨108、沙柳作为供试植物,栽于装有沙化土壤的塑料花盆中,花盆规格统一为口部直径29 cm、底部直径26 cm、高30 cm。试验所需基本材料为膨润土、高岭石等天然黏土矿物、城市生活污水、城市二级处理生活污水,按特定比例和生产工艺加工制成3种土壤改良剂再按试验设计加至花盆中。

1.2 试验设计

本试验用盆栽法,共设置16种处理,每种处理5个重复,处理1—4为紫穗槐、处理5—8为白榆、处理9—12为欧美杨108、处理13—16为沙柳,采用5因素4水平正交试验,5因素为树种、土壤改良剂种类、天然矿物添加量、污泥添加量和误差项,将环保型土壤改良剂分量按占基质总重量的4%,6%,8%,10%的比例施入盆装土壤基质中,其中天然矿物分别按2%,3%,4%,5%添加,城市生活污水分别按占基质

总重量的2%,3%,4%,5%添加。树种因素A的4水平设置为:A1紫穗槐、A2白榆、A3欧美杨108、A4沙柳;土壤改良剂种类因素B的4水平设置为:B1环保型土壤改良剂①、B2环保型土壤改良剂②、B3环保型土壤改良剂③、B4对照CK;天然矿物添加量因素C水平设置为:C1添加100 g矿物;C2添加150 g矿物;C3添加200 g矿物;C4添加250 g矿物;污泥添加量因素D水平设置为:D1添加100 g污泥;D2添加150 g污泥;D3添加200 g污泥;D4添加250 g污泥。试验设计详见表1。

2 研究方法

叶绿素含量的测定:采用SPAD—502叶绿素仪测定叶绿素含量。已有研究发现,叶片叶绿素含量与叶片SPAD值极显著相关,因此,本研究用叶片SPAD值来代替叶片叶绿素含量^[7]。

光合速率测定:选择在2011年6—9月的晴天,采用LI—6400XT光合—荧光测定系统测定苗木光合速率,从8:00—18:00,每隔2 h观测1次。在测定过程中,以待测苗木为对象随机抽取一个生长良好的枝条上叶形完全舒展、叶片健全且体态健康能代表整株植物生长状况的一张叶片进行测定,在同一株植物上选择3个叶片进行重复测定,每次观测均按上述标准选取叶片。在本次选取的测量叶片上做好相应的标记,以备下一轮观测时确保选取的是同一张叶片。

分析方法:采用SPSS和Excel对数据进行统计分析^[8]。

3 结果与分析

3.1 不同土壤改良剂配方处理对植物叶绿素含量的影响

(1) 不同处理对各植物叶绿素含量对比分析。每年6—8月是林木生长量积累最多、最快的时期,因此,本试验选取这一时期的叶绿素含量进行分析。在植物枝叶生长繁茂期,用SPAD—502叶绿素仪测定每个处理植物叶绿素含量(图1),不同处理条件下叶片的SPAD值差异不显著,处理1—4为紫穗槐,处理4即CK为最低值32.6,处理2为最高值36.7,其最佳配方为:紫穗槐、环保型土壤改良剂②、矿物添加量150 g、污泥添加量150 g;处理5—8为白榆,处理8即CK为最低值33.3,处理5为最高值44.7,其最佳配方为:白榆、环保型土壤改良剂①、矿物添加量150 g、污泥添加量200 g;处理9—12为欧美杨108,处理12即CK为最低值33.9,处理10为最高值42,其最佳配方为:欧美杨108、环保型土壤改良剂②、矿

物添加量 250 g、污泥添加量 200 g;处理 13—16 为沙柳,处理 16 即 CK 为最低值 39.7,处理 15 为最高值 48.3,其最佳配方为:沙柳、环保型土壤改良剂③、矿物添加量 150 g、污泥添加量 250 g。

