

文章编号: 1000-0615(2018)06-0870-11

DOI: 10.11964/jfc.20170710899

黄海大头鳕0龄幼体分布及其与环境因子的关系

张人元^{1,2}, 卞晓东^{2,3}, 单秀娟^{2,3}, 金显仕^{2,3*}, 关丽莎^{2,3}

(1. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁大连 116023;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室,
山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 山东青岛 266071;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东青岛 266071)

摘要: 大头鳕是广泛分布于太平洋北部沿岸海域的重要经济和生态种, 研究其幼体的生物学特性和分布有助于了解大头鳕的种群动态。本实验根据2016年6月、8月、10月、12月在黄海进行的渔业资源和环境调查数据, 研究了黄海大头鳕种群幼体的生长规律; 并运用广义可加模型(GAM)方法, 分析了该海域大头鳕幼体分布及其与环境因子的关系。结果显示, 黄海大头鳕幼体为正异速增长, 体质量增长较快, b 值为3.316 1。黄海大头鳕0龄幼体主要在底层盐度31.7~33.3、底层水温6.6~12.1 °C、深度35.8~87.2 m、底质为细粉砂或黏土质软泥底质的海域中生活。研究表明, 大头鳕幼体分布的季节变化与黄海冷水团的季节演变过程具有同步性。对大头鳕幼体密度有显著影响的环境因子依次为底层水温、底质、底层盐度, 而深度对大头鳕幼体密度的影响不显著。

关键词: 大头鳕; 生长; 分布特征; 环境因子; 广义可加模型

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

大头鳕(*Gadus macrocephalus*), 俗称大头腥, 有人也称之为太平洋鳕, 隶属于鳕形目(Gadiformes), 鳕科(Gadidae), 鳕属(*Gadus*)。大头鳕是冷温性底层鱼类, 生存的温度上限一般不超过14 °C^[1], 主要分布在北太平洋高纬度海域。由于黄海冷水团的存在, 黄海成为大头鳕在西北太平洋海区地理分布区的南部边界^[2]。此外, 由于对马暖流使得对马海峡温度终年维持14 °C以上, 阻碍了黄海大头鳕种群与其他群体间的基因交流, 使得黄海大头鳕种群成为一个隔离群体^[3]。黄海大头鳕一般栖息在50~80 m的泥沙或软泥底质海区, 体外受精^[4], 卵具弱黏性, 属沉性卵^[5]。产卵时间1—3月, 2月为盛期, 石岛以东及东南水域为其主要产卵场, 少数在海州湾外海产卵^[6]。

海洋生物的生活史过程和分布受各种生态因子的综合影响, 其中, 温度和盐度被认为是

影响海洋鱼类分布的关键环境因素^[7]。通常, 海洋生物分布受海水温度控制, 而盐度、深度、海流和底质组成海洋生物非随机分布的影响因子^[6]。在海洋鱼类生活史的早期阶段, 温度是影响其生长发育和存活最重要的环境因子, 温度主要通过影响幼体阶段酶促生化反应速率来影响其存活生长^[8], 而盐度可以改变温度对鱼卵和仔稚幼鱼的影响^[9-11]。Bian等^[12-13]指出, 海水温度是影响大头鳕受精卵存活及成功孵化最重要的环境因子, 并影响初孵仔鱼在水体中的分散运输。此外, 在水体环境中, 底质和水质共同构成水生生物的生活空间及水体物质能量循环的载体空间, 通过营养盐的交换及物质再循环过程, 底质成为底栖水生动植物(大头鳕幼体饵料生物)所需营养盐的来源之一^[14-15]; 且黏着沉性大头鳕受精卵孵化需要特定底质类型^[4], 这对具有时间(一次产卵类型)和空间(沉性卵团)产卵特

收稿日期: 2017-07-11 修回日期: 2017-10-12

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB453302); 国家自然科学基金(41506168); 山东省泰山学者专项基金

通信作者: 金显仕, E-mail: jin@ysfri.ac.cn

性^[4]的大头鳕幼体分布产生影响。

尽管目前有许多关于黄海大头鳕的报道, 但大部分都集中在生物学特性^[16-17]、胚胎发育^[18]、种群特征^[19]、食性^[20]、遗传结构^[3]和早期发育生态^[21]等方面, 而有关大头鳕幼体的研究却很少, 关于黄海大头鳕种群育幼场分布及其基础生态条件的研究未见相关报道。本实验根据黄海水产研究所2016年6月、8月、10月、12月4个航次的黄海渔业资源和环境调查数据, 研究了黄海大头鳕种群0龄幼体的生长规律、密度分布及其与环境因子(底温、底盐、水深和底质)的关系, 以为黄海大头鳕种群动态、资源养护和可持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 调查海域和采样方法

