

文章编号:1003-8701(2009)06-0040-05

泥炭和腐泥改良风沙土前后土壤理化性质比较

马云艳¹, 赵红艳^{1,2*}, 严 啸¹, 谢绿武¹, 王开莉¹, 李鸿凯^{1,2}

(1. 东北师范大学国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 长春 130024;

2. 东北师范大学植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要:本研究采用盆栽试验,通过在风沙土中添加不同比例的泥炭、腐泥及其混合物,对比试验前后各个处理的风沙土理化性质变化。结果表明,在风沙土中施入 8%~12%的泥炭或者 32%的腐泥或者二者混合添加,都可明显改善土壤容重和 pH 值,增加土壤养分含量和物理性粘粒含量。这一点,无论是在盆栽白菜前或者试验后的土壤中,都可以得到证明。但是在盆栽结束后,再次种植作物时,应根据作物的需要,补充氮肥,而磷肥和钾肥可以少加或者不加。

关键词:泥炭;腐泥;风沙土;改良;理化性质

中图分类号:S156.5

文献标识码:A

Comparing of Physic and Chemical Property of Aeolian Sandy Soil Before and After Improvement

MA Yun-yan¹, ZHAO Hong-yan^{1,2*}, YAN Xiao¹, XIE Lv-wu¹, WANG Kai-li¹, LI Hong-kai^{1,2}

(1. State Environment Protection Key Laboratory of Wetland Ecology & Vegetation Restoration, Northeast Normal University, Changchun 130024; 2. Key Laboratory for Vegetation Ecology of Education Ministry, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Three level of peat, 10 level of spropel and 3 levels of peat & spropel were respectively added into aeolian sandy soil to plant Chinese cabbage in the pot. The physical and chemical properties of soils with different treatments before and after planting were compared. The results showed that 8-12% peat or 32% spropel or their mixture has obvious effect on improving of bulk density and pH value. Meanwhile, it obviously increases the content of nutrients and physical clay. This can be proved whether it is before or after experiment. But nitrogen should be added, phosphate and potash can be add a little or no if any crop was planted in the improved soils again.

Keywords: Peat; Spropel; Sandy soil; Improvement; Physical and chemical properties

土地沙化已成为全球性的重大生态环境问题,引起了世界各国的广泛关注。中国是世界上遭受沙化危害严重的国家之一,就松嫩沙地而言,其行政范围包括黑龙江省的泰来、齐齐哈尔、大庆、杜尔伯特、富裕、肇源、肇东、肇州以及吉林省的白城、洮南、通榆、镇赉、长岭、乾安、大安、扶余和内蒙古自

治区的科尔沁右翼中旗等 17 个市县(旗)。

泥炭富含有机质,用它作为土壤改良剂已有多年历史。腐泥是一种十分有效的生物资源,它含有丰富的有益于植物生长的养分和大量的有机物质,对于土壤结构、土壤的水力学性质、土壤的化学性质及生物学性质均有良好的影响。本文针对吉林西部长岭县的风沙土,用泥炭和腐泥作为改良剂,对试验前后各不同处理的土壤理化性质进行对比分析,为定量评价风沙土,合理养地和施肥提供科学依据。

1 材料和研究方法

收稿日期:2009-05-31

基金项目:国家自然科学基金(30700055);吉林省科技发展计划项目(20060712)

作者简介:马云艳(1985-)女,硕士研究生,主要从事湿地资源研究。

通讯作者:赵红艳,女,博士,副教授,E-mail:hyzhao@nenu.edu.cn

1.1 试验地点和材料

试验地设在长春市东北师范大学气象园内，

属中温带半湿润大陆季风气候，年均温度 4.9℃，降水量 579 mm。供试农作物为当地普遍种植的辽

表 1 泥炭、腐泥、风沙土的理化性质

理化性质	容重(g/cm ³)	吸湿水(%)	pH 值	有机质(%)	速效 N(mg/kg)	速效 P(mg/kg)	速效 K(mg/kg)	HA(%)
风沙土	1.03	11.29	8.25	0.31	27.13	0.69	60.42	0.44
泥炭	0.26	39.70	4.74	56.22	39.08	60.30	882.71	38.84
腐泥	1.25	30.63	5.81	3.50	30.16	40.27	137.49	1.24