表 1 正交试验设计

处理	因素				
	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 E
	树种	土壤改良剂种类	矿物添加量/g	污泥添加量/g	误差项
1	紫穗槐	自制土壤改良剂①	100	100	1
2	紫穗槐	自制土壤改良剂②	150	150	2
3	紫穗槐	自制土壤改良剂③	200	200	3
4	紫穗槐	空白对照 CK	250	250	4
5	白榆	自制土壤改良剂①	150	200	4
6	白榆	自制土壤改良剂②	100	250	3
7	白榆	自制土壤改良剂③	250	100	2
8	白榆	空白对照 CK	200	150	1
9	欧美杨 108	自制土壤改良剂①	200	250	2
10	欧美杨 108	自制土壤改良剂②	250	200	1
11	欧美杨 108	自制土壤改良剂③	100	150	4
12	欧美杨 108	空白对照 CK	150	100	3
13	沙柳	自制土壤改良剂①	250	150	3
14	沙柳	自制土壤改良剂②	200	100	4
15	沙柳	自制土壤改良剂③	150	250	1
16	沙柳	空白对照 CK	100	200	2

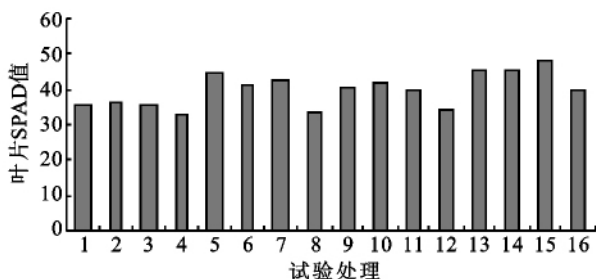


图 1 不同处理下植物叶片 SPAD 值比较

(2) 不同处理下各植物叶绿素含量的直观分析。将各处理下叶绿素含量 SPAD 值做极差分析(表 2),由极差分析表得出:树种和改良剂种类的极差较其它因素大很多,说明树种和改良剂种类是影响叶绿素含量的两个重要因素,A 因素树种是影响 SPAD 值的关键因素,沙柳尤为显著;B 因素土壤改良剂种类和 C 因素矿物添加量是本试验中影响叶片 SPAD 值的重要因素,因素 D 污泥添加量对叶片 SPAD 值影响稍弱,因此该试验中影响叶片叶绿素 SPAD 值各因素由强到弱的顺序为:A>B>C>D>E。

由表 2 各因素和水平对叶绿素 SPAD 值影响的显著性情况作出因素水平关系直观图(图 2)。在 A 因素中沙柳的叶绿素含量最高、紫穗槐叶绿素含量最低,在 B 因素中 3 类土壤改良剂均不同程度地提高了植物叶绿素含量,而对照组叶绿素含量较低,C 因素和 D 因素是影响植物叶绿素含量的重要因素,其对应

矿物添加量为 150 g、污泥添加量为 250 g,且 D 因素污泥添加量影响不明显。因此为促进植物叶片 SPAD 值增加的理想配方组合是 A4B3C2D4E4,即与本试验处理 15 最接近,最佳配方为:沙柳、环保型土壤改良剂③、矿物添加量 150 g、污泥添加量 250 g。

表 2 叶绿素 SPAD 值正交试验极差分析

试验	因素				
编号	A	B	C	D	E
K1	140.8	165.9	156.6	157.2	159.3
K2	161.9	165.4	163.6	154.9	159.1
K3	155.9	166.2	154.6	162.2	156.4
K4	178.4	139.5	162.2	162.7	162.2
k1	35.2	41.5	39.2	39.3	39.8
k2	40.5	41.3	40.9	38.7	39.8
k3	39.0	41.6	38.7	40.6	39.1
k4	44.6	34.9	40.6	40.7	40.6
级差	9.4	6.7	2.2	2.0	1.5