实验数据来自于2016年6月、8月、10月、12月中国水产科学研究院黄海水产研究所“北斗号”渔业调查船在黄海进行的渔业资源和环境调查。调查海域为120.5°~124.5°E, 33°~39°N, 调查站位如图1所示, 实际站位随海上情况略有变动。其中8、12月按图示站位进行, 6月航次隔站进行调查, 10月航次最南端调查至34°N断面(图1)。各航次调查昼夜连续进行, 逐站拖网, 每站0.5~1 h, 平均拖速3 kn。使用的底拖网网口周长836目×20 cm, 网囊网目2.4 cm, 网口高度5~7 m。

陈大刚^[6]对鱼类幼体作出的定义为性未成熟的当年生个体。黄海大头鳕产卵发生在1—3月, 黄海满11个月的大头鳕体长范围10.4~24.2 cm, 平均体长为16.79 cm, 平均体质量为50.6 g; 满1龄的大头鳕体长范围14.0~28.0 cm, 平均体长为20.5 cm, 平均体质量为115.5 g^[22], 并以此来作为筛选大头鳕0龄幼体的标准。捕获的幼体大头鳕

冷冻保存, 带回实验室解冻后测定。大头鳕幼体采集情况见表1。

1.2 大头鳕幼体的生长规律

各站位的拖网时间均标准化为1 h, 大头鳕幼体密度以单位时间渔获量(kg/h)和单位时间渔获尾数(尾/h)表示。由于大头鳕有昼夜垂直移动摄食的习性^[23], 按金显仕^[24]的方法调整夜间(18:00—6:00)渔获量和渔获尾数。

体长和体质量分别测量到0.1 cm和1.0 g, 体长—体质量关系用幂指数方程表示:

$$W = a \times L^b$$

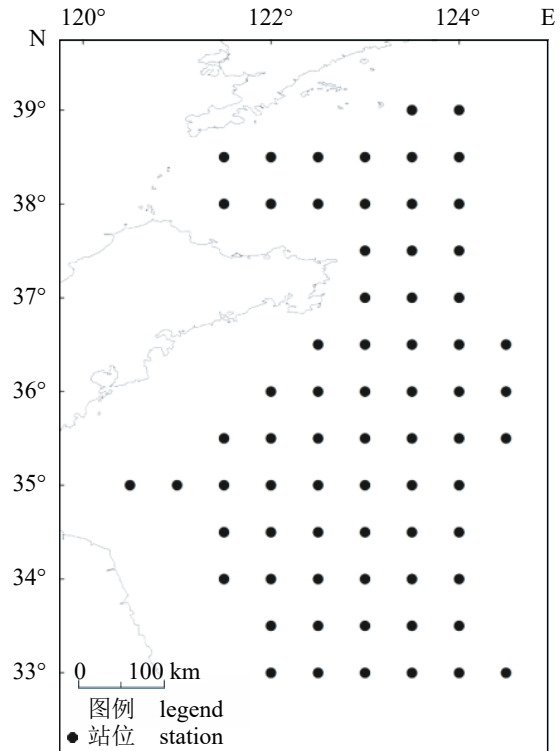


图1 黄海渔业资源调查站位图

Fig. 1 Fishery resources survey stations in the Yellow Sea

表1 黄海大头鳕幼体样品采集情况

Tab. 1 The age 0 group *G. macrocephalus* collection in the Yellow Sea

航次时间 survey time	调查站位数/个 number of survey stations	大头鳕幼体出现站位数/个 number of survey stations with juvenile <i>G. macrocephalus</i> appearing	大头鳕幼体捕获量/尾 number of caught juvenile <i>G. macrocephalus</i>	大头鳕幼体(生物学测定)/尾 number of juvenile <i>G.</i> <i>macrocephalus</i> (biological determination)
2016-06	35	12	137	16
2016-08	69	30	6010	548
2016-10	58	26	1645	554
2016-12	69	13	75	34