新沈五号小白菜。供试泥炭采自长春市双阳区，风干、粉碎。腐泥取自东北师范大学校园内人工湖。风沙土取自吉林省西部长岭县东北师范大学松嫩草地生态研究站附近。试验前风沙土、泥炭、腐泥理化性质如表 1，粒度分析结果见表 2。

表 2 风沙土的粒度分布

粒径(mm)	含量(%)	粒径(mm)	含量(%)
>0.9	3.746 94	0.008~0.02	0.183 34
0.2~0.9	21.169 21	0.002~0.008	0.206 78
0.02~0.2	74.573 51	<0.002	0.120 22

粒度分析结果表明，该风沙土以细沙为主，达到近 75%，粗沙次之。

1.2 试验设计

本次盆栽试验共设 4 组 17 个处理。

(1)对照组(100%风沙土)，编号为 I(0)。

(2)泥炭组

I(4)4%泥炭+96%风沙土；I(8)8%泥炭+92%风沙土；I(12)12%泥炭+88%风沙土。

(3)腐泥组

(4)4%腐泥+96%风沙土；(8)8%腐泥+92%风沙土；(12)12%腐泥+88%风沙土；(16)16%腐泥+84%风沙土；(20)20%腐泥+80%风沙土；(24)24%腐泥+76%风沙土；(28)28%腐泥+72%风沙土；(32)32%腐泥+68%风沙土；(36)36%腐泥+64%风沙土；(40)40%腐泥+60%风沙土。

(4)腐泥+泥炭组

(1)36%腐泥+4%泥炭+60%风沙土；(2)32%腐泥+8%泥炭+60%风沙土；(3)28%腐泥+12%泥炭+60%风沙土。

I(0)、I(4)、I(8)、I(12)设置 6 个重复，其余处理每个设置 3 个重复。

试验 2006 年 7 月 31 日进行，时间为 75 d。按不同处理方式分别称取风沙土、泥炭和腐泥搅拌均匀装盆，每盆共装 5 kg，浇水，放置至合适时间进行播种。各盆随机放入试验场地。

1.3 测试项目及方法

在播种前和收获时，测定不同处理的容重、吸湿水、土壤 pH 值、有机质、速效氮、速效磷、速效钾和腐殖酸含量。各测试项目采用的方法如下：土

壤容重采用环刀法；吸湿水采用烘干法；pH 值采用 H-S3 型酸度计测定；土壤有机质的测定采用重铬酸钾法；速效氮用碱解扩散法；速效磷用酸性氟化铵法；速效钾用火焰光度法；腐殖酸含量采用容量法测定。

2 结果分析

2.1 盆栽试验前后不同处理土壤 pH 的变化

pH 值是影响土壤肥力的重要因素之一，土壤有机质的分解、营养元素的释放与转化、土壤发生过程中元素的迁移都与 pH 值有密切关系。本试验测定了盆栽白菜前后各处理土壤的 pH 值，测定结果见图 1。

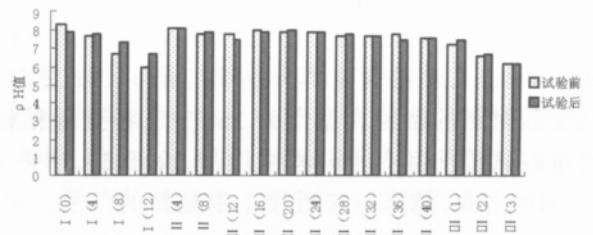


图 1 改良前后各不同处理的 pH 变化

泥炭作为改良剂的处理中，试验前，对照风沙土的 pH 值为 8.25，添加 4%、8%和 12%泥炭的处理，pH 值分别为 7.67、6.63、5.98，表明添加适量的泥炭后，风沙土的 pH 值得到很大的改善。试验后，对照风沙土的 pH 值降为 7.94，添加不同含量的泥炭较未添加泥炭风沙土的 pH 都趋于中性。试验前后的数据表明：添加泥炭对于改善风沙土的 pH 值很有好处。另外，无论试验前或者试验后，随着泥炭施入量的增加，风沙土 pH 值越来越接近中性，这是因为泥炭中含有丰富的腐殖酸，它使得泥炭具有较强的酸度调节功能。

腐泥改良风沙土，试验前，各处理与对照相比，pH 值都有所下降，介于 7.53~8.05 之间。由 Pearson 相关分析可知，pH 值变化与腐泥施入量呈显著负相关($P < 0.05$)。试验后对照的 pH 值降为 7.94，其余添加腐泥的处理较试验前都有变化，pH 值变化范围介于 7.49~8.03 之间，变幅减

