

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

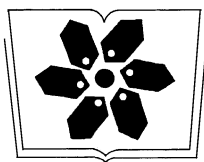
## Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 10 期 Vol.33 No.10 **2013**

中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 10 期 2013 年 5 月 (半月刊)

## 目次

### 福建长汀水土保持专题

- 福建省长汀县水土流失区的时空变化研究——“福建长汀水土保持”专题序言 ..... 徐涵秋 (2945)
- 福建省长汀县河田盆地近 35 年来地表裸土变化的遥感时空分析 ..... 徐涵秋 (2946)
- 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应 ..... 徐涵秋, 何 慧, 黄绍霖 (2954)
- 红壤侵蚀地马尾松林恢复后土壤有机碳库动态 ..... 何圣嘉, 谢锦升, 曾宏达, 等 (2964)
- 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究 ..... 杨冉冉, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2974)
- 南方红壤水土流失区土地利用动态变化——以长汀河田盆地为例 ..... 林 娜, 徐涵秋, 何 慧 (2983)
- 亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算——以长汀河田盆地为例 ..... 黄绍霖, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2992)
- 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变——以福建省长汀县为例 ..... 陈志强, 陈志彪 (3002)

### 前沿理论与学科综述

- 土壤有机质转化及 CO<sub>2</sub> 释放的温度效应研究进展 ..... 沈征涛, 施 斌, 王宝军, 等 (3011)
- 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展 ..... 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等 (3020)

### 个体与基础生态

- 岩溶区不同植被下土壤水溶解无机碳含量及其稳定碳同位素组成特征 ..... 梁 轩, 汪智军, 袁道先, 等 (3031)
- 黄脊雷鳉越冬卵的滞育发育特性 ..... 朱道弘, 陈艳艳, 赵 琴 (3039)
- 香港巨牡蛎与长牡蛎种间配子兼容性 ..... 张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 等 (3047)

### 种群、群落和生态系统

- 西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类群落结构与多样性 ..... 王 斌, 彭波涌, 李晶晶, 等 (3056)
- 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响 ..... 齐 麟, 于大炮, 周旺明, 等 (3065)
- 胶州湾近岸浅水区鱼类群落结构及多样性 ..... 徐宾铎, 曾慧慧, 薛 莹, 等 (3074)
- 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价 ..... 王耀平, 白军红, 肖 蓉, 等 (3083)
- 不同起始状态对草原群落恢复演替的影响 ..... 杨 晨, 王 炜, 汪诗平, 等 (3092)
- 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响 ..... 王长庭, 王根绪, 刘 伟, 等 (3103)
- 高寒退化草地狼毒种群株丛间格局控制机理 ..... 高福元, 赵成章 (3114)
- 藏东南色季拉山西坡土壤有机碳库研究 ..... 马和平, 郭其强, 刘合满, 等 (3122)
- 灵石山不同海拔米槠林优势种叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值与叶属性因子的相关性 ..... 王英姿 (3129)
- 西门岛人工秋茄林恢复对大型底栖生物的影响 ..... 黄 丽, 陈少波, 仇建标, 等 (3138)
- 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应 ..... 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等 (3148)
- 青藏高原高寒草甸植被特征与温度、水分因子关系 ..... 徐满厚, 薛 娴 (3158)

景观、区域和全球生态

近 60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化..... 赵 亮,刘吉平,田学智 (3169)

基于系统动力学的雏菊世界模型气候控制敏感性分析..... 陈海滨,唐海萍 (3177)

资源与产业生态

主要气候因子对麦棉两熟棉花产量的影响..... 韩迎春,王国平,范正义,等 (3185)

低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应..... 姜丽娜,杨文斌,卢 琦,等 (3192)

不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素..... 蓝家程,傅瓦利,彭景涛,等 (3205)

农地保护的外部效益测算——选择实验法在武汉市的应用 ..... 陈 竹,鞠登平,张安录 (3213)

研究简报

温度、投饵频次对白色霞水母无性繁殖与螅状体生长的影响 ..... 孙 明,董 婧,柴 雨,等 (3222)

内蒙古达赉湖西岸地区大鸕巢穴特征和巢址选择..... 张洪海,王 明,陈 磊,等 (3233)

红外相机技术在鼠类密度估算中的应用..... 章书声,鲍毅新,王艳妮,等 (3241)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 304 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 33 \* 2013-05



**封面图说:** 色季拉山的长苞冷杉和高山杜鹃林——色季拉山高海拔处的植被主要有长苞冷杉、林芝云杉和高山杜鹃等,再高海拔地区则分布有高山灌丛、草甸等。长苞冷杉为我国特有种,属松科常绿乔木,分布于西藏东南部高山地带。树高可达 40m,树皮暗褐色,针叶较短;其球果圆柱形,直立。长苞冷杉的形态独特,与分布区内多种冷杉有密切的亲缘关系,和云杉、杜鹃的分布也彼此交叠。随着色季拉山体海拔的升高,区域气候对于山地土壤从黄壤至棕色森林土、直至高山草甸土的完整发育,以及对森林生态系统类型的形成都产生直接而深刻的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201202190217

张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 霍忠明, 姚托, 苏家齐. 香港巨牡蛎与长牡蛎种间配子兼容性. 生态学报, 2013, 33(10): 3047-3055.

Zhang Y H, Wang Z P, Yan X W, Huo Z M, Yao T, Su J Q. Analysis of gamete compatibility between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3047-3055.

## 香港巨牡蛎与长牡蛎种间配子兼容性

张跃环<sup>1,2</sup>, 王昭萍<sup>1,\*</sup>, 闫喜武<sup>3</sup>, 霍忠明<sup>1</sup>, 姚托<sup>1</sup>, 苏家齐<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学水产学院 教育部重点实验室, 青岛 266071;

2. 海洋生物资源可持续利用重点实验室 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

3. 大连海洋大学水产与生命学院 辽宁省贝类良种繁育工程技术研究中心, 大连 116023)

**摘要:**为了评估香港巨牡蛎与长牡蛎的配子兼容性,于2010年7月,以性腺成熟的香港巨牡蛎和长牡蛎为材料,研究了环境因子温度(16、20、24、28、32℃)、盐度(10、15、20、25、30)及内在因子精子浓度( $10^0$ 、 $10^1$ 、 $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$ 个/ $\mu\text{L}$ )、个体差异(240次杂交实验)对其受精率的影响,并计算了以上条件下的 $F_{50}$ 临界值。结果表明:香港巨牡蛎卵子可以与长牡蛎精子受精,但相反方向不能受精,存在着单向受精现象。温度是影响长牡蛎配子兼容性主要因子,盐度是影响香港巨牡蛎的主要因子,而温度、盐度交互作用是影响种间配子兼容性的最主要因子。种间配子温度、盐度的 $F_{50}$ 临界值分别为20.90℃、14.7。精子浓度及单对杂交中的个体差异均显著影响配子兼容性,精子浓度的 $F_{50}$ 临界值为2.40个/ $\mu\text{L}$ ;在240次杂交实验中,有91次受精率不足50%,说明个体差异比例的 $F_{50}$ 临界值37.92%。从其内在因子来看,长牡蛎平均受精率最高(96.83%),配子兼容性较好;对于香港巨牡蛎(70.98%)与种间配子(58.70%)而言,受精水平相对较低,且存在着较大的个体差异。

