

绿潮硬毛藻衰亡分解过程中营养盐的释放规律

孟祥森¹, 邵雪琳¹, 高丽¹, 魏权¹, 徐刚²

(1. 烟台大学 海洋学院, 山东 烟台 264005; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 通过室内模拟, 研究了不同环境条件下绿潮硬毛藻的分解速率, 以及死亡藻体内营养盐的释放规律, 以阐明硬毛藻大量衰亡对天鹅湖水质的潜在影响。结果显示, 温度对硬毛藻分解速率的影响显著 ($P < 0.01$), 高温 (30℃) 可促进藻体的分解, 而沉积物和营养盐水平对分解的影响相对较小。在试验前期 (0 ~ 7 d), 硬毛藻的分解速率较大, 藻体中的 P 向水体大量释放; 而 N 的释放量较低, 并呈持续释放的趋势。P 释放率最高可达 91.63%, 而 N 仅为 73.01%。温度、沉积物对藻体 N、P 释放的影响显著 ($P < 0.01$), 各因子对藻体 P 释放的影响效应表现为: 温度 > 沉积物 > 营养盐水平; N 释放为: 沉积物 > 温度 > 营养盐水平。高温条件下, 死亡藻体的 N、P 释放率均较高。因此, 在温度较高的夏末秋初, 应及时清理湖区中的死亡藻体, 以免导致水质恶化, 造成二次污染。

关键词: 硬毛藻; 分解速率; 营养盐; 释放

中图分类号: Q178.53; X55 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2016)04-0495-06

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2016.04.003

The research on nutrients release during the decomposition of *Chaetomorpha* sp.

MENG Xiang-sen¹, SHAO Xue-lin¹, GAO Li¹, WEI Quan¹, XU Gang²

(1. Ocean School, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: The decomposition rate of *Chaetomorpha* sp. at different conditions and the release discipline of nutrients from the algal issue were studied in laboratory. The aim of this study was to explain the potential influence of *Chaetomorpha* decomposition on water quality in Swan Lake. The results showed that the decomposition rate of *Chaetomorpha* was significantly influenced by temperature ($P < 0.01$) and high temperature (30℃) could promote the decomposition. However, the effects of sediment and nutrient level on algal decomposition were relatively small. During the early decomposition (0 ~ 7 d), the decomposition rate was large and a lot of phosphorus in algal issue was released into the water, while the nitrogen release was slow and last for a long time. The highest release rate of phosphorus reached to 91.63%, while the highest nitrogen release rate just reached to 73.01%. The release rate of nitrogen and phosphorus was obviously influenced by temperature and sediments ($P < 0.01$). The effects of different factors on phosphorus release followed the order of temperature > sediment > nutrient level, while that of nitrogen release was sediment > temperature > nutrient level. The release rate of nitrogen and phosphorus was both higher on high temperature conditions. Therefore, the dying *Chaetomorpha* should be removed in time to avoid the deterioration of water quality and secondary pollution in the early autumn.

Key words: *Chaetomorpha*; decomposition rate; nutrients; release

收稿日期: 2015-10-14, 修订日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41273130, 41573120); 烟台大学研究生科技创新基金项目 (YDZD1615)

作者简介: 孟祥森 (1990-), 女, 山东莒县人, 硕士研究生, 主要研究方向为滨海湿地生态与环境, E-mail: mengxiangsen104@126.com

通讯作者: 高丽, E-mail: ligao117@126.com

近年来,随着水体富营养化日益加重,我国黄渤海地区绿潮暴发频率也逐年增高,水体生态环境遭到严重破坏,导致鱼类和其他水生生物大量死亡^[1]。绿潮藻类具有生长快、营养盐富集能力强等特点;但绿潮藻体在衰亡过程中,可对水体水质以及水土界面的理化环境产生明显影响^[2]。孙小静等^[3]对蓝藻水华衰亡分解的研究表明,蓝藻在分解过程中会向水体释放大量的胶体态和颗粒态营养盐。死亡藻体分解过程中N、P的大量释放,使得水体营养盐含量发生明显变化,从而影响了湖泊生态系统的物质循环。因此,藻华消亡对水体营养盐循环的影响已逐渐成为国内外学者关注的焦点^[4-5]。