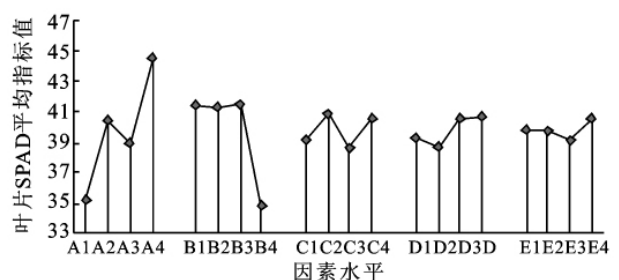


图 2 叶片 SPAD 值指标平均值与因素关系

(3) 不同处理下各植物叶绿素含量的方差分析。对树种、土壤改良剂种类、矿物添加量、污泥添加量及误差影响下的植物叶片 SPAD 值进行方差分析,如表 3 所示。

表 3 L16(4⁵)叶片 SPAD 值方差分析

方差来源	SS	f	MS	F	显著性
总	340.66	15	22.711	16.164	
A	181.35	3	60.448	43.024	**
B	130.11	3	43.368	30.867	**
C	14.07	3	4.070	3.338	
D	10.40	3	3.465	2.466	
E	4.22	3	1.405	1.000	
误差	4.215	3	1.405		

$F_{0.01}(FA,FW)=F(3,3)=29.5;F_{0.05}(FA,FW)=F(3,3)=9.28。$

各处理下叶片 SPAD 值方差分析表明,在 0.01 的检验水平下,树种和土壤改良剂种类的 F 值均大于检验值 $F_{0.01}=29.5$,这两个因素达到极显著差异,是影响 SPAD 值的关键因子;而矿物添加量和污泥添加量 F 值小于 $F_{0.05}=9.28$,这两个因素差异不显著,与极差分析的结果相同(表 3)。

3.2 不同土壤改良剂配方处理对植物光合速率的影响

光合作用(Photosynthesis)是绿色植物和某些细菌利用叶绿素,在可见光的照射下,将二氧化碳和水转化为有机物并释放出氧气的生化过程。植物之所以被称为食物链的生产者,是因为它们能够通过光合作用利用无机物生产有机物并且贮存能量^[9]。光合速率(photosynthetic rate)是指光合作用固定二氧化碳(或产生氧)的速度,二氧化碳的固定速率也称同化速率。光合作用的强度可用光合速率这一指标来体现,净光合速率越大,则植物的有机物积累量越大。不同土壤改良剂处理下紫穗槐净光合速率日变化规律如图 3 所示。

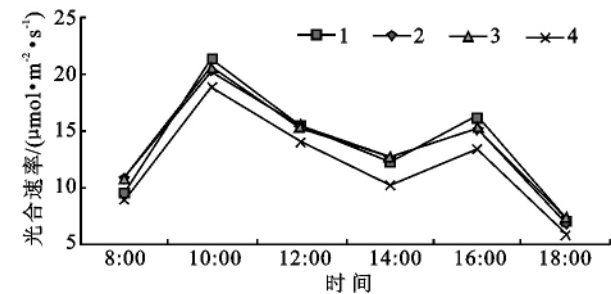


图 3 不同土壤改良剂处理下紫穗槐净光合速率日变化

不同土壤改良剂处理下紫穗槐苗木的净光合速率均高于对照组的光合速率,且以施用环保型土壤改良剂①的处理 1 光合速率达最大值 $21.36 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,从 8:00 开始随着太阳辐射的增大,在 10:00 左右达到一天的最大值即第一高峰,此后植物为避免蒸

腾过度失水而关闭部分气孔,出现了光合“午休”现象,植物光合速率缓慢下降,持续到 14:00 达低谷,16:00 出现次“高峰”,此后随着太阳辐射下降,光合速率持续下降。施用土壤改良剂的紫穗槐净光合速率日平均值比对照提高了 13.99%~14.96%,以处理 1 提高量较明显,即以紫穗槐、环保型土壤改良剂①、矿物添加量 100 g、污泥添加量 100 g 组合效果最佳(图 3)。