**关键词:**香港巨牡蛎;长牡蛎;温度;盐度;配子兼容性;生殖隔离

## Analysis of gamete compatibility between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas*

ZHANG Yuehuan<sup>1,2</sup>, WANG Zhaoping<sup>1,\*</sup>, YAN Xiwu<sup>3</sup>, HUO Zhongming<sup>1</sup>, YAO Tuo<sup>1</sup>, SU Jiaqi<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Mariculture Ministry of Education, Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266071, China

2 Key Laboratory of Marine Bio-resources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301 China

3 Engineering Research Center of Shellfish Culture and Breeding in Liaoning Province, Fisheries and Life College, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

**Abstract:** Previous research on gametic incompatibility in marine invertebrates suggests that for highly dispersive marine invertebrate species, barriers to fertilization among the closely related species taxa are often incomplete and sometimes asymmetric. The nature of these barriers can dramatically affect the patterns of gene flow and genetic differentiation between species, and thus speciation. Two cupped oyster species, *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas* are economically and ecologically important species native to the Northern and Southern coasts of China, respectively. *C. hongkongensis* is one of the most important oyster species currently cultured due to its high market value in Southern China. The species is distributed from Fujian to Guangxi Provinces, with populations centered in Guangdong Province. *C. gigas* is the most commonly species of oyster cultured, owing to its worldwide distribution, rapid growth, and dominant position in commercial oyster cultures. In Northern China, they are primarily farmed in Liaoning and Shandong Province. To evaluate the gamete compatibility between *C. hongkongensis* and *C. gigas*, the  $F_{50}$  critical value was ascertained under the different factors,

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31172403);国家重点基础研究发展规划项目(2010CB126406);中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿资助项目(SQ201214)

收稿日期:2012-02-19; 修订日期:2012-09-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zpwang@ouc.edu.cn

which included temperature (16, 20, 24, 28, 32°C), salinity (10, 15, 20, 25, 30), sperm concentration ( $10^0$ ,  $10^1$ ,  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$  ind./ $\mu$ L), and individual variation (240 crosses), in July, 2010 in Dalian, Liaoning Province. Results clearly demonstrated that hybridization between *C. hongkongensis* and *C. gigas* was achievable in one direction due to asymmetric gamete compatibility. *C. hongkongensis* eggs could be fertilized by *C. gigas* sperm, but fertilization did not occur in the other direction. Generally, species-specific sperm-egg recognition was controlled by a key sperm gene, *bindin*, in oysters. Moreover, genic mutation of *bindin* may lead to one direction fertilization and cause pre-zygote isolation of sympatric species. The gamete compatibility of *C. hongkongensis* and *C. gigas* were chiefly affected by the temperature and salinity, respectively ( $P < 0.05$ ). In contrast, the gamete compatibility of interspecific hybrids was mainly affected by the interaction effect ( $P < 0.05$ ). The  $F_{50}$  critical values of temperature, salinity, and sperm concentration were 20.90°C, 14.7, 2.40 ind./ $\mu$ L, respectively. The fertilization rates were less than 50% in 91 of 240 crosses, that is, the  $F_{50}$  critical value for the proportion of individual variation was 37.92%. The average fertilization rates of GG (*C. gigas* ♀ × *C. gigas* ♂), HH (*C. hongkongensis* ♀ × *C. hongkongensis* ♂), and HG (*C. hongkongensis* ♀ × *C. gigas* ♂) were 96.83%, 70.98% and 58.70%, respectively. These results suggest that there be appreciable variation among *C. hongkongensis* female with respect to receptivity to *C. gigas* sperm. Variation in receptivity may stem from an ancestral polymorphism in “receptivity factors” that has been retained in *C. hongkongensis* since *C. hongkongensis* and *C. gigas*. In conclusion, successful stimulation of post-mating isolation was highly possible through one-way fertilization due to the sexually asynchronous coevolution between the two oyster species. The gamete compatibility was affected by the environmental factors and intrinsic factors, and individual divergence in gamete interaction may be a crucial step in elucidating the fertilization barriers between the two species.

**Key Words:** *Crassostrea hongkongensis*; *C. gigas*; temperature; salinity; gametic compatibility; reproductive isolation

配子兼容是指物种间或者物种内的雌雄个体之间精卵能够识别,完成受精作用,从而繁育子代。对于同一物种而言,绝大部分情况下雌雄配子都具有很好的兼容性;但对于种间杂交来讲,会出现配子不兼容或者不对称兼容现象<sup>[1]</sup>。这种配子不兼容往往会导致种间产生生殖隔离。生殖隔离是指由于各方面的原因,使亲缘关系接近的物种之间在自然条件下不交配,即使能交配也不能产生后代或不能产生可育性后代的隔离机制。生殖隔离如果发生在受精以前,就称为受精前隔离,包括地理隔离、生态隔离、季节隔离、生理隔离、形态隔离和行为隔离等;若隔离发生在受精以后,就称为受精后的生殖隔离,包括杂种不活、杂种不育和杂种衰败等<sup>[2]</sup>。在自然界中,种间配子不兼容是保证物种单一性的一种有效手段。

对于海洋无脊椎动物而言,生活在重叠区域内的近缘种的生殖隔离大部分是由于种间配子不兼容引发的<sup>[3]</sup>。学者们先后从受精水平上研究了长牡蛎 *Crassostrea gigas* × 熊本牡蛎 *C. sikamea*<sup>[4]</sup>、长牡蛎 *C. gigas* × 美洲牡蛎 *C. virginica*<sup>[5]</sup>、紫贻贝 *Mytilus edulis* × 盖勒贻贝 *M. trossulus*<sup>[1]</sup>、3种热带海胆 *Echinometra lucunter* × *E. viridis* × *E. lucunter*<sup>[6]</sup>的种间配子不兼容格局,从而进一步解释生殖隔离机制。香港巨牡蛎 (*Crassostrea hongkongensis*) 是暖温性近岸生长的一个经济价值极高的种类,喜好高温低盐环境,是我国南方养殖的主要经济种,分布长江以南,核心区为福建、广东、广西,年产量在 100 多万吨<sup>[7]</sup>。而长牡蛎 (*C. gigas*) 分布在我国长江以北,喜好低温高盐环境,为世界性养殖品种,主要集中在我国辽宁、山东等地,年产量近 100 万吨。由于生长速度快、环境适应性强、肉味鲜美,深受广大消费者青睐<sup>[8]</sup>。作为我国最重要的两种牡蛎经济种,从分布范围上,他们之间无生活重叠区;从其生活环境上看,它们生态类型截然相反;从其遗传进化角度上,这两个种类在巨蛎属牡蛎中遗传距离较远,而且种间分化较早,大约在 2880 万年前发生了种间分歧,并成功进化为两个物种<sup>[9]</sup>。为了探讨这两个物种间的配子兼容性问题,本文从外界因子(温度、盐度)及内在因子(精子浓度、个体差异水平)水平上检测了它们对其配子兼容性的影响,并且求算了  $F_{50}$  临界值,旨在为这两个物种的种间杂交及其遗传进化奠定了理论与实践基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