目前,关于藻华消亡对水体营养盐循环的研究已有大量报道,主要包括刚毛藻分解对上覆水P含量及赋存形态的影响^[6]、蓝藻水华衰亡对沉积物N、P释放的影响^[7]、水生植物分解过程及其对水质的影响^[8]、沉水植物黑藻早期分解过程及影响因素的研究^[9]等等。但这些研究主要集中于藻体死亡过程中水体N、P含量的变化,而对于藻体内营养盐释放规律的研究较少。硬毛藻作为天鹅湖的优势种之一^[10],死亡藻体的分解对湖区水质影响明显。本试验通过室内模拟,研究在不同温度、沉积物和营养盐水平条件下,硬毛藻的分解规律以及藻体N、P释放的特征,旨在阐明不同环境条件下硬毛藻衰亡分解对上覆水体营养水平的潜在影响,研究结果可为湖泊水质的治理和绿潮防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014年10月,在天鹅湖硬毛藻暴发区域(37°21.447'N,122°34.301'E),采集表层沉积物(0~10 cm)、生长良好的硬毛藻和表层湖水。将样品运回实验室,去除沉积物中动植物残体和砾石后,混匀冷藏(2℃)备用。将湖水过滤,测定基本理化参数。去除硬毛藻藻体表面的附生生物,洗净后冷冻杀死(-20℃,48 h),并分析藻体初始N、P含量。

1.2 试验设计

根据天鹅湖常年温差及环境状况,选取温度、沉积物、营养盐水平三个因子,进行分解模拟试验。温度设置10℃、20℃、30℃三个水平;营养盐

设置0(低浓度)、1 mg/L(中浓度)、3 mg/L(高浓度)三个水平(以P计,并按照16:1的比例设定N含量),添加磷酸二氢钾和硝酸钾调节营养盐水平;沉积物设有沉积物和无沉积物两个水平。试验共18个处理,每个处理设三次重复。试验在玻璃缸(长20 cm,宽30 cm,高20 cm)中进行,将2.50 kg冷藏的沉积物均匀铺满玻璃缸底,然后小心加入备用湖水。将冷冻过的死亡藻体剪碎并放入尼龙袋(100目,10 cm×10 cm)中,每袋装入10.00 g(FW),每个玻璃缸中放入14袋。所有试验均在光照培养箱中进行,试验周期为14 d。

1.3 测定指标与方法

试验过程中,每日取样,测定藻体剩余生物量,计算藻体分解速率;同时测定藻体N、P含量,并计算藻体N、P的释放率。

分解速率计算公式为:

$$k = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times \frac{1}{t} \times 100\%$$

式中: k 为分解速率(%/d); M_0 和 M_t 分别为藻体初始干重和分解结束后藻体干重(g); t 为分解时间(d)。

藻体N、P释放率的计算公式为:

$$r = \frac{C_0 M_0 - C_t M_t}{C_0 M_0} \times 100\%$$

式中: r 为藻体N、P释放率(%); C_0 、 C_t 分别为试验初始和分解结束时藻体中总P含量(10^{-3}); M_0 、 M_t 分别为试验起始和分解结束时的藻体干重(g)。

1.4 数据处理

运用SPSS 19.0统计分析软件,进行温度、沉积物和营养盐水平的三因素方差分析,检验三种因子及其交互作用对分解速率和藻体N、P释放率的影响,数据分析之前进行方差齐性检验。

