

3 种沉水植物去除水体中氮磷能力研究

潘保原^{1 2} 杨国亭¹ 穆立蔷^{1*} 马云² 李晶²

(1. 东北林业大学 哈尔滨 150040 ;2. 黑龙江省环境保护科学研究院 哈尔滨 150056)

摘 要 研究了 3 种沉水植物对不同质量浓度富营养化水体的净化能力 ,结果表明 ,轮叶黑藻、金鱼藻和狐尾藻对水体中的氮、磷都有很好的净化效果 ,对总氮去除能力从大到小依次为轮叶黑藻 > 金鱼藻 > 狐尾藻 ,对总磷去除能力从大到小依次为轮叶黑藻 > 狐尾藻 > 金鱼藻。实验表明 ,沉水植物是富营养化水体水生生态系统重建的关键 ,在水体生态修复中 ,轮叶黑藻是一种很好的水体净化沉水植物。

关键词 沉水植物 富营养化 总氮 总磷

中图分类号 S555 + 6 文献标志码 A doi :10. 7525/j. issn. 1673 - 5102. 2015. 01. 021

Removal Ability of Three Submersed Macrophytes on Nitrogen and Phosphorus from Water

PAN Bao-Yuan^{1 2} YANG Guo-Ting¹ MU Li-Qiang^{1*} MA Yun² LI Jing²

(1. Northeast Forestry University ,Harbin 150040 ;2. Heilongjiang Research Institute of Environmental Protection Science ,Harbin 150056)

Abstract We studied the effects of three submersed macrophytes of *Hydrilla verticillata* , *Ceratophyllum demersum* L. and *Myriophyllum verticillatum* L. on eutrophication water under different nutrition conditions. Three submersed macrophytes eliminated total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) effectively in water. The eliminate capacity for TN from high to low was *H. verticillata* , *C. demersum* L. and *M. verticillatum* L. , and for TP the order was *H. verticillata* , *M. verticillatum* L. and *C. demersum* L. . Therefore , the submersed macrophytes is a significant method to reconstruct the eutrophic water ecosystem , and *H. verticillata* is a good purifying plant in eutrophic water.

Key words submersed macrophytes ,eutrophication ,total nitrogen(TN) ,total phosphorus(TP)

水体富营养化是全球水资源短缺重要因素之一 ,也是全球重大水环境污染问题之一^[1~2]。水生植物是水生态系统的重要组成部分 ,通过水生植物的物理、化学和生物过程及协同作用 ,改善水生生态体系平衡 ,吸收水体中的营养物质 ,净化受污染水体已成为一种高效低成本的生物技术^[3]。在富营养条件下 ,沉水植物利用根、茎、叶吸收营养物质 ,是较好的净化水体的水生植物^[4]。轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)和狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* L.)是多年生沉水植物 ,分布广、适应性强、生长快 ,是理想的净化水体的植物^[5~6]。我国国土面积大、水域多 ,南北水环境差异很大 ,针对北方寒

冷地区污染水体进行水生植物生态修复研究较少 ,本研究以沉水植物轮叶黑藻、金鱼藻和狐尾藻为实验材料 ,在不同氮、磷质量浓度的水体中 ,研究 3 种沉水植物对水体中氮、磷的净化效果 ,分析 3 种沉水植物在富营养化水体中对氮、磷的去除能力 ,为利用沉水植物修复北方寒冷地区富营养化水体提供理论依据 ,对水体富营养化防治也有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

沉水植物轮叶黑藻、金鱼藻和狐尾藻取自牡丹江市南湖公园和阳明公园 ,水体取自南湖公园。

基金项目 :国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201002)

第一作者简介 :潘保原(1980—)男 ,高级工程师 ,博士研究生 ,主要从事水污染防治及生态修复技术研究。

* 通信作者 E-mail :mlq0417@163. com

收稿日期 2014 - 09 - 15

1.2 实验设计

将采集的沉水植物放置在含有南湖水的玻璃缸中,培养一周,选取生长良好、长度一致的植株(平均株长 20 cm),每份 20 株,移栽到玻璃水缸(规格:长 40 cm、宽 40 cm、高 60 cm)中。将磷酸二氢钾(KH_2PO_4)和硝酸铵(NH_4NO_3)加入到南湖水体中,配置 3 个不同氮、磷质量浓度的培养水体($\text{TN} 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{TN} 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{TN} 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),将培养水体倒入玻璃水缸中,实验设置 3 个平行。