小。可见添加腐泥的处理,试验前后土壤 pH 值与原风沙土比较都有降低。

混施泥炭和腐泥,试验前 pH 值在 6.13~7.23 之间变化,较对对照明显减小,但变幅小于单施泥炭的处理;试验后 pH 值 6.12~7.48 之间,由图 1 可知,随着泥炭施入量的增加,各处理 pH 值明显减小,且变化量大于单施相同比例泥炭的处理,这可能是与腐泥的施入有关。

对比试验前后,可以看出,试验后各处理土壤的 pH 趋于中性,表明试验后土壤的酸碱性质趋于好转。

2.2 不同处理下种植白菜前后物理性粘粒含量的变化

土壤中的物理性粘粒具有较大的表面积,粘聚力较强,在水稳性团聚体形成过程中具有重要作用。对于适宜耕作的壤土的粘粒含量一般在 15%~35%。粘粒过多,容易引起土壤粘重,透水、通气性差;粘粒过少,土壤通气性强,保水、蓄水性弱,易受干旱威胁。

本试验测定了试验前后各处理的物理性粘粒(<0.01mm)含量,测定结果见图 2。单施泥炭的处理,试验前对照的粘粒含量为 10.76%,添加不同比例泥炭后,粘粒含量都分别增加至 11.5%左右。试验后对照的粘粒含量变为 16.22%,各处理粘粒含量较试验前都有不同程度增加,介于 13.75%~20.61%之间,越来越接近壤土中粘粒的含量。

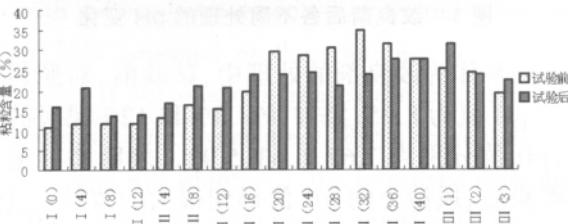


图 2 改良前后各不同处理物理性粘粒含量的变化

施用腐泥对不同处理的物理性粘粒含量具有显著影响。种植作物前,腐泥的施入明显增加了风沙土的物理性粘粒含量,以(32)为最高,达 35.05%。种植作物后,各处理的物理性粘粒含量都趋于一个平均值,为 28%。相关分析表明,腐泥的施用量与各不同处理风沙土的物理性粘粒含量呈显著正相关,种植作物前和种植后的拟合方程分别是:

$$Y_{粘粒含量} = 5.790X_{腐泥施用量} + 11.947 (R = 0.893, P < 0.01)$$

$$\text{和 } Y_{粘粒含量} = 2.522X_{腐泥施用量} + 17.487 (R = 0.880, P < 0.01)$$

混施泥炭和腐泥,试验前各处理物理性粘粒

含量与对照相比,都有不同程度增加,粘粒含量在 19.44%~25.36%之间变化。试验后各处理粘粒含量较试验前都有增加,接近适耕性土壤粘粒含量。可见腐泥比泥炭能更有效地增加土壤中的物理性粘粒含量。试验后,以处理 III(1)的增加量为最高。对比试验前后,可以看出,试验后各个处理的土壤粘粒含量趋于合理性,表明试验后土壤的质地都有一定的改善。

2.3 不同处理下种植白菜前后容重的变化

容重是衡量土壤质量的又一指标,可在很大程度上反映土壤结构的优良程度。风沙土物理性沙粒含量高,孔隙度小且以通气性孔隙为主,容重较大,结构较差,水、液、气三相比例失调。

泥炭富含有机质、疏松多孔,在风沙土中施入泥炭后,土壤的容重指标有所改善,具体表现为:与试验前的对照比较,各处理的容重均有降低,以 8%的泥炭减小最大,降低为 0.68 g/cm³;试验后,对照的容重较试验前减小,其他添加泥炭的处理,容重较试验前也有减小,以 12%泥炭的容重最小,为 0.70 g/cm³(图 3),这可能与植物根系对土壤的疏松作用有关。可见添加泥炭对风沙土容重的改良作用明显。