于2010年5月下旬,采集2龄香港巨牡蛎 *Crassostrea hongkongensis* (广东深圳)和1龄长牡蛎 *C. gigas* (辽宁大连)样本,置于大连庄河海量水产食品有限公司生态虾池进行生态促熟。由于2龄香港巨牡蛎及1龄长牡蛎具有较好的繁殖能力,故本实验选用该年龄段亲本作为实验样品。促熟期间,水温22.5—29.3℃,盐度24—30,pH值7.86—8.92;生态虾池中富含大量的有机碎屑及单胞藻类,可以满足亲本对天然饵料的需求,故亲本性腺可以正常发育。至7月初,两种牡蛎的性腺已经完全成熟。

### 1.2 实验设计

为了查明最主要外界环境因子温度、盐度对两种牡蛎种间配子不兼容格局影响。考虑到香港巨牡蛎繁殖季节水温一般不高于30℃,盐度大多不低于12<sup>[7]</sup>;而长牡蛎繁殖季节水温基本均在20℃以上,盐度不超过30<sup>[8]</sup>。本文分别设计5个温度(16、20、24、28、32℃)梯度及5个盐度梯度(10、15、20、25、30),每个梯度重复实验36次,每次均为单对杂交实验(表1)。采用解剖方法获取牡蛎精卵,选取配子优良的个体用于实验。实验在100 mL烧杯中进行,卵子密度控制在40—50个/mL,精子浓度控制在120 000—150 000个/mL。温度实验中,利用恒温箱来控制温度,盐度控制在25;盐度实验中,利用自然海水(盐度30)作为母液,加经过24 h曝气的淡水来配置其它盐度梯度,温度控制在32℃。

海洋无脊椎动物的配子兼容性分析中,精子浓度至关重要,因为它是配子兼容性中的内在因素。通常情况下,较低的浓度会导致种间配子兼容性较差,过高的浓度虽然会得到较高受精率,但经常会造成孵化中畸形率过高。参照Banks<sup>[4]</sup>,Lyu和Allen<sup>[5]</sup>对牡蛎配子不兼容格局分析,本实验设计了10<sup>0</sup>、10<sup>1</sup>、10<sup>2</sup>、10<sup>3</sup>、10<sup>4</sup>个/ $\mu$ L 5个精子浓度梯度,其中,精子通过血球计数板来测定密度,实验中卵子密度控制在40—50个/mL。在温度32℃、盐度25的条件下,采用100 mL烧杯作为实验容器,开展36次单对杂交实验(表1)。为了进一步探讨牡蛎个体间差异对配子兼容性的影响,在温度32℃、盐度25、精子浓度10<sup>4</sup>个/ $\mu$ L的条件下,采用建立单对杂交家系(表1)的方法测定个体间差异。其中,受精成功的标志为受精膜举起,释放出两个极体,之后进入2—4细胞卵裂状态;受精率为发生卵裂受精卵数量与总卵量的百分率。

表1 单对杂交家系设计  
Table 1 The design of diallel cross by one female to one male method

| ♀               | ♂               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                 | G <sub>1</sub>  | H <sub>1</sub>  | G <sub>2</sub>  | H <sub>2</sub>  | G <sub>3</sub>  | H <sub>3</sub>  | G <sub>n</sub>  | H <sub>n</sub>  |
| GD <sub>1</sub> | GG <sub>1</sub> | GH <sub>1</sub> |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| H <sub>1</sub>  | HG <sub>1</sub> | HH <sub>1</sub> |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| G <sub>2</sub>  |                 |                 | GG <sub>2</sub> | GH <sub>2</sub> |                 |                 |                 |                 |
| H <sub>2</sub>  |                 |                 | HG <sub>2</sub> | HH <sub>2</sub> |                 |                 |                 |                 |
| G <sub>3</sub>  |                 |                 |                 |                 | GG <sub>3</sub> | GH <sub>3</sub> |                 |                 |
| H <sub>3</sub>  |                 |                 |                 |                 | HG <sub>3</sub> | HH <sub>3</sub> |                 |                 |
| G <sub>n</sub>  |                 |                 |                 |                 |                 |                 | GG <sub>n</sub> | GH <sub>n</sub> |
| H <sub>n</sub>  |                 |                 |                 |                 |                 |                 | HG <sub>n</sub> | HH <sub>n</sub> |

G 表长牡蛎、H 表示香港巨牡蛎;对于温度、盐度、精子浓度实验而言,n=36;对于个体间差异对配子兼容性影响而言,n=240

### 1.3 F<sub>50</sub> 临界值计算

为了探讨温度、盐度、精子浓度及个体差异与配子兼容性之间的关系。参照贻贝<sup>[1]</sup>及海胆<sup>[6,10]</sup>配子不兼容分析方法,制定了牡蛎种间配子 F<sub>50</sub> 临界值,是指雌雄配子发生50%受精率时的临界温度、盐度、精子浓度及其单对杂交的中个体差异比例。以往学者采用了一种比较繁琐的非线性动态模型来计算配子兼容性,该模型对于海胆比较实用,但是对于贻贝等贝类不太合适。因此,本实验尚未采用以上作者方法,而是参照菲律宾蛤仔<sup>[11]</sup>及青蛤<sup>[12]</sup>幼虫饥饿中的不可逆点求算方法,采用如下二次函数公式来计算 F<sub>50</sub> 临界值:

$$y = ax^2 + bx + c$$

式中,  $y$  表示受精率(%),  $x$  表示温度( $^{\circ}\text{C}$ )、盐度、精子浓度的对数( $\log[\text{个}/\mu\text{L}]$ )、个体间杂交次数,  $a$  为二次项系数,  $b$  为一次项系数,  $c$  为常数。

#### 1.4 数据处理

为了保持方差齐性,所有受精率均转化为反正弦函数  $\text{Asin}$ , 精子浓度转化为  $\log_{10}$ 。利用 SPSS18.0 统计软件对数据进行分析处理,不同实验组间数据比较采用单因素方差分析方法(Turkey HSD),差异显著性设置为  $P < 0.05$ ,极显著设置为  $P < 0.01$ ,Excel 作图。