实验室内培养,每日光照 7~8 h,水体温度控制在 15~20℃,实验进行 40 d,第 1、10、20、30 和 40 d 取水样进行 TN 和 TP 的测定。

1.3 分析方法

TP 采用硫酸钾消解钼锑抗分光光度法测定, TN 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定^[7]。

2 结果与分析

实验期间,轮叶黑藻生长状况良好,植物呈鲜绿色,茎、叶得到较好的发育;金鱼藻生长缓慢,但植株颜色正常,呈鲜绿色;狐尾藻生长缓慢,植株颜色后期出现变黄,叶子有部分脱落。

2.1 水体中 TP 的浓度变化

从图 1 中可以看出,在轮叶黑藻 3 种培养水体中,总磷浓度均有不同程度的下降,总磷浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体在前 10 d 去除效果明显,总磷 10 d 去除率为 29.35%;总磷浓度为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体在第 10~20 d 去除效果明显,总磷这 10 d 去除率为 38.66%;3 种培养水体 30 d 时总磷平均去除率为 57.37%,40 d 时为 59.78%。实验表明,随着时间的推移,总磷浓度越高,轮叶黑藻对总磷去除率越高。总磷浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体去除效果最显著,30 d 时总磷平均去除率为 60.56%,40 d 时为 63.13%。

从图 2 中可以看出,在狐尾藻 3 种培养水体中,总磷浓度均有不同程度的下降,总磷浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体前 20 d 去除效果明显,总磷 20 d 去除率为 36.23%;总磷浓度为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体在第 20~30 d 去除效果明显,总磷浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体前 20 d 去除效果明显,3 种培养水体 30 d 时总磷平均去除率为 39.37%,40 d 时为 42.38%。总磷浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体去除效果最明显,30 d 时总磷平均去除率为 46.15%,40 d 时为 45.66%。

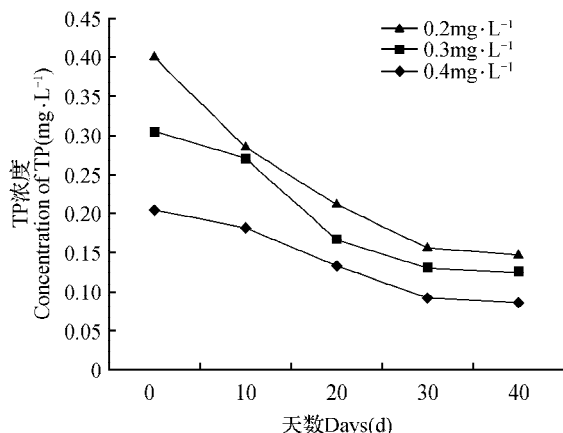


图 1 轮叶黑藻水体中总磷的浓度变化

Fig. 1 Time course of TP concentration in water of *H. verticillata*

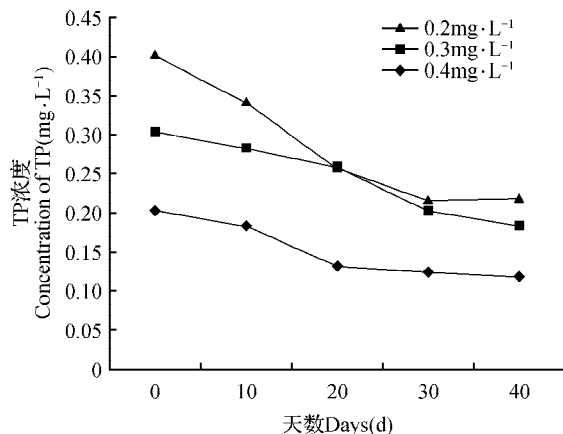


图 2 狐尾藻水体中总磷的浓度变化

Fig. 2 Time course of TP concentration in water of *M. verticillatum* L.