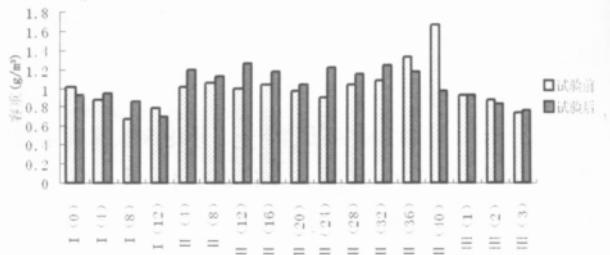


图 3 改良前后各不同处理的容重变化

在腐泥组中,由图 3 可以看到,种植前施入腐泥后,风沙土容重稍有下降,但当施入量大于 24%后,容重又急剧增加,到 36%腐泥和 40%腐泥两个处理增加速率更快。原因可能是腐泥自身容重较大而提高了风沙土的容重,因此效果反而不如对照。试验后各不同处理容重的变化范围较小,介于 0.965~1.263 之间,结构较好,接近农业土壤的容重。

在混合施加腐泥和泥炭的处理中,试验前后的容重变化不大,但是与对照相比,随着腐泥和泥炭施入量的增加,风沙土容重逐渐变小,最小值出现在 28%腐泥+12%泥炭处理中,达到 0.78 g/cm³。

由此可知,适当地添加泥炭或者腐泥,对风沙土容重具有一定的改良效果。尤其是泥炭对风沙

土容重的改良效果更为明显。

2.4 不同处理下种植白菜前后养分的变化

风沙土属于有机质不足、缺磷少氮的土壤,即养分贫瘠型土壤。泥炭中含有丰富的有机质、一定的氮、磷和钾,施入泥炭后,其肥力状况则发生了明显的变化(表 3)。试验前,随泥炭施用量增多,各处理的有机质、速效氮、速效磷、速效钾和腐殖酸

含量均有显著增加。试验后,有机质变化不明显,各处理速效氮含量较试验前显著减少,速效磷和速效钾含量也有减小,但不如速效氮的变化明显。因此,在改良后的风沙土上种植作物时,应以施用氮肥为主,配合一定的磷肥和钾肥,以平衡施肥方法获得更高的经济效益。

在腐泥处理中,试验前,随腐泥施入量的增

表 3 不同处理试验前后养分含量的变化

处理	有机质		速效 N		速效 P		速效 K		HA	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
I(0)	0.31	0.27	27.13	18.45	0.69	0.82	60.42	62.56	0.44	0.34
I(4)	1.93	1.54	97.65	11.94	5.89	4.25	80.31	61.56	2.25	2.19
I(8)	2.44	2.89	117.20	24.30	5.48	4.66	65.27	57.56	3.53	3.83
I(12)	2.35	3.80	105.0	12.37	7.26	5.34	63.91	51.75	5.53	4.65
(4)	0.22	1.02	32.12	16.28	2.60	1.92	61.42	66.05	0.51	0.49
(8)	0.48	2.11	44.05	21.92	6.71	6.30	81.42	65.93	0.52	0.07
(12)	0.36	1.07	38.63	23.22	17.67	8.90	71.98	64.85	0.53	2.33
(16)	0.11	0.79	20.18	21.48	4.38	8.77	75.08	71.90	0.52	0.69
(20)	0.14	0.63	18.45	18.23	7.53	9.45	78.48	75.01	0.45	0.62
(24)	0.29	1.47	24.96	12.59	7.67	10.69	77.16	72.40	0.65	0.43
(28)	0.18	0.41	44.05	14.11	13.29	10.41	88.49	77.48	0.68	0.65
(32)	0.31	2.49	43.62	21.70	15.34	12.88	80.67	81.62	0.68	0.85
(36)	0.37	2.75	21.27	29.30	14.52	9.45	92.46	79.38	0.74	3.31
(40)	0.60	0.76	22.79	25.61	17.67	23.56	112.80	89.30	1.02	2.43
(1)	1.30	1.61	46.66	31.47	13.43	15.89	75.70	82.76	1.87	0.58
(2)	1.84	3.25	51.00	33.51	13.29	15.62	77.73	68.67	3.49	4.08
(3)	4.14	2.39	61.85	27.56	16.99	20.32	71.23	63.79	4.87	5.31

多,土壤有机质、速效磷、速效钾和腐殖酸含量呈现一定程度的增长过程,速效氮的变化规律不明显。试验后,各不同处理的有机质含量较试验前均有不同程度的增加,其原因可能是作物根系分泌物及脱落物的增加导致种植后土壤中有机质的增加。而各不同处理的速效氮含量都有所下降,速效磷和速效钾的含量在试验前后变化不大,可见植物在生长过程中对速效氮的消耗较大,对速效磷和速效钾的需求不大,可持续利用,这与左岩波等对森林表土种植作物后化学性质变化的结论稍有不同^[9]。