## 2 结果

### 2.1 温度对配子兼容性的影响

如图 1 所示,对长牡蛎 GG 而言,受精率随着温度的升高先增大而后趋于平稳;至于香港巨牡蛎 HH 及其杂交组 HG,二者受精率均随着温度的升高而增大;杂交组 GH 受精率为 0,也就说在香港巨牡蛎与长牡蛎的杂交过程中,存在着明显的单向受精现象。在  $16^{\circ}\text{C}$  时,杂交组 HG 受精率(8.28%)高于香港巨牡蛎(1.72%),且都显著小于长牡蛎(28.28%) ( $P < 0.05$ ) (表 2)。这主要是由于长牡蛎的精子在较低的温度下具有一定活力,而香港巨牡蛎精子活力较差造成的。 $20^{\circ}\text{C}$  时,每个实验组的受精率均得到了明显提高。GG 的受精率高达 92.45%,显著高于 HH(48.78%) 与 HG(38.83%) ( $P < 0.05$ ) (表 2)。 $24\text{--}32^{\circ}\text{C}$  期间,GG 受精率最高接近 100%,HH 与 HG 的受精率具有显著提高,且 HH 的受精率一直高于 HG(图 1)。 $32^{\circ}\text{C}$  时,各实验组受精率均达到最高水平,其中,GG 受精率为 99.38%,HH 为 94.58%,HG 为 86.59% (图 1)。经过二次函数模型推算, HG 的温度  $F_{50}$  临界值介于两亲本 GG 及 HH 之间, GG, HG 及 HH 的  $F_{50}$  临界值分别为  $17.12^{\circ}\text{C}$ ,  $20.29^{\circ}\text{C}$ ,  $21.45^{\circ}\text{C}$  (表 3)。

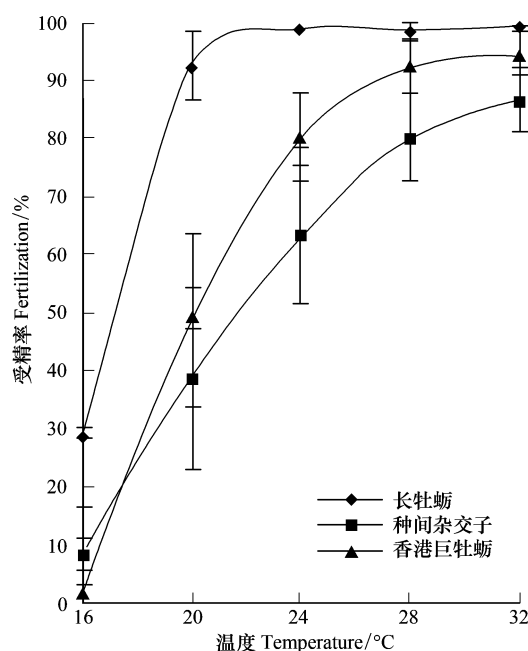


图 1 温度对配子兼容性的影响

Fig. 1 Effect of temperature on gamete compatibility

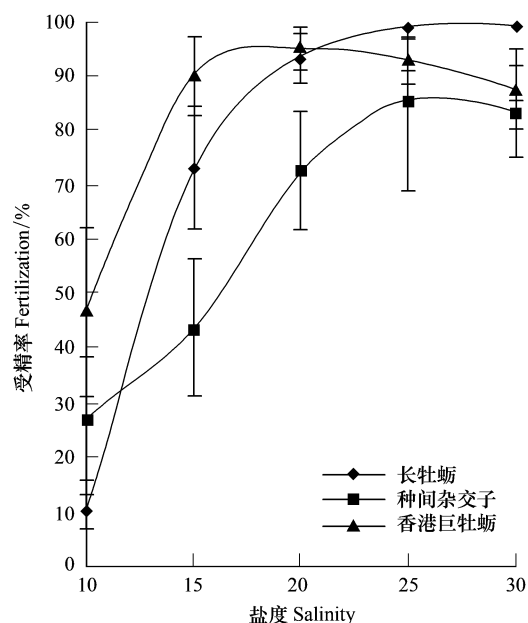


图 2 盐度对配子兼容性的影响

Fig. 2 Effect of salinity on gamete compatibility

### 2.2 盐度对配子兼容性的影响

GG 受精率随着盐度的升高而增大, HH 及 HG 的受精随着盐度升高先增大后减; HH 最高受精率出现在盐度 18 左右, 而 HG 最高受精率出现在盐度 25 (图 2), GH 尚未发生受精, 受精率为 0。在盐度 10 时, HH 受精率最大为 46.84%, HG 居中为 27.30%, GG 最小为 10.27%, 且三者之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) (表 4)。

在盐度 15 时,HH 受精率仍然最高,但此时 GG 受精率大于 HG,且三者之间差异显著( $P<0.05$ )(表 4)。盐度 20 时,GG 与 HH 受精率大小相似,均显著大于 HG( $P<0.05$ )(表 4)。盐度 25–30 期间,GG 受精率最高,显著大于 HH 和 HG( $P<0.05$ )(表 4)。经过二次函数模型推算,HG 的盐度  $F_{50}$  临界值为 14.70,大于 GG 的 13.12。在图 2 中,虽然可以看到 HH 的  $F_{50}$  临界值在盐度 10.20 左右,但是经过二次函数模拟,得不到该临界值,因为模型中的  $y$  轴截距已经大于 50%(表 3)。

表 2 温度对配子兼容性影响的方差分析

Table 2 Analysis of variance for the effect of temperature on gamete compatibility

| 温度 Temperature | df | MS    | P        | 多重比较 Multiple Comparison                           |
|----------------|----|-------|----------|----------------------------------------------------|
| 16             | 2  | 0.191 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HG <sup>b</sup> >HH <sup>b</sup>  |
| 20             | 2  | 0.813 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>b</sup>  |
| 24             | 2  | 0.316 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>c</sup>  |
| 28             | 2  | 0.087 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>bc</sup> >HG <sup>c</sup> |
| 32             | 2  | 0.042 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>bc</sup> >HG <sup>c</sup> |

\* 表示差异显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示差异极显著( $P<0.01$ );GG 表示长牡蛎,HG 表示种间杂交子,HH 表示香港巨牡蛎,MS 表示均方; a, b, c 不同字母间表示差异显著