从图 3 中可以看出,在金鱼藻 3 种培养水体中,总磷浓度均有不同程度的下降,总磷浓度为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体在第 10~20 d 时去除效果明显,总磷这 10 d 去除率为 24.91%;3 种培养水体 30 d 时总磷平均去除率为 34.56%,40 d 时为 37.12%。总磷浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体去除效果最显著,30 d 时总磷平均去除率为 35.48%,40 d 时为 39.27%。

2.2 水体中 TN 的浓度变化

从图 4 中可以看出,在轮叶黑藻 3 种培养水体中,总氮浓度均有不同程度的下降,总氮浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体在前 20 d 去除效果明显,总氮前 20 d 去除率为 45.78%;总氮浓度为 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养水体在第 10~20 d 去除效果明显,总氮这 10 d 去除率为 35.43%;3 种培养水体 30 d 时总氮

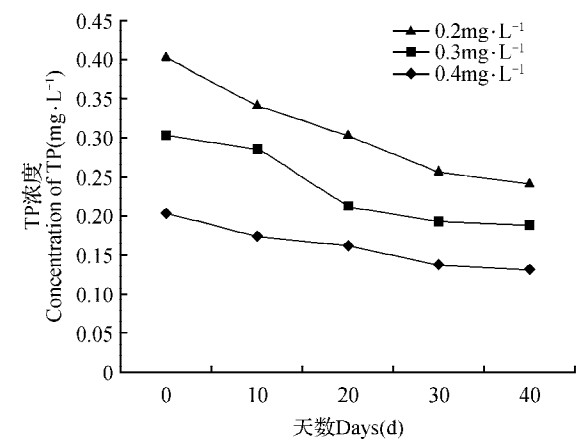


图3 金鱼藻水体中总磷的浓度变化

Fig.3 Time course of TP concentration in water of *C. demersum* L.

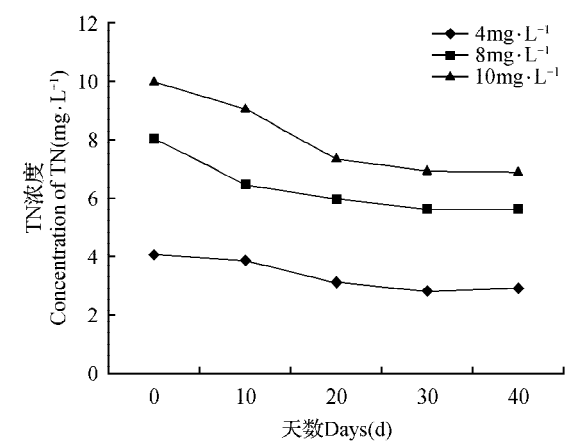


图5 狐尾藻水体中总氮的浓度变化

Fig.5 Time course of TN concentration in water of *M. verticillatum* L.