混施泥炭+腐泥方面,试验前,有机质、速效氮、速效磷、速效钾和腐植酸含量随泥炭施用量的增加而增加,趋势与泥炭组相似,但增加量大于单施相同比例的泥炭。试验后,各处理的养分含量变化也与泥炭组的变化相似,且所有的养分含量都明显比泥炭组的要高。因此,混施泥炭+腐泥改良风沙土的处理要比单施泥炭或腐泥的处理要好,且以 32%腐泥+8%泥炭的改良效果最佳。

3 结 论

通过上述分析,可以得到以下几点结论:

3.1 试验前,风沙土中添加适量的泥炭,可以调节土壤的 pH 值,降低其容重,增加其有机质、氮

磷钾和腐殖酸含量。这一点,无论是在盆栽白菜前或者试验后,都可以得到证明。但是,在盆栽结束后,再次种植作物时,需要根据作物的需要,补充氮肥等。

3.2 对于腐泥而言,试验前,它能够明显提高风沙土中的粘粒含量,改善土壤质地。它对碱性土壤的 pH 值也有一定的调节作用,还在一定程度上提高了风沙土的养分含量。但是,它的添加量对土壤容重影响很大,只有比例适当,才能产生好的改良效果。试验后,腐泥的 pH 值趋近中性,粘粒含量增加,容重变幅减小,结构较好,接近农业土壤的容重。速效氮含量下降,速效磷和速效钾的含量变化不大,所以,试验前施的磷肥和钾肥可被后茬作物继续利用。

3.3 同时添加泥炭和腐泥,试验前,pH 值明显减小,粘粒和容重趋于合理,有机质、速效氮、速效磷、速效钾和腐殖酸含量都有所增加。试验后,土壤 pH 值接近中性,容重减小,土壤质地得到改善,养分含量较试验前增加,且要好于单施泥炭和单施腐泥的处理。因此,改良风沙土时,应适当地添加泥炭和腐泥,添加量以 32%腐泥+8%泥炭为最好。

参考文献:

[1] 联合国环境规划署. 全球环境展望 2000[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000, 33-34.

[2] 张哲寰, 赵海卿, 李春霞, 等. 松嫩平原土地沙化现状与动态变化[J]. 地质与资源, 2008, 17(3): 202-207.

[3] 尹宪强. 污泥堆肥使用对土壤与作物的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.

[4] 于建权, 肖映秋, 陈新, 等. 半干旱风沙区疏林式草牧场防护林的土壤改良效应[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(2): 55-58.

[5] 魏自民, 谷思玉, 赵越, 等. 有机物料对风沙土主要物理性

质的影响[J]. 吉林农业科学, 2003, 28(3): 16-18.

[6] 白雪峰, 王国晨, 刘洋, 等. 草炭改土对风沙土水分状况的影响[J]. 辽宁农业科学, 2004(4): 51-52.

[7] 邢兆凯, 张学丽, 杨树军. 施用草炭对风沙土改良效果的初步研究[J]. 辽宁农业科学, 1999(2): 39-42.

[8] 金凤鹤, 西崎泰, 山口达明, 等. 东北地区内陆苏打盐渍土旱作玉米实施泥炭改良的研究[J]. 生态学杂志, 1998, 17(1): 16-21.

[9] 左岩波, 周权, 刘坤, 等. 森林表土种植作物后化学性质变化研究初报[J]. 现代化农业, 2005, 8(313): 37-39.

(上接第 33 页)[J]. Crop Science, 1999, 39: 1464-1490.

1997, 27(4): 327-333.

[3] 张德水, 董伟, 惠东威, 等. 用栽培大豆与半野生大豆间的杂种 F₂ 群体构建基因组分子标记连锁框架图[J]. 科学通报, 1997, 42(12): 1326-1330.

[4] 宋显军. 基于 SSR 标记的大豆遗传图谱构建与重要农艺性状 QTL 定位[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.

[5] 惠东威, 陈受宜, 庄炳昌. 利用 rRNA 基因 ITS-1 序列构建的大豆属(Glycine)12 个种的种系关系[J]. 中国科学: C 辑, ***

[6] 吴晓雷, 王永军, 贺超英, 等. 大豆重要农艺性状的 QTL 分析[J]. 遗传学报, 2001a, 28(10): 947-955.