不同土壤改良剂处理下白榆净光合速率日变化规律,如图 4 所示。白榆光合速率为单峰型,最大值 $21.03 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在 12:00。施用土壤改良剂的白榆净光合速率日平均值比对照提高了 18.01%~26.45%,处理 6 和 7 效果相当,对照组效果最差,以处理 5 提高量最明显,即以白榆、环保型土壤改良剂①、矿物添加量 100 g、污泥添加量 100 g 组合效果最好(图 4)。

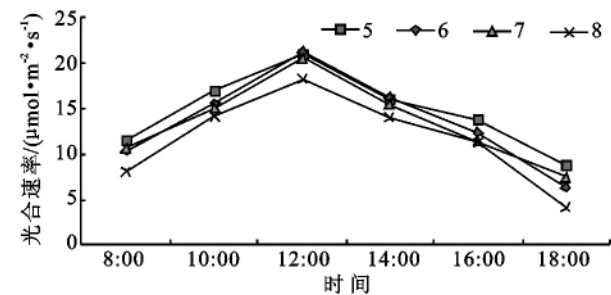


图 4 不同土壤改良剂处理下白榆净光合速率日变化

不同土壤改良剂处理下欧美杨 108 净光合速率日变化规律,如图 5 所示。欧美杨 108 也出现了光合“午休”现象,施用环保型土壤改良剂的欧美杨 108 净光合速率较对照提高了 14.22%~23.88%,以处理 9 和 10 效果较明显,即以欧美杨 108、环保型土壤改良剂①、矿物添加量 200 g、污泥添加量 250 g 组合或欧美杨 108、环保型土壤改良剂②、矿物添加量 250 g、污泥添加量 200 g 组合效果佳(图 5)。

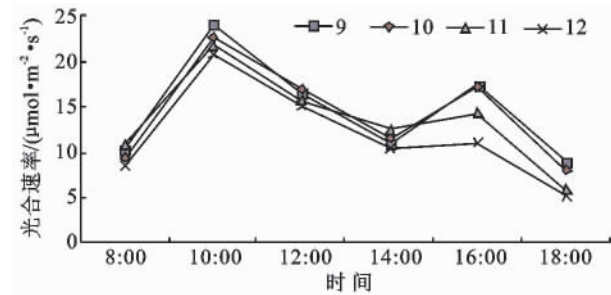


图 5 不同土壤改良剂处理下欧美杨 108 净光合速率日变化

不同土壤改良剂处理下沙柳净光合速率日变化规律,如图 6 所示。沙柳也具有光合“午休”现象,施用环保型土壤改良剂的沙柳使其光合速率较对照提高了 9.23%~26.10%,以处理 13 效果最明显,即以

沙柳、环保型土壤改良剂①、矿物添加量 250 g、污泥添加量 150 g 效果最佳(图 6)。

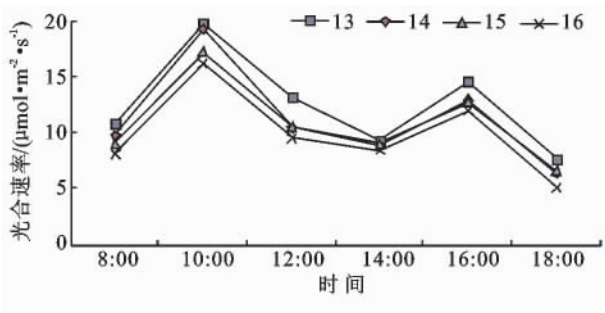


图 6 不同土壤改良剂处理下沙柳净光合速率日变化

综上所述,紫穗槐、欧美杨 108 和沙柳的光合速率均呈现“双峰”型,最高峰出现在 10:00 左右,第二高峰出现在 16:00 左右,即都具有光合“午休”现象。此种现象一方面是由于午间气温高、光照强、气孔开度减少使叶片温度过高,抑制了参与光合过程的酶的活性,使叶片光合能力下降,另一方面,非气孔因素的作用也是造成午间净光合速率下降的原因之一^[10]。白榆的光合速率则为“单峰”型。将光合速率进行直观分析的结果详见表 4。