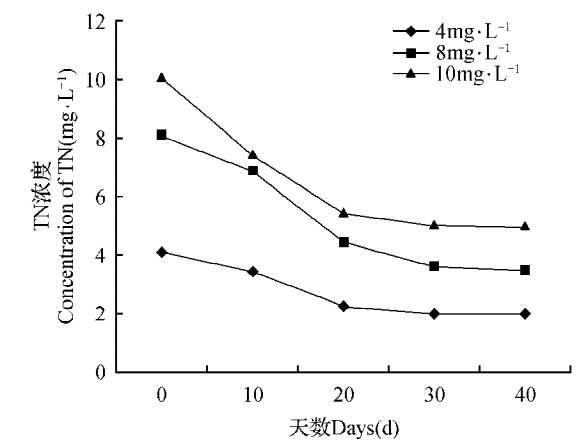


图4 轮叶黑藻水体中总氮的浓度变化

Fig.4 Time course of TN concentration in water of *H. verticillata*

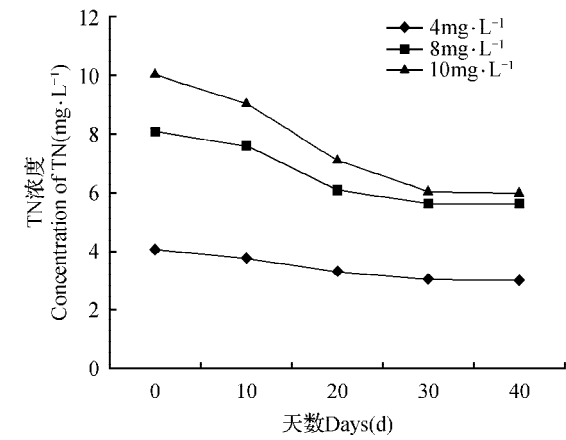


图6 金鱼藻水体中总氮的浓度变化

Fig.6 Time course of TN concentration in water of *C. demersum* L.

平均去除率为 51.94% ,40 d 时为 52.52%。总氮浓度为 8 mg · L⁻¹ 的培养水体去除效果最显著 ,30 d 时总氮平均去除率为 55.17% ,40 d 时为 56.41%。

从图 5 中可以看出 ,在狐尾藻 3 种培养水体中 ,总氮浓度均有不同程度的下降 ,总氮浓度为 10 mg · L⁻¹ 的培养水体前 20 d 去除效果明显 ,总氮前 20 d 去除率为 26.35% ;总氮浓度为 8 mg · L⁻¹ 的培养水体在前 10 d 去除效果明显 ;总氮浓度为 4 mg · L⁻¹ 的培养水体前 20 d 去除效果明显 ,3 种培养水体 30 d 时总氮平均去除率为 30.23% ,40 d 时为 29.91%。总氮浓度为 10 mg · L⁻¹ 的培养水体去除效果最显著 ,30 d 时总氮平均去除率为 30.33% ,40 d 时为 30.79%。

从图 6 中可以看出 ,在金鱼藻 3 种培养水体中 ,总氮浓度均有不同程度的下降 ,总氮浓度为 10 和 8 mg · L⁻¹ 的培养水体在第 10 ~ 20 d 时去除效果明显 ,3 种培养水体 30 d 时总氮平均去除率为 31.64% ,40 d 时为 32.11%。总氮浓度为 10 mg · L⁻¹ 的培养水体去除效果最显著 ,30 d 时总氮平均去除率为 39.76% ,40 d 时为 40.06%。

2.3 沉水植物对不同处理浓度水体氮、磷去除效果

通过 spss17.0 相关分析中的偏相关分析得出 ,3 种沉水植物在不同处理浓度的水体中总氮、总磷去除率与处理时间的相关性 ,如表 1 所示。轮叶黑藻在总氮浓度为 4 和 10 mg · L⁻¹ 时 ,总磷的去除率和净化时间的相关性显著 ;在总磷浓度为 0.4 mg · L⁻¹ 时 ,总氮的去除率和净化时间的相关性较好。金鱼藻在总氮浓度为 8 mg · L⁻¹ 时 ,总

磷的去除率和净化时间的相关性显著。狐尾藻在总氮浓度为 $10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,总磷的去除率和净化时间的相关性显著;当处理浓度为总氮 $8\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷 $0.30\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氮、磷去除率和净化时间相关性较好。

表 1 总氮、总磷去除率的偏相关性
Table 1 Partial correlation analysis on removal efficiency of TN and TP

相关系数 Correlation coefficient	处理浓度 Treatment concentration					
	TN		TP		TN	
	$4\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$8\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.3\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.4\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
轮叶黑藻 <i>H. verticillata</i>	0.399	0.860	0.128	0.06	0.731	0.870
金鱼藻 <i>C. demersum</i> L.	0.082	0.325	0.218	0.910	0.219	0.056
狐尾藻 <i>M. verticillatum</i> L.	0.194	0.669	0.771	0.748	0.517	0.800

通过偏相关系数分析得出:轮叶黑藻在氮、磷高浓度的水体中,总氮、总磷的去除率与净化时间的相关性较好;狐尾藻在一定的氮、磷浓度水体中,总氮、总磷的去除率与净化时间的相关性较好;在金鱼藻净化的水体中,总氮、总磷的去除率与净化时间的相关性较弱。