表 3 不同温度、盐度、精子浓度及个体差异下的  $F_{50}$  临界值Table 3 The critical value of  $F_{50}$  under different temperature, salinity, sperm concentration and individual variation

| 来源 Source |    | $N$ | $F_{50}$                 | 公式 Formula                          | $x$   | $R^2$  |
|-----------|----|-----|--------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| $T$       | GG | 36  | 17.12                    | $y = -0.5958x^2 + 32.307x - 329.59$ | 16—32 | 0.9029 |
|           | HG | 36  | 20.09                    | $y = -0.4842x^2 + 28.971x - 337.43$ | 16—32 | 0.9990 |
|           | HH | 36  | 21.45                    | $y = -0.2501x^2 + 16.954x - 199.38$ | 16—32 | 0.9995 |
| $S$       | GG | 36  | 13.12                    | $y = -0.3987x^2 + 20.015x - 146.06$ | 10—30 | 0.9750 |
|           | HG | 36  | 14.70                    | $y = -0.1511x^2 + 9.1185x - 51.928$ | 10—30 | 0.9673 |
|           | HH | 36  | ND                       | $y = -0.2974x^2 + 13.577x - 55284$  | 10—30 | 0.9166 |
| $Sc$      | GG | 36  | ND                       | $y = -0.1458x^2 + 1.4557x + 95.923$ | 0—4   | 0.9967 |
|           | HG | 36  | 0.38 (2.40) <sup>A</sup> | $y = -2.0982x^2 + 13.864x + 68.492$ | 0—4   | 0.9883 |
|           | HH | 36  | ND                       | $y = -4.6325x^2 + 29.375x + 40.271$ | 0—4   | 0.9695 |
| $Iv$      | GG | 240 | ND                       | $y = -0.0003x^2 + 0.1192x + 88.357$ | 0—240 | 0.8675 |
|           | HG | 240 | 91 (37.92) <sup>B</sup>  | $y = -0.0007x^2 + 0.4199x + 33.355$ | 0—240 | 0.9604 |
|           | HH | 240 | 43 (17.92) <sup>B</sup>  | $y = -0.0009x^2 + 0.6208x + 2.0421$ | 0—240 | 0.9956 |

T 表示温度,S 表示盐度,Sc 表示精子浓度,Iv 表示个体差异; A 第一个数字表示数量级,而括号里面表示精子浓度(个/ $\mu$ L); B 第一个数字表示杂交次数,而括号里面表示个体差异比例(%); ND 表示没有相应数据

表 4 盐度对配子兼容性影响的方差分析

Table 4 Analysis of variance for the effect of salinity on gamete compatibility

| 盐度 Salinity | df | M. S. | P        | 多重比较 Multiple Comparison                          |
|-------------|----|-------|----------|---------------------------------------------------|
| 10          | 2  | 0.388 | 0.000 ** | HH <sup>a</sup> >HG <sup>b</sup> >GG <sup>c</sup> |
| 15          | 2  | 1.192 | 0.000 ** | HH <sup>a</sup> >GG <sup>b</sup> >HG <sup>c</sup> |
| 20          | 2  | 0.626 | 0.000 ** | HH <sup>a</sup> >GG <sup>a</sup> >HG <sup>b</sup> |
| 25          | 2  | 0.372 | 0.001 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>b</sup> |
| 30          | 2  | 0.571 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>b</sup> |

表 5 为温度、盐度两种外界环境因子对配子兼容性的交互作用。对于 GG 来讲,温度是影响其配子兼容性的主要因子,次要因子为盐度。对于 HH 而言,盐度是影响其配子兼容性的主要因子,其次为温度。至于

HG, 温度及盐度的交互作用是影响配子兼容性的主要因子, 其次为温度, 最后是盐度。

表 5 温度及盐度交互作用对配子兼容性的影响

| Table 5 Analyses of variance showing the interaction effect between temperature and salinity for gamete compatibility |     |    |       |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----|-------|----------|
| 来源 Source                                                                                                             |     | df | M. S. | P        |
| GG                                                                                                                    | T   | 4  | 0.769 | 0.000 ** |
|                                                                                                                       | S   | 4  | 2.622 | 0.000 ** |
|                                                                                                                       | T×S | 1  | 0.817 | 0.036 *  |
| HG                                                                                                                    | T   | 4  | 0.829 | 0.000 ** |
|                                                                                                                       | S   | 4  | 0.978 | 0.000 ** |
|                                                                                                                       | T×S | 1  | 0.764 | 0.010 *  |
| HH                                                                                                                    | T   | 4  | 1.219 | 0.000 ** |
|                                                                                                                       | S   | 4  | 0.795 | 0.000 ** |
|                                                                                                                       | T×S | 1  | 4.197 | 0.000 ** |

T×S 表示温度与盐度的交互作用

### 2.3 S 精子浓度对配子兼容性的影响

GG 受精率几乎不受精子浓度的影响, 其受精率在不同精子浓度下均接近 100%; HH 和 HG 受精率随着精子浓度增加先快速增加后缓慢增长 (图 3), GH 受精率为 0。在精子  $10^0$  个/ $\mu\text{L}$  浓度时, GG 受精率为 97.32%, HH 为 67.74%, 而 HG 仅为 37.98%, 且彼此间差异显著 ( $P<0.05$ ) (图 3) (表 6)。由此可以看出在较低精子浓度下, 配子兼容性存在着较大的种内及其种间差异。在精子浓度  $10^1$ — $10^4$  个/ $\mu\text{L}$  过渡过程中, HH 及 HG 受精率随着精子浓度缓慢增长, 均显著小于 GG 受精水平 ( $P<0.05$ ) (图 3) (表 6)。在精子浓度  $10^4$  个/ $\mu\text{L}$  时, GG、HH 及 HG 受精率分别为 99.47%、90.91%、85.52% (图 3)。经过二次函数模型推算, HG 的精子浓度  $F_{50}$  临界值为 2.40 个/ $\mu\text{L}$ 。由于 GG 及 HH 受精率均在 50% 以上, 故二者不存在  $F_{50}$  临界值 (表 3)。

表 6 精子浓度对配子兼容性影响的方差分析

| Table 6 Analysis of variance for the effect of sperm concentration on gamete compatibility |    |       |          |                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------|----------|---------------------------------------------------|
| 精子浓度/(个/ $\mu\text{L}$ )<br>Sperm concentration                                            | df | M. S. | P        | 多重比较<br>Multiple Comparison                       |
| $10^0$                                                                                     | 2  | 2.085 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>c</sup> |
| $10^1$                                                                                     | 2  | 0.831 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>c</sup> |
| $10^2$                                                                                     | 2  | 0.585 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>c</sup> |
| $10^3$                                                                                     | 2  | 0.546 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>c</sup> |
| $10^4$                                                                                     | 2  | 0.565 | 0.000 ** | GG <sup>a</sup> >HH <sup>b</sup> >HG <sup>c</sup> |