表 4 光合速率正交试验极差分析

试验 编号	因素				
	A	B	C	D	E
K1	53.034	55.589	50.873	50.258	50.480
K2	53.502	52.873	50.980	51.259	51.626
K3	54.128	51.513	51.243	52.630	51.784
K4	44.625	45.314	52.193	51.143	51.399
k1	13.259	13.897	12.718	12.565	12.620
k2	13.376	13.218	12.745	12.815	12.91
k3	13.532	12.878	12.811	13.157	12.946
k4	11.156	11.329	13.048	12.786	12.850
级差	2.376	2.569	0.330	0.593	0.326

本试验中 B 因素土壤改良剂种类对供试植物光合速率影响作用最大,其次是 A 因素树种,再次为 D 因素污泥添加量, C 因素矿物添加量的作用最小。试验中影响植物光合速率的各因素由大到小的作用强弱关系为: $B > A > D > C > E$ 。由表 4 中各因素和水平对植物光合速率影响作因素的显著性水平关系如图 7 所示。

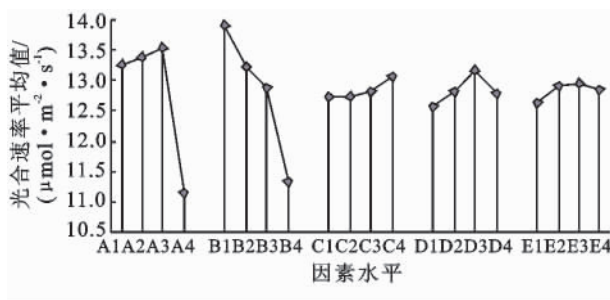


图 7 植物叶片光合速率指标平均值与因素关系

B 因素土壤改良剂种类是影响植物光合速率最重要的因素,其对应最大值配方为环保型土壤改良剂①, A 因素树种是影响植物光合速率的重要因素,对应树种为欧美杨 108, D 因素是影响植物光合速率关键因素,对应污泥添加量为 200 g, C 因素矿物添加量对植物光合速率的影响不明显(图 7)。因此,为促进植物光合速率增强的理想配方组合是 A3B1C4D3E3, 与本试验处理 9 最接近,最佳配方为:欧美杨 108、环保型土壤改良剂①、矿物添加量 250 g、污泥添加量 200 g。

对树种、土壤改良剂种类、矿物添加量、污泥添加量及误差影响下的植物光合速率进行方差分析(表 5),结果表明:在 0.01 的检验水平下,树种和土壤改良剂种类的 F 值均大于检验值 $F_{0.01} = 29.5$,这两个因素达到极显著差异,是影响光合速率的关键因子;而矿物添加量和污泥添加量 F 值小于 $F_{0.05} = 9.28$,这两个因素差异不显著,与极差分析的结果一致。

表 5 L16(4⁵) 光合速率方差分析

方差来源	SS	f	MS	F	显著性
总	30.531	15	1.908	22.425	
A	15.101	3	5.034	59.155	**
B	14.185	3	4.728	55.566	**
C	0.271	3	0.090	1.060	
D	0.7195	3	0.240	2.819	
E	0.255	3	0.085	1.000	
误差		3	0.085		

4 结论与讨论

试验研究结果显示:3 种环保型土壤改良剂对照均能提高植物叶片叶绿素含量及光合速率。由于施加的土壤改良剂含有污泥、污水和天然矿物,污泥和污水提供了丰富的有机质和氮磷钾等植物生长所需的养分,因此加入土壤改良剂的植物长势较好;同时,加入的矿物和污泥改善了土壤的容重、机械组成、孔隙度等物理性质和提供了成土基质、丰富了土壤供给植物的化学元素等,使土壤理化性质得到改善,从而使苗木叶绿素含量增加、光合速率也得到了提高,经过验证施用该环保型土壤改良剂植物的株高、地茎、枝条萌发数也得到了大幅提高。