2 结果与讨论

2.1 温度和营养盐水平对硬毛藻分解速率的影响

水生植物分解是一个复杂的生物物理化学过程,受诸多因素的影响,如温度、营养盐水平以及周边微生物分布等^[11-12]。不同环境条件下,硬毛藻的分解速率在1.25%/d~12.18%/d之间变化(图1)。试验前7 d,相同营养盐水平条件下,不同温度藻体的分解速率表现为:30℃ > 20℃ >

10℃,可见温度越高,各处理硬毛藻藻体的分解速率越大(图 1a 和图 1c),分解速率最高可达 12.18%/d。

在试验前期 相同温度条件下,有沉积物组分分解速率表现为:3 mg/L 组 > 1 mg/L 组 > 0 组;而无沉积物组规律不明显。在硬毛藻分解前期,沉

积物存在可促进死亡藻体的分解;而试验后期沉积物的影响较小。相同温度和营养盐水平条件下,试验后期(8~14 d)藻体分解速率明显降低(图 1b 和图 1d)。在试验条件为有沉积物、高温(30℃)和中浓度时,试验前期(0~7 d)藻体分解速率为 12.18%/d,而试验后期仅为 4.25%/d。

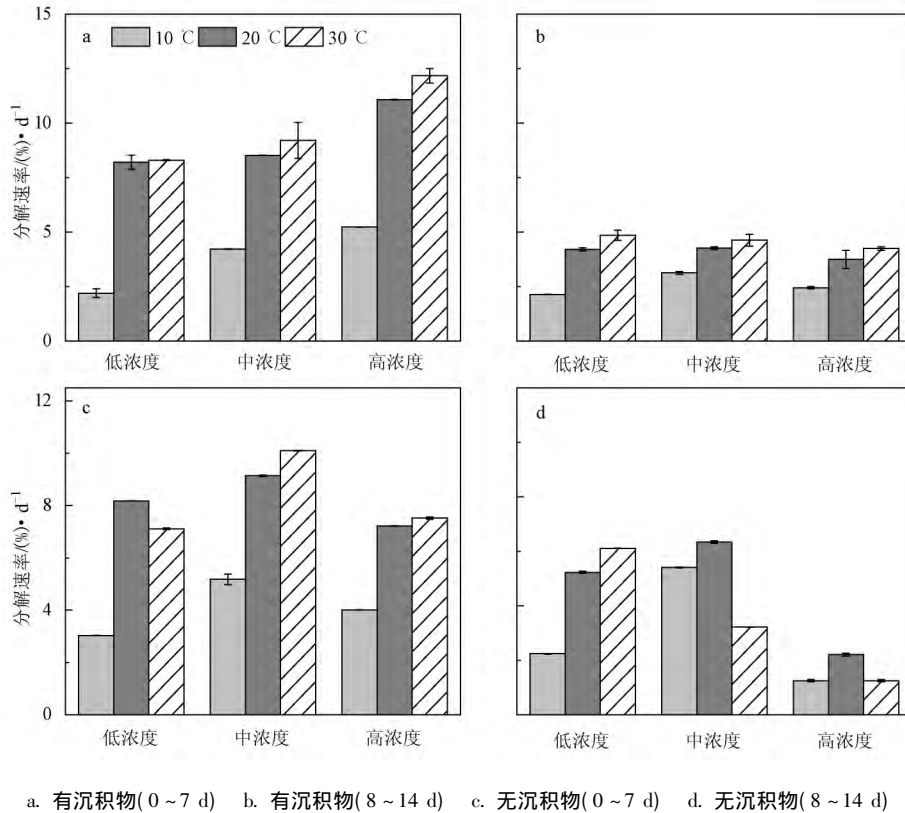


图 1 不同环境条件下硬毛藻的分解速率

Fig. 1 The decomposition rate of *Chaetomorpha* at different environmental conditions

三因素方差分析结果显示(表 1) 温度、沉积物和营养盐水平对藻体分解速率的影响均达显著水平($P < 0.01$)。各因子对分解速率的影响效应依次为: 温度 > 沉积物 > 温度 × 沉积物 > 温度 × 营养盐水平 > 营养盐水平 > 温度 × 沉积物 × 营养盐水平 > 沉积物 × 营养盐水平。可见,温度对硬