### 2.4 个体间配子兼容性差异分析

如图 4 所示, 按照上面最佳的优化条件, 在 240 次杂交实验中, GG 受精水平最高, 平均为 96.83%; 其次为 HH, 平均水平为 70.98%; 受精率最低的是 HG, 为 58.70%, GH 受精率仍为 0。从 HG 受精水平上看, 实际超过  $F_{50}$  临界值的杂交实验次数为 164 次, 但如果按照模拟曲线看为 149 次, 二者较为接近, 大约有 2/3 的比例可以突破种间配子兼容性  $F_{50}$  临界值 (表 3)。至于 HH, 实际上一共有 216 次超过了  $F_{50}$  临界值, 但理论上只有 197 次, 二者仍比较接近, 说明动态函数曲线具有较好的拟合性 (表 3)。为了进一步查明个体间差异对其配子兼容性的影响, 作者按照受精水平不同划分了 10 个受精级别, 并计算了各级别受精水平的分布频率。其中, HG 在级别 1—10 均有分布, 受精率从 3.60% 至 97.60% 分布范围最广, 说明种间配子识别存在非常大的个体差异; 但平均水平最低, 说明种间配子存在一定程度的生殖隔离障碍 (图 4) (表 7)。HH 分布在 2—10 级别受精水平上, 受精率从 12.0% 至 98.5%, 说明香港巨牡蛎本身就存在较大的个体差异 (图 4) (表 7)。而 GG 受精水平仅仅分布在 9—10 级别上, 三者中受精水平最高, 且受精率相对比较一致, 也说明长牡蛎种内配子兼容性较好 (图 4) (表 7)。

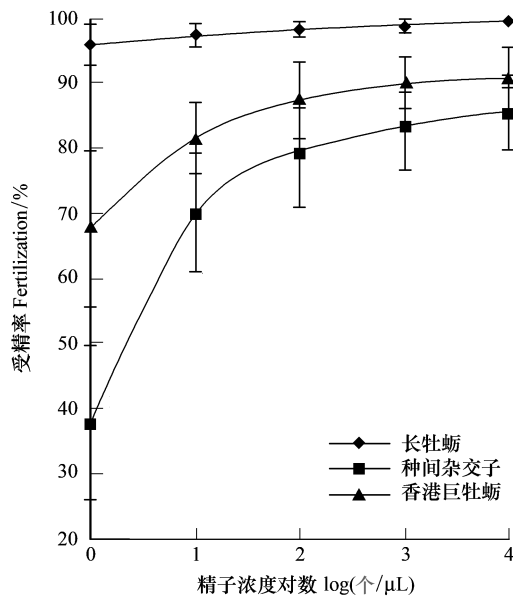


图 3 精子浓度对配子兼容性的影响  
Fig. 3 Effect of sperm concentration on gamete compatibility

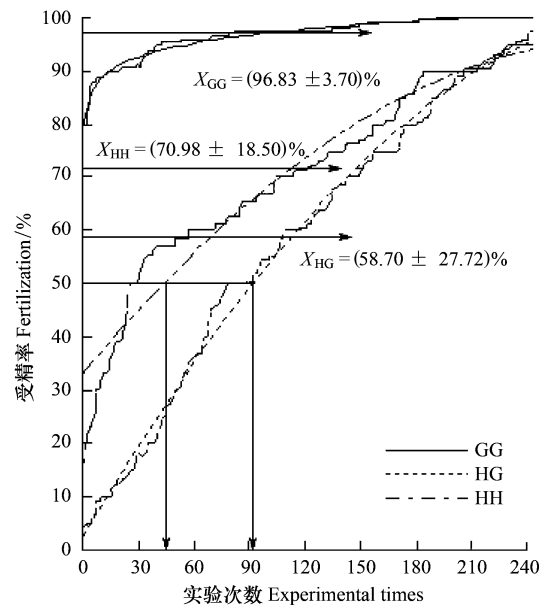


图 4 配子兼容性的个体差异比较  
Fig. 4 Comparison of individual variation on gamete compatibility

表 7 不同受精水平级别下各实验组分布频率

Table 7 Distribution frequency of each experimental group under different sperm concentrations this should be given in the form of table

| 受精水平<br>Sperm concentration | 分布频率 Distribution frequency/% |            |            |
|-----------------------------|-------------------------------|------------|------------|
|                             | GG                            | HG         | HH         |
| 1                           | 0                             | 10 (4.17)  | 0          |
| 2                           | 0                             | 23 (9.58)  | 2 (0.83)   |
| 3                           | 0                             | 14 (5.83)  | 5 (2.08)   |
| 4                           | 0                             | 16 (6.67)  | 12 (5.00)  |
| 5                           | 0                             | 12 (5.00)  | 5 (2.08)   |
| 6                           | 0                             | 30 (12.50) | 31 (12.92) |
| 7                           | 0                             | 33 (13.75) | 45 (18.75) |
| 8                           | 0                             | 30 (12.50) | 51 (21.25) |
| 9                           | 12 (5.00)                     | 31 (12.92) | 27 (11.25) |
| 10                          | 228(95.00)                    | 41 (17.08) | 62 (25.83) |

受精水平被划分为 10 个级别,其中,1:受精率  $F < 10\%$  ,2:  $10\% \leq F < 20\%$  ,……,10:  $90\% \leq F \leq 100\%$  ;括号外的数据表示相应结果杂交次数,括号内表示分布百分率

### 3 讨论

#### 3.1 单向受精

香港巨牡蛎的卵子可以与长牡蛎的精子受精,而长牡蛎的卵子不能够与香港巨牡蛎的精子受精,也就是说,在香港巨牡蛎与长牡蛎杂交中,存在着明显的不对称受精现象。这种单向受精不受温度、盐度等外界环境因子和内在的精子浓度及个体差异影响,已有研究表明:在精卵识别的过程中,精子结合素蛋白是决定能否受精的一个关键基因家族,这种基因家族进化速度较快,往往导致了不对称受精现象的发生<sup>[13-14]</sup>。这种单向受精机制引发了不对称的受精前生殖隔离机制,使得种间配子兼容性效应减半。在以往的牡蛎配子兼容性分析中,单向受精比较常见,学者们先后发现了熊本牡蛎 *C. sikamea* (♀)×长牡蛎 *C. gigas* (♂)<sup>[15]</sup>、近江牡蛎 *C. rivularis* (♀)×美洲牡蛎 *C. virginica* (♂)<sup>[16]</sup> ,熊本牡蛎 *C. sikamea* (♀)×近江牡蛎 *C. ariakensis* (♂)<sup>[17]</sup> 具有单向受精现象。香港巨牡蛎卵子可以与长牡蛎精子受精说明,雌性香港巨牡蛎与雄性长牡蛎遗传分化具有

一定的相似性;而香港巨牡蛎精子不能与长牡蛎卵子受精说明,香港巨牡蛎雄性与长牡蛎雌性之间存在着一度程度的遗传歧化,这可能是性别非趋同进化的结果<sup>[17]</sup>。