3 讨论

氮、磷是水体富营养化的关键指标,沉水植物对水体中氮、磷去除,使得水质达到稳定,是恢复水生态平衡的主要措施之一^[8]。不同的沉水植物种类对水质有不同的影响,其本身对营养盐的吸收能力也不同。李晶等研究了轮叶黑藻去除水中氮磷能力研究,研究得出,轮叶黑藻对水体中总磷、总氮都有较好的去除效果^[9]。吴娟等研究了黑藻对水体营养元素的去除作用,结果表明,黑藻对水体中的总氮、总磷去除率分别为 71.9% 和 61.2%^[10]。雷泽湘等研究了大型水生植物对太湖梅梁湾富营养化湖水的净化效果,结果表明,苦草、眼子菜、轮叶黑藻等植物对水体中的总磷和总氮都有较好的去除效果,去除率在 60% 以上^[11]。童昌华研究了水葫芦、金鱼藻、狐尾藻等水生植物对富营养化水体修复作用,结果表明,狐尾藻在吸收总氮、总磷及硝态氮等方面效果好^[12]。本实验研究得到了相似的结果,通过研究轮叶黑藻、金鱼藻和狐尾藻对水中营养物质的去除效果,了解不同种类沉水植物对水中氮、磷去除能力,选择本地

抗污力强、净化效果好的沉水植物,以达到最佳的水质净化效果,为水体生态系统恢复选择先锋物种提供理论依据^[13-14]。

氮、磷浓度升高,增加了水中营养物质含量,促进植物吸收,植物体内氮、磷富集量升高,植物加快生长,从而有效地降低水体中氮、磷浓度。同时,植物根系为微生物提供良好的生存环境,营养物质充足,微生物降解物质的能力越强,从而降低水中污染物质浓度。在一定浓度范围内,沉水植物对水体的净化效率随着水中氮、磷浓度的增大而增加。本实验研究发现,TP 的去除效率是轮叶黑藻 > 狐尾藻 > 金鱼藻, TN 的去除效率是轮叶黑藻 > 金鱼藻 > 狐尾藻。轮叶黑藻对水体中的氮、磷去除效率最好,TP 的去除效率随着浓度的增大而增加,培养 30 d 时水体中 TP 浓度呈显著性下降,30 d 后净化效率不明显;当水体总氮浓度为 $8\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,去除效率最大,随着总氮浓度的增加,去除效率会有降低。通过偏相关分析得出,在高浓度的水体中,随着处理时间的延长,轮叶黑藻对水体中总氮、总磷的去除率越高。

实验证明,轮叶黑藻适合于氮、磷浓度较高水体的植物净化,并且生存能力强,适应力好,易生长,富集能力大,是一种较好的水体净化植物,在北方地区富营养化的景观水体中可以选择轮叶黑藻作为先锋物种,进行水体生态修复。此外,实验还发现,水生植物在培养一定时间后,氮、磷的去除能力就会明显下降或略有升高(如狐尾藻),说明随着水中营养物质浓度升高,水体对水生植物形成逆境胁迫,产生氮、磷危害,影响了植物的正常生理活动,抑制植物正常生长,降低了去除能力。因此,为保证沉水植物对水中营养物质的最大去除效果,防止因水生植物死亡后,腐败分解,释放营养物质和有毒有害物质而造成水体二次污染,应对沉水植物采取合理的收获措施并探索开发植物资源化利用技术。实验得出了各处理水体中植物对营养物质的吸收效果,说明水生植物在水体生态修复中有很好的应用前景,但仍需进一步研究除植物作用外,在水生植物作用下,水体中微生物群落变化情况对水体的影响研究。

参 考 文 献

1. 国家环保总局科技标准司. 中国湖泊富营养化及其防治研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2001.
2. 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:北