毛藻分解速率的影响最大。Lastra 等^[13]研究发现,夏季水生植物残体分解速率明显高于冬季,这与本实验结论基本一致。对于天鹅湖中的硬毛藻而言,夏末季节藻体开始衰亡,而湖水温度仍然较高,硬毛藻藻体分解较快,因此应及时将湖中死亡藻体清理,以免进一步恶化水质。

表 1 三因素方差分析检验温度、沉积物和营养盐水平等对硬毛藻分解速率的影响

Tab. 1 ANOVA for effects of temperature, sediments and nutrient level on decomposition rate of *Chaetomorpha*

误差来源	自由度	均方	F	P	η^2
温度	1	0.003	70.945	<0.001	0.959
沉积物	4	0.205	36.074	<0.001	0.879
营养盐水平	1	0.008	9.218	<0.001	0.618
温度 × 沉积物	1	0.004	15.280	<0.001	0.783
温度 × 营养盐水平	4	0.026	11.042	<0.001	0.657
沉积物 × 营养盐水平	4	0.004	8.483	0.007	0.165
温度 × 沉积物 × 营养盐水平	12	0.003	6.181	0.005	0.525
误差	21	<0.001			

2.2 不同环境条件下硬毛藻藻体 N 的释放规律

水生植物死亡后,残体分解会向水体中释放大量的营养物质^[14-15]。谢理等^[16]研究发现,芦苇和茭草在死亡后 120 h 内可迅速释放大量营养盐。由图 2 可知,硬毛藻分解过程中,藻体中 N 的释放率变化在 5.23% ~ 73.01%,各处理间差异较大。对于有沉积物处理组,相同营养盐水平

条件下,30℃时藻体 N 释放率总体高于 10℃和 20℃(图 2a);水体营养盐水平为低浓度时,N 释放率表现为:30℃ > 20℃ > 10℃,30℃时 N 释放率高达 73.01%,而 10℃时仅为 27.16%。在无沉积物处理组中,高温藻体的 N 释放率也明显高于中低温(10℃和 20℃)。综合分析可知,高温(30℃)对硬毛藻死亡藻体中 N 的释放具有促进作用。

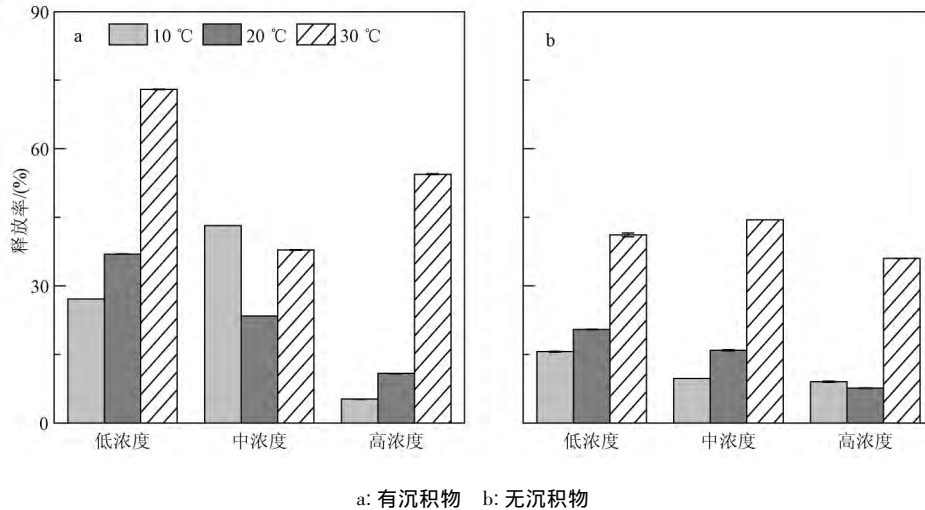


图 2 硬毛藻在不同处理下 N 释放率的差异

Fig. 2 Differences in nitrogen release rate of *Chaetomorpha* among different treatments