### 3.2 外界因子

外界环境因子温度、盐度对香港巨牡蛎与长牡蛎配子兼容性有较大影响。这主要是由于香港巨牡蛎与长牡蛎的生态类型截然相反,一种是喜好高温低盐,另一种是喜好低温高盐<sup>[7]</sup>。从实验结果中可以看出,温度是影响长牡蛎配子兼容性的最主要因子,而盐度是影响香港巨牡蛎的主要因子,种间配子兼容性主要受到温度、盐度二者交互作用影响。以往学者们的研究对象均是针对分布在相同生活重叠区的近缘种,故他们一般不做温度、盐度这样的外在因子影响分析,而是完全模拟生活区的环境来完成实验,由于本实验对象生活生态型不同,故有必要对其进行探讨、摸索,以便获取更好的种间配子兼容性,有利于以后的种间杂交研究<sup>[1, 4, 6, 10]</sup>。温度的  $F_{50}$  临界值从长牡蛎、杂交子、香港巨牡蛎逐渐升高,说明长牡蛎耐低温能力要强一些,香港巨牡蛎需更要高温环境,杂交子恰恰居于二者中间;盐度的  $F_{50}$  临界值长牡蛎最低,说明长牡蛎对盐度具有一定的耐受能力;杂交子较大,表明杂交时应该注意盐度控制,以获取更好的配子兼容性。

### 3.3 内在因子

通常情况下,精子浓度对配子兼容性有一定影响。学者们发现,在远缘杂交中,提高精子浓度有利于提高种间受精率<sup>[17-20]</sup>。实验结果表明,随着精子浓度的增加,不管是种内还是种间受精率均得到了提高,但是种间杂交组受精率一直低于种内组,说明存在一定程度的种间配子不兼容。其中,在实验设计的精子浓度中,种间配子精子浓度的  $F_{50}$  临界值为 2.40 个/ $\mu\text{L}$ ,而种内自交组不存在  $F_{50}$  临界值,说明在较低精子浓度情况下,种间配子不兼容性更强一些。随着精子浓度的增大,种间杂交组受精率一直低于香港巨牡蛎自交组,但是他们之间受精相对比较接近,说明种间配子兼容性具有明显的母本效应。

个体差异也是影响配子兼容性的一个重要因素<sup>[1-2, 4, 6]</sup>。从实验结果中可以看到,种间配子兼容性存在着较大的个体差异,其受精率分布范围最广,从 3.60% 至 97.60%。在 240 次单对单双列杂交实验中,有 37.92% 比例受精率不足 50%,62.08% 比例受精率超过 50%,说明种间配子虽然存在着不兼容,但是不兼容性不强,可以经过筛选优良亲本,获取较高的受精率。从其平均受精水平上看,长牡蛎受精率很高,且比较一致,说明其个体间差异较小;香港巨牡蛎受精率高于杂交子,但是分布范围较广,说明香港巨牡蛎存在着明显的个体差异。

总之,本文发现温度、盐度、精子浓度及个体差异对配子兼容性均具有明显的影响,其  $F_{50}$  临界值随着条件不同而变化;而且香港巨牡蛎与长牡蛎之间存在单向受精现象,这可能是由于种间性别非趋同进化造成的;香港巨牡蛎与长牡蛎存在着不对称的受精前生殖隔离,至于受精后隔离机制有待深入研究。

### References:

- [1] Rawson P D, Slaughter C, Yund P O. Patterns of gamete incompatibility between the blue mussels *Mytilus edulis* and *M. trossulus*. *Marine Biology*, 2003, 143(2): 317-325.
- [2] Palumbi S R. Genetic divergence, reproductive isolation, and marine speciation. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1994, 25: 547-572.
- [3] Palumbi S R. Marine speciation on a small planet. *Trends in Ecology and Evolution*, 1992, 7(4): 114-118.
- [4] Banks M A, McGoldrick D J, Borgeson W, Hedgecock D. Gametic incompatibility and genetic divergence of Pacific and Kumamoto oysters, *Crassostrea gigas* and *C. sikamea*. *Marine Biology*, 1994, 121(1): 127-135.
- [5] Lyu S, Allen S K. Effect of sperm density on hybridization between *Crassostrea virginica*, Gmelin and *C. gigas* (Thunberg). *Journal of Shellfish Research*, 1999, 18(2): 459-464.
- [6] McCartney M A, Lessios H A. Quantitative analysis of gametic incompatibility between closely related species of neotropical sea urchins. *The Biological Bulletin*, 2002, 202(2): 166-181.
- [7] Xiao S. Studies on Quantitative Genetics and Selective Breeding of the Hongkong Oyster *Crassostrea Hongkongensis* [D]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010: 28-29.
- [8] Zhang Y H, Wang Z P, Yan X W, Yu Z F, Huo Z M, Yao T, Liu X H, Yu R H. Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crassostrea*

- hongkongensis* and *C. gigas*. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1105-1114.
- [ 9 ] Ren J F, Liu X, Jiang F, Guo X M, Liu B. Unusual conservation of mitochondrial gene order in *Crassostrea oysters*: evidence for recent speciation in Asia. *BMC Evolutionary Biology*, 2010, 10(1): 394.
- [ 10 ] Geyer L B, Palumbi S R. Conspecific sperm precedence in two species of tropical sea urchins. *Evolution*, 2005, 59(1): 97-105.
- [ 11 ] Yan X W, Zhang Y H, Huo Z M, Yang F, Zhang G F. Effects of starvation on larval growth, survival, and metamorphosis of Manila clam *Ruditapes philippinarum*. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 327-334.
- [ 12 ] Yang F, Zhang Y H, Yan X W, Zhang G F. Effects of starvation and refeeding on larval growth, survival, and metamorphosis of clam *Cyclina sinensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2052-2059.
- [ 13 ] Springer S A, Moy G W, Friend D S, Swanson W J, Vacquier V D. Oyster sperm bindin is a combinatorial fucose lection with remarkable intra-species diversity. *International Journal of Developmental Biology*, 2008, 52(5/6): 759-768.
- [ 14 ] Wu Q, Li L, Zhang G F. *Crassostrea angulata* bindin gene and the divergence of fucose-binding lectin repeats among three species of *Crassostrea*. *Marine Biotechnology*, 2011, 13(2): 327-335.
- [ 15 ] Camara M D, Davis J P, Sekino M, Hedgecock D, Li G, Langdon C J, Evans S. The Kumamoto oyster *Crassostrea sikamea* is neither rare nor threatened by hybridization in the Northern Ariake sea, Japan. *Journal of Shellfish Research*, 2008, 27(2): 313-322.
- [ 16 ] Allen S K, Gaffney P M, Scarpa J, Bushek D. Inviabile hybrids of *Crassostrea virginica* (Gmelin) with *C. rivularis* (Gould) and *C. gigas* (Thunberg). *Aquaculture*, 1993, 113(4): 269-289.
- [ 17 ] Xu F, Zhang G F, Liu X, Zhang S D, Shi B, Guo X M. Laboratory hybridization between *Crassostrea ariakensis* and *C. sikamea*. *Journal of Shellfish Research*, 2009, 28(3): 453-458.
- [ 18 ] Ke C H, Tian Y, Li S Q, Li F X. Preliminary studies on hybridization of three species of abalone. *Marine Sciences*, 2000, 24(11): 39-41.
- [ 19 ] Zheng H P, Xu F, Zhang G F. Crosses between two subspecies of bay scallop *Argopecten irradians* and heterosis for yield traits at harvest. *Aquaculture Research*, 2011, 42(4): 602-612.
- [ 20 ] Zhang G F, Zheng H P. *Aquaculture Genetics in bay Scallop*. Beijing: Science Press, 2009: 92.