[7] 高文瑞, 陈晨, 王红铃, 等. 大豆籽粒大小的遗传及 SSR 标记分析[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(2): 107-114.

[8] Guo Bei, Shao G H, Chang R Z. A RAPD marker linked to the salt tolerant gene in soybean [J]. Soybean Genetics Newsletter, 1998, 25: 30-31.

(上接第 39 页)但同时具有降低磷利用率特性, 对于磷敏感型亲本 Nippionbare 则相反。这种现象在 Ming 等和吴平等的研究也都存在。此外, 在小麦的遗传研究中, 也发现磷利用率与磷吸收量和分蘖数呈负相关的现象。最理想的耐低磷基因型既具有高的磷吸收量的特性, 又具有高的磷利用率的特性。因此, 磷利用率在水稻耐低磷机制中的具体作用, 还有待进一步探讨。

(1): 4-8.

[2] 李华慧, 辜琼瑶, 严洪斌, 等. 水稻不同基因型全生育期耐低磷能力的鉴定、评价指标[J]. 西南农业学报, 2007, 20(5): 1036-1039.

[3] 台德卫, 张效忠, 苏泽胜, 等. 不同磷营养胁迫下水稻苗期性状基因型差异的研究[J]. 分子植物育种, 2005, 3(5): 704-710.

[4] 曹黎明, 潘晓华. 水稻不同耐低磷基因型的评价指标分析[J]. 上海农业学报, 2004, 16(4): 31-34.

[5] 杨建峰, 贺立源, 左雪冬, 等. 不同 PH 值低磷土壤上水稻磷营养特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 62-68.

[6] 高方远, 陆贤军, 康海岐, 等. 水稻耐低磷种质的苗期筛选与鉴定[J]. 作物学报, 2006, 32(8): 1151-1155.

6 水稻耐低磷研究发展方向及展望

随着植物营养遗传学、分子生物学及相关学科的不断发展和水稻磷效率相关研究取得了一定的进展及初步成果, 而且随着水稻耐低磷材料的不断挖掘及研究工作的不断展开, 人们对水稻耐低磷种质的筛选、水稻磷效率相关性状的遗传及水稻适应磷匮乏的本质将会有更深入的认识。然而我们仍需要在以下几个方面进行较为深入的研究。①不断完善水稻磷高效基因型体系; ②磷酸盐转运蛋白与水稻低磷胁迫的关系研究; ③在水稻中开展一些与磷效率密切相关的性状研究; ④开展更多的有关水稻磷胁迫的 QTLs; ⑤建立一套较为规范的、可靠可行的水稻耐低磷鉴定评价标准; ⑥进一步明确水稻磷效率相关性状与产量及其构成因素间的关系。

[7] 李锋, 曲雪艳, 潘晓华, 等. 不同水稻品种对难溶性磷利用能力的初步研究[J]. 植物营养学报, 2003, 9(4): 420-424.

[8] 明凤路, 路群, 王伟, 等. 水稻磷酸盐转运蛋白基因的克隆、表达及功能分析[J]. 中国科学 C 辑, 2006, 36(5): 385-389.

[9] 郭强, 孙淑斌, 徐国华, 等. 水稻中的磷转运蛋白基因在异源表达系统中的功能分析[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(3): 227-233.

[10] Goff S A, Ricke D, Lan T H et al. A draft sequence of the rice genome (Oryza sativa L. ssp. japonica) [J]. Science, 2002, 296: 92-100.

[11] Paszkowski U, Kroken S, Rowx C, et al. Rice Phosphate transporters include an evolutionarily divergent gene specifically activated in arbuscular mycorrhizal symbioses [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2002, 99: 13324-13329.

[12] Penghui Ai, Shubin Sun, Jianning Zhao, et al. Two rice phosphate transporters, OsPht1;2 and OsPht1;6, have different functions and kinetic properties in uptake and translocation [J]. The Plant Journal, 2009, 57: 798-809.

参考文献:

[1] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18

[13] 吴平, 倪俊建. 应用 AFLP 与 RFLP 标记研究水稻磷吸收与利用率的数量性状位点[J]. 植物学报, 2000, 42(3): 229-233.

[14] Su J, Xiao yan, Li M, et al. Mapping QTLs for phosphorus-deficiency tolerance at wheat seedling stage. Plant and Soil, 2006, 281: 25-36.