在提高植物叶绿素含量方面,以沙柳、环保型土壤改良剂③、矿物添加量 150 g、污泥添加量 250 g 效果最佳,即环保型土壤改良剂③对叶绿素的含量的增加改善效果最好。

在增强植物光合速率方面,以欧美杨 108、环保型土壤改良剂①、矿物添加量 250 g、污泥添加量 200

g 效果最佳,即环保型土壤改良剂①对增强植物光合速率的改善效果最佳,能高效促进植物的光合速率,加速生物量的积累。本研究中紫穗槐、欧美杨 108、沙柳净光合速率日变化都呈“双峰”曲线变化,白榆净光合速率日变化呈“单峰”曲线变化。

综上,该环保型土壤改良剂不仅能提供植物生长所需的基本元素,还对土壤基质的理化性质有极大的改良作用。施用该环保型土壤改良剂不仅改善了土壤的理化性质,而且提高了植物的叶绿素含量和促进了植物光合速率,保障了沙区植物的优良生长。同时该环保型土壤改良剂对环境不会产生任何副作用,达到了天然环保地改良沙化土壤的目的,比其它改良效果较差或造成副作用的合成土壤改良剂具有明显的优势。污泥中含有植物所需的丰富养分,施入后,会明显地增加土壤氮、磷含量,并能有效地向植物提供养分,减少化学肥料的施用量,从而降低农业生产的成本^[11-14]。膨润土等黏土矿物能够减弱耕层土壤因灌溉微咸水的碱化程度^[15]。该研究成果对我国北方干旱半干旱地区改良沙化土壤理化性质、提高植被覆盖率具有非常重要的意义。

本研究结论基于温室盆栽试验,从全面推广角度来看,建议下一步在沙区进行适当的野外试验,从而更全面地验证该自制环保型土壤改良剂的功效。同时,在挑选最佳土壤改良剂配方时,可以将土壤类别作为一个新的因素列入其中。

参考文献:

- [1] 胡培兴. 中国沙化土地现状及防治对策[J]. 林业建设, 2009(6):3-9.
- [2] 赵其国. 土壤退化及其防治[J]. 土壤, 1991, 23(2):57-60,86.
- [3] 陈义群,董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境学报, 2008, 17(3):1282-1289.
- [4] 左建,孔庆瑞. 沸石改良碱化土壤作用的初步研究[J]. 河北农业大学学报, 1987, 10(3):58-64.
- [5] 易杰祥,刘国道,孙水芬,等. 膨润土的土壤改良效果及其对作物生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(10):2209-2209,2212.
- [6] 王德汉,彭俊杰,戴苗. 造纸污泥堆肥作为土壤改良剂的肥效研究[J]. 中国造纸学报, 2003, 18(1):141-144.
- [7] 薛利红,杨林章. 采用不同红边位置提取技术估测蔬菜叶绿素含量的比较研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9):165-169.
- [8] 王学仁,王松桂. 实用多元统计分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1990.
- [9] 高松. 光谱学与光谱分析[M]. 北京:北京大学出版社, 2004.
- [10] 李国泰. 8种园林树种光合作用特征与水分利用率比较[J]. 林业科学研究, 2002, 15(3):291-296.
- [11] Mamata M, Sahu R K; Sahu S K, et al. Growth yield and elements content of wheat (*Triticum aestivum*) grown in composted municipal solid wastes amended soil[J]. Environment, Development and Sustainability, 2009, 11(1):115-126.
- [12] Fernandez J M, Cesar P, Juan C, et al. Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 42(1):18-24.
- [13] Contreras-Ramos S M, Alvarez-Bernal D, Dendooven L. Characteristics of earthworms (*Eisenia fetida*) in PAHs contaminated soil amended with sewage sludge or vermicompost[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 41(3):269-276.
- [14] 范圣库,高占彪,何万义,等. 宣化县黄羊滩风蚀沙地土壤物理性质的研究[J]. 河北林业科技, 2010(1):1-3.
- [15] 王奇. 泥炭—土壤改良剂[J]. 腐殖酸, 1991(3):58-64.