#### 参考文献:

- [ 7 ] 肖述. 香港巨牡蛎 (*Crassostrea hongkongensis*) 数量遗传学与选择育种研究 [D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2010: 28-29.
- [ 8 ] 张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 虞志飞, 霍忠明, 姚托, 刘晓赫, 于瑞海. 香港巨牡蛎与长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状. *生态学报*, 2012, 32(4): 1105-1114.
- [ 12 ] 杨凤, 张跃环, 闫喜武, 张国范. 饥饿和再投喂对青蛤 (*Cyclina sinensis*) 幼虫生长、存活及变态的影响. *生态学报*, 2008, 28(5): 2052-2059.
- [ 18 ] 柯才焕, 田越, 周时强, 李复雪. 杂色鲍与皱纹盘鲍、盘鲍杂交的初步研究. *海洋科学*, 2000, 24(11): 39-41.
- [ 20 ] 张国范, 郑怀平. *海湾扇贝养殖遗传学*. 北京: 科学出版社, 2009: 92-92.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 10 May, 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Special Topics in Soil and Water Conservation of County Changting, Fujian Province

- Spatiotemporal dynamics of the bare soil cover in the Hetian basinal area of County Changting, China, during the past 35 years ..... XU Hanqiu (2946)
- Analysis of fractional vegetation cover change and its impact on thermal environment in the Hetian basinal area of County Changting, Fujian Province, China ..... XU Hanqiu, HE Hui, HUANG Shaolin (2954)
- Dynamic of soil organic carbon pool after restoration of *Pinus massoniana* in eroded red soil area ..... HE Shengjia, XIE Jinsheng, ZENG Hongda, et al (2964)
- RUSLE-based quantitative study on the soil erosion of the Hetian basin area in County Changting, Fujian Province, China ..... YANG Ranran, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2974)
- Land use changes in a reddish soil erosion region of Southern China: Hetian Basin, County Changting ..... LIN Na, XU Hanqiu, HE Hui (2983)
- Remote-sensing estimate of the carbon storage of subtropical *Pinus massoniana* forest in the Hetian Basin of County Changting, China ..... HUANG Shaolin, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2992)
- Mutation of soil fertility quality in the red eroded area of southern China: A case study in Changting County, Fujian Province ..... CHEN Zhiqiang, CHEN Zhibiao (3002)

### Frontiers and Comprehensive Review

- The temperature dependence of soil organic matter decomposition and CO<sub>2</sub> efflux: a review ..... SHEN Zhengtao, SHI Bin, WANG Baojun, et al (3011)
- Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes ..... MA Jianrong, DENG Jianming, QIN Boqiang, et al (3020)

### Autecology & Fundamentals

- Characteristics of concentrations and carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon in soil water under varying vegetations in karst watershed ..... LIANG Xuan, WANG Zhijun, YUAN Daoxian, et al (3031)
- The traits of diapause development of overwinter eggs in *Rameacris kiangsu* Tsai (Orthoptera: Arcypteridae) ..... ZHU Daohong, CHEN Yanyan, ZHAO Qin (3039)
- Analysis of gamete compatibility between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas* ..... ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (3047)

### Population, Community and Ecosystem

- Avifaunal community structure and species diversity in the Mt. Qomolangma National Nature Reserve, Tibet, China ..... WANG Bin, PENG Boyong, LI Jingjing, et al (3056)
- Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains ..... QI Lin, YU Dapao, ZHOU Wangming, et al (3065)
- Community structure and species diversity of fish assemblage in the coastal waters of Jiaozhou Bay ..... XU Binduo, ZENG Huihui, XUE Ying, et al (3074)
- Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary ..... WANG Yaoping, BAI Junhong, XIAO Rong, et al (3083)
- The effects of different original state on grassland community restoration succession ..... YANG Chen, WANG Wei, WANG Shiping, et al (3092)
- Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow ..... WANG Changting, WANG Genxu, LIU Wei, et al (3103)
- Pattern-controlling mechanics of different age classes of *Stellera chamaejasme* population in degraded alpine grassland ..... GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (3114)

- Soil organic carbon pool at the western side of the sygera mountains, southeast Tibet, China ..... MA Heping, GUO Qiqiang, LIU Heman, et al (3122)
- Correlation between foliar  $\delta^{13}\text{C}$  and foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park ..... WANG Yingzi (3129)
- Influences of artificial *Kandelia obovata* mangrove forest rehabilitation on the macrobenthos in Ximen Island ..... HUANG Li, CHEN Shaobo, CHOU Jianbiao, et al (3138)
- Responses of soil microbial properties in soil profile to typical vegetation pattern and slope in karst-cluster depression area ..... FENG Shuzhen, SU Yirong, QIN Xinmin, et al (3148)
- Correlation among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau ..... XU Manhou, XUE Xian (3158)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years ..... ZHAO Liang, LIU Jiping, TIAN Xuezhi (3169)
- Sensitivity analysis of climate control in the Daisyworld model based on system dynamics ..... CHEN Haibin, TANG Haiping (3177)
- Resource and Industrial Ecology**
- Analysis of key climatic factors influencing on seed cotton yield in cotton-wheat double cropping ..... HAN Yingchun, WAN Guoping, FAN Zhengyi, et al (3185)
- The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation ..... JIANG Lina, YANG Wenbin, LU Qi, et al (3192)
- Dissolution rate under soil in karst areas and the influencing factors of different land use patterns ..... LAN Jiacheng, FU Wali, PENG Jingtao, et al (3205)
- Measuring external benefits of agricultural land preservation: an application of choice experiment in Wuhan, China ..... CHEN Zhu, JU Dengping, ZHANG Anlu (3213)
- Research Notes**
- Effect of temperature and feeding frequency on asexual reproduction and polyp growth of the scyphozoan *Cyanea nozakii* Kishinouye ..... SUN Ming, DONG Jing, CHAI Yu, LI Yulong (3222)
- The research on *Buteo hemilasius* nest-site selection on the west bank of Dalai Lake in Dalai Lake Natural Reserve ..... ZHANG Honghai, WANG Ming, CHEN Lei, et al (3233)
- Estimating rodent density using infrared-triggered camera technology ..... ZHANG Shusheng, BAO Yixin, WANG Yanni, et al (3241)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 高玉葆

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 10 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 10 (May, 2013)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 王如松                                                                                                                | Editor-in-chief | WANG Rusong                                                                                                                                                                     |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                    |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@csbg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>E-mail:journal@csbg.net                                                |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                 |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                 |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元