对于有沉积物处理组,中低温(10℃和 20℃)条件下,水体营养盐水平越低,藻体 N 释放率则越高;水体为低营养盐水平时,藻体 N 释放量最大,而高营养盐水平时最小。可见,在中低温情况下,水体高浓度营养盐可抑制藻体中 N 的释放。在无沉积物处理组中,相同温度条件下,水体为中低营养盐水平时的 N 释放率明显高于高营养盐水平。比较图 2a 和图 2b 可知,相同营养盐水平条件下,20℃时有沉积物组藻体 N 释放率较无沉积物组高。这可能是因为沉积物富含大量微生物,且能够吸附水体中的 N,从而间接地促进了藻体 N 的释放^[17]。

三因素方差分析表明,温度、沉积物和营养盐水平对死亡硬毛藻 N 释放率的影响显著($P < 0.01$);与温度和营养盐水平相比,沉积物对 N 释放的影响更为显著。不同因素对藻体 N 释放率的影响大小依次为:沉积物 > 温度 > 温度 × 沉积物 > 温度 × 营养盐水平 > 营养盐水平 > 温度 × 沉积物 × 营养盐水平 > 沉积物 × 营养盐水平(表 2)。表明温度、沉积物对藻体分解过程中 N 释放的影响较大,而营养盐浓度较小。可见,在温度较高的夏末秋初,硬毛藻的大量死亡分解将对水体 N 水平产生一定影响。

表 2 三因素方差分析检验温度、沉积物和营养盐水平等对硬毛藻 N 释放率的影响

Tab. 2 ANOVA for effects of temperature, sediments and nutrient level on release rate of nitrogen from *Chaetomorpha*

误差来源	自由度	均方	F	P	η^2
温度	2	3415.975	87.551	<0.001	0.942
沉积物	1	3506.277	89.865	<0.001	0.981
营养盐水平	2	947.194	24.276	<0.001	0.569
温度 × 沉积物	2	3012.961	82.639	<0.001	0.894
温度 × 营养盐水平	4	1375.149	35.245	<0.001	0.822
沉积物 × 营养盐水平	2	287.460	7.368	0.002	0.144
温度 × 沉积物 × 营养盐水平	4	512.803	13.143	<0.001	0.314
误差	36	39.017			

2.3 不同环境条件下硬毛藻藻体 P 的释放规律

图 3 显示, 在无沉积物处理组中, 营养盐水平为中低浓度时, 30℃ 条件下藻体 P 的释放率均较 20℃ 和 10℃ 大。其中, 在低营养盐水平条件下, 10℃ 时 P 释放率仅为 18.55%, 而 30℃ 时高达 91.63%。对于有沉积物处理组, 在中高温(20℃ 和 30℃) 条件下, 营养盐水平为低浓度时藻体 P 释放量最大, 高浓度时最小, 可见高营养盐水平可

抑制藻体中 P 的释放。

三因素方差分析显示, 不同因素对藻体 P 释放率的影响大小依次为: 温度 > 沉积物 > 温度 × 沉积物 > 沉积物 × 营养盐水平 > 营养盐水平 > 温度 × 沉积物 × 营养盐水平 > 温度 × 营养盐水平 (表 3)。表明温度、沉积物对藻体分解过程中 P 释放的影响较大, 营养盐水平次之, 而三者的交互作用影响较小。