- 学工业出版社 2001.
3. 郭培章, 宋群. 中外水体富营养化治理案例研究[M]. 北京: 中国计划出版社 2003.
 4. 宋福, 陈艳卿, 乔建荣, 等. 常见沉水植物对草海水体(含底泥)总氮去除速率的研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(4): 47 - 50.
 5. 吴振斌, 邱东茹, 贺锋等. 水生植物对富营养化水体水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究 2001, 9(4): 299 - 303.
 6. 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养化水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1351 - 1353.
 7. 国家环保局编. 水和废水监测分析方法: 第 4 版[M]. 北京: 中国环境科学出版社 2002.
 8. 郭俊秀, 许秋瑾, 金相灿, 等. 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长的影响[J]. 环境科学学报 2009, 29(1): 118 - 123.
 9. 李晶, 马云, 周浩, 等. 轮叶黑藻去除水体中氮磷能力研究[J]. 环境科学与管理 2010, 33(8): 13 - 18.
 10. 吴娟, 吴振斌, 成水平. 黑藻对水体和沉积物物理化的改善和营养元素的去除作用[J]. 水生生物学报 2009, 33(4): 589 - 595.
 11. 雷泽湘, 谢贻发, 徐德兰, 等. 大型水生植物对富营养化湖水净化效果的试验研究[J]. 安徽农业科学 2006, 34(3): 553 - 554.
 12. 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报 2004, 15(8): 1447 - 1450.
 13. 颜昌宙, 曾阿妍, 金相灿, 等. 不同浓度氨氮对轮叶黑藻的生理影响[J]. 生态学报 2007, 27(3): 1050 - 1055.
 14. 王朝晖, 江天久, 纪桑, 等. 水网藻(*Hydrodictyon reticulatum*)对富营养化水样中氮磷去除能力的研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 448 - 452.
 15. 葛滢, 王晓玥, 常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(6): 690 - 692.
 16. Allna R J. What is aquatic ecosystem restoration[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 1997, 32(2): 229 - 234.
 17. Reily J F, Horne A J, Miller C D. Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge[J]. Ecol Eng, 2000, 14(1): 33 - 47.

(上接 140 页)

12. Focks N, Benning C. wrinkled1: a novel, low-seed-oil mutant of *Arabidopsis* with a deficiency in the seed-specific regulation of carbohydrate metabolism[J]. Plant Physiology, 1998, 118: 91 - 101.
13. Baud S, Boutin J P, Miquel M, et al. An integrated overview of seed development in *Arabidopsis thaliana* ecotype WS[J]. Plant Physiology and Biochemistry 2002, 40: 151 - 160.
14. Baud S, Graham I A. A spatiotemporal analysis of enzymatic activities associated with carbon metabolism in wild-type and mutant embryos of *Arabidopsis* using in situ histochemistry[J]. The Plant Journal 2006, 46: 155 - 169.
15. Periappuram C, Steinhauer L, Barton D L, et al. The plastidic phosphoglucomutase from *Arabidopsis*. A reversible enzyme reaction with an important role in metabolic control[J]. Plant Physiology 2000, 122: 1193 - 1199.
16. Vigeolas H, Mohlmann T, Martini N, et al. Embryo-specific reduction of ADP-Glc pyrophosphorylase leads to an inhibition of starch synthesis and a delay in oil accumulation in developing seeds of oilseed rape[J]. Plant Physiology, 2004, 136: 2676 - 2686.
17. Smith A M, Andriotis V M E, Pike M J, et al. Starch turnover in developing oilseed embryos[J]. New Phytologist, 2010, 187: 791 - 804.
18. Eren A, Kocatürk M, Hosgün E Z, et al. Determination of seed yield, protein, oil content and fatty acid compositions and relationships of some soybean lines/cultivars[J]. Ziraat Fakültesi Dergisi-Süleyman Demirel Üniversitesi, 2012, 7: 1 - 9.
19. Kennedy Y, Yokoi S, Daimon H, et al. Genetic variation of storage compounds and seed weight in rapeseed (*Brassica napus* L.) germplasms[J]. Breeding Science, 2011, 61: 311 - 315.
20. Ohlrogge J B, Jaworski J G. Regulation of fatty acid synthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1997, 48: 109 - 136.
21. Fofana B, Cloutier S, Duguid S, et al. Gene expression of stearoyl-ACP desaturase and $\Delta 12$ fatty acid desaturase 2 is modulated during seed development of Flax (*Linum usitatissimum*) [J]. Lipids 2006, 41: 705 - 712.