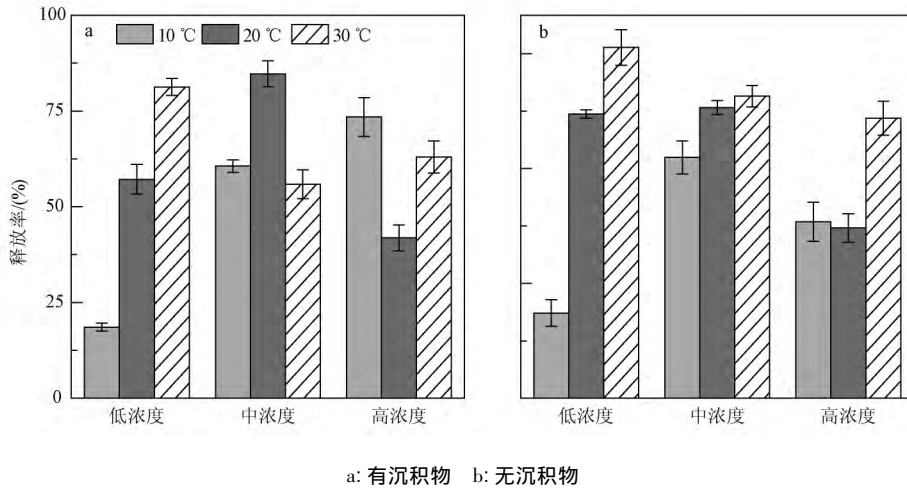


图 3 硬毛藻在不同处理下 P 释放率的差异

Fig. 3 Differences in phosphorus release rate of *Chaetomorpha*. among different treatments

硬毛藻衰亡分解过程中, 藻体 N、P 的释放率均受温度和营养盐水平等的影响, 但两者的释放规律存在一定差异。在温度、沉积物、营养盐水平均相同的试验条件下, 藻体 P 释放率明显高于 N 释放率, P 释放率最高可达 91.63%, 而 N 释放率最高仅为 73.01%。试验前期(0 ~ 7 d), 硬毛藻

死亡藻体中 P 含量迅速降低, 而 N 含量降幅较小, 并呈现持续降低的趋势。李柯等^[18]研究发现, 蓝藻碎屑 P 释放速率要高于 N, 但其导致的水体中溶解性总 N 浓度的升高则较溶解性总 P 持续时间更长, 这与本研究结果相似。

表 3 三因素方差分析检验温度、沉积物和营养盐水平对硬毛藻 P 释放率的影响

Tab. 3 ANOVA for effects of temperature, sediments and nutrient level on release rate of phosphorus from *Chaetomorpha*

误差来源	自由度	均方	F	P	η^2
温度	1	0.001	3.567	< 0.001	0.650
沉积物	2	0.811	190.925	< 0.001	0.133
营养盐水平	2	0.067	163.532	0.029	0.052
温度 × 沉积物	4	0.004	9.108	0.005	0.112
温度 × 营养盐水平	6	0.026	63.601	0.015	0.017
沉积物 × 营养盐水平	6	0.004	8.582	0.006	0.104
温度 × 沉积物 × 营养盐水平	12	0.003	8.181	0.021	0.044
误差	23	< 0.001			

3 结论

不同环境因子对绿潮硬毛藻分解速率的影响效应存在很大差异, 其中温度对藻体分解速率影响显著, 沉积物次之, 营养盐水平较小。试验前 7 d, 藻体中 P 的释放尤为明显, 而 N 的释放则持续

缓慢。硬毛藻衰亡分解过程中, 藻体 P 的释放率远高于 N。温度、沉积物对藻体 N、P 释放的影响均达显著水平, 温度是影响硬毛藻藻体 N、P 释放的重要因素, 高温(30℃) 能够明显促进死亡藻体中 N、P 的释放。因此, 在高温的夏季, 应及时清理天鹅湖中大量衰亡的硬毛藻藻体, 以免造成水

质恶化 影响湖内其它水生生物的生长。

参考文献:

- [1] ÓLAFSSON E ,AARNIO K ,BONSDORFF E ,et al. Fauna of the green alga *Cladophora glomerata* in the Baltic Sea: density ,diversity and algal decomposition stage [J]. *Marine Biology* 2013 ,160 (9) : 2353-2362.
- [2] GAO L ,ZHANG L H ,HOU J Z ,et al. Decomposition of macroalgal blooms influences phosphorus release from the sediments and implications for coastal restoration in Swan Lake ,Shan dong ,China [J]. *Ecological Engineering* 2013 ,60: 19-28.
- [3] 孙小静 ,秦伯强 ,朱广伟 ,等 . 蓝藻死亡分解过程中胶体态 P、N、有机碳的释放 [J]. *中国环境科学* 2007 ,27 (3) : 341-345.
- [4] 魏 权 ,宋鹏鹏 ,邵雪琳 ,等 . 温度、曝气和沉积物对绿潮硬毛藻分解的影响 [J]. *环境科学学报* 2014 ,34 (9) : 2329-2336.
- [5] PAALME T ,KUKK H ,KOTTA J ,et al. 'In vitro' and 'in situ' decomposition of nuisance macroalgae *Cladophora glomerata* and *Pilayella littoralis* [J]. *Hydrobiologia* 2002 ,475 (1) : 469-476.
- [6] 侯金枝 ,魏 权 ,高 丽 ,等 . 刚毛藻分解对上覆水 P 含量及赋存形态的影响 [J]. *环境科学* 2013 ,34 (6) : 2184-2190.
- [7] 朱梦圆 ,朱广伟 ,王永平 ,等 . 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物 N、P 释放的影响 [J]. *环境科学* 2011 ,32 (2) : 409-415.
- [8] 曹 勋 ,韩睿明 ,章婷曦 ,等 . 冬季水生植物分解过程及其对水质的影响研究 [J]. *农业环境科学学报* ,2015 ,34 (2) : 361-369.
- [9] 叶 春 ,王 博 . 沉水植物黑藻早期分解过程及影响因素研究 [J]. *中国农学通报* 2009 ,25 (17) : 260-264.
- [10] HOORENS B ,AERTS R ,STROETENGA M. Does initial litter chemistry explain litter mixture effects on decomposition [J]. *Oecologia* 2003 ,137: 578-586.
- [11] KOCY M ,WILSON S D. Litter decomposition and nitrogen dynamics in Aspen forest and mixed-grass prairie [J]. *Ecology* , 1997 ,78 (7) : 732-739.
- [12] TYRRELL M C ,THORNER C S ,BURKHARDT J A ,et al. The influence of salt marsh *Furoid algae* (Ecads) on sediment dynamics of northwest Atlantic marshes [J]. *Estuaries and Coasts* 2015 ,38: 1262-1273.
- [13] LASTRA M ,LOPEZ J ,NEVES G. Algal decay ,temperature and body size influencing trophic behaviour of wrack consumers in sandy beaches [J]. *Marine Biology* 162 (1) : 221-233.
- [14] HAMERSLEY M R ,SOHM J A ,BURNS J A ,et al. Nitrogen fixation associated with the decomposition of the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. [J]. *Aquatic Botany* 2015 ,125: 57-63.
- [15] BASTIANONI S ,COPPOLA F ,TIEZZI E ,et al. Biofuel potential production from the Orbetello lagoon macroalgae: A comparison with sunflower feedstock [J]. *Biomass and Bioenergy* 2008 ,32: 619-628.
- [16] 谢 理 ,杨 浩 ,渠晓霞 ,等 . 滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究 [J]. *环境科学* 2013 ,34 (9) : 3458-3466.
- [17] HEROES P J ,BENNER R ,COWIE G L. Tannin diagenesis in mangrove leaves from a tropical estuary: A novel molecular approach [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2001 ,65 (18) : 3109-3122.
- [18] LI K ,GUAN B H ,LIU Z W. Experiments on decomposition rate and release forms of nitrogen and phosphorus from the decomposing cyanobacterial detritus [J]. *Journal of Lake Science* 2011 , 23 (6) : 919-925.