式中, W 为体质量(g), L 为体长(cm), 参数 a 为生长的条件因子, a 值会随不同的季节、日期和不同的栖息地变化而改变^[25]; b 为异速生长因子(alometric factor), 反映了个体生长的不均匀性^[26]。运用统计软件SPSS进行Pauly的 t 检验法^[27]来检验体长与体质量回归方程的幂指数 b 与3之间的差异。检验公式:

$$t = \frac{SD(L)}{SD(W)} \times \frac{|b-3|}{\sqrt{1-R^2}} \times \sqrt{n-2}$$

式中, $SD(L)$ 、 $SD(W)$ 分别为体长、体质量对数值的标准差, n 、 R 分别为样本数和相关系数。当检验 b 与3无显著性差异时, 表示大头鳕幼体为等速生长, 体长和体质量等速增加; 当检验有显著性差异时, 表示其为异速生长(且当 $b>3$ 时为正异速生长, 体质量的增加快于体长的增加; $b<3$ 时为负异速生长, 体长的增长快于体质量的增加)^[28-29]。借助Excel 2007拟合体质量—体长生长曲线。

根据2016年6月、8月、10月、12月4个调查航次拖网资料, 分别统计各航次所捕获幼体体长数据, 借助Excel 2007绘制体长分布频率直方图以研究大头鳕幼体体长分布特征。

1.3 幼体密度及其环境因子关联性

幼体密度及其水文要素关系 2016年各航次站点海底温度、海底盐度数据使用Seabird-19型CTD现场采集, 其中以海底以上0.5 m水层实测数据的平均值代表底层海水温度、盐度。运用声呐探测系统测定各站点点的实际深度, 深度作为环境本身的特质, 其短时间尺度变化极小。考虑到精确度的原因, 由于4个调查航次中8月实际调查站点数最多, 覆盖面最大, 因此, 实验将8月的深度探测数据作为各调查航次站点的实际深度。

根据获得的幼体种群密度, 结合CTD测得的底层温度、底层盐度数据及声呐探测系统测得的深度数据, 借助ArcGIS 10.0软件对水文要素, 如底温、底盐及深度(8月), 进行克里格插值, 绘制黄海底层温度、盐度及深度等值线分布图, 描述大头鳕幼体分布特征及其水文要素的关联性。

幼体密度与底质关系 参考《黄、渤海区渔业资源调查与区划》^[22]中的黄海底质统计资料, 黄海分为5种底质组成类型: 粉砂质黏土软

泥、细粉砂、黏土质软泥、细砂、粗粉砂。结合2016年6月、8月、10月、12月4个航次实际调查站位和渔获量数据, 统计出各种底质类型所分布的大头鳕幼体数量, 并运用Excel 2007绘制幼体密度—底质直方图以研究大头鳕幼体分布海域的底质组成。

1.4 统计分析

本研究选取水深、底层水温、底层盐度和底质作为环境因子。利用广义可加模型(generalized additive model, GAM)对大头鳕幼体密度和相关环境因子进行分析。GAM模型的一般表达式^[30]:

$$Y = \alpha + \sum_{j=1}^n f_j(x_j) + \varepsilon$$

式中, Y 为大头鳕幼体密度, 以单位网次渔获尾数(尾/h)表示, 即各调查站位拖网1 h及拖速3 kn时的渔获尾数; x_j 表示解释变量, 即各站位的影响因子; α 是适合函数的截距, ε 表示残差, $f_j(x_j)$ 表示各自变量的任意单变量函数, 为样条平滑函数(spline smoothing)。经检验, Y 服从对数正态分布, 对其作对数变换后, 此时服从正态分布, 连接函数为“identity”^[31]。利用 F 检验评估预测变量的显著性^[32-33]。分析结果通过 P 和deviance explained来表征模型的统计结果。其中, P 代表了统计结果的显著性水平; deviance explained是考虑所选自变量变化对因变量变化的影响, 即表示对模型总体变化的解释能力^[34]。模型构建过程在R语言中‘mgcv’软件包中实现。

2 结果

2.1 0龄大头鳕的生长

大头鳕幼体体长—体质量关系的最优方程为 $W=0.0058 L^{3.316}$, 式中, $n=1\ 152$, $R^2=0.9396$; 由 t 检验(Pauly)可得, 体长与体质量相关的幂指数与3有显著差异($t=12.31>t_{0.05}=1.96$), 表明大头鳕幼体为正异速增长, 其体质量的增加要快于体长的增加。

6月所捕获的大头鳕幼体平均体长为6.66 cm, 平均体质量为4.3 g; 8月幼体平均体长为12.41 cm, 平均体质量为23.2 g; 10月幼体平均体长为15.51 cm, 平均体质量为58.5 g; 12月幼体平均体长为18.29 cm, 平均体质量为83.5 g(图2中箭头)。4个航次调查的大头鳕幼体体长分布频率如图3所示。6月大头鳕幼体的体长范围为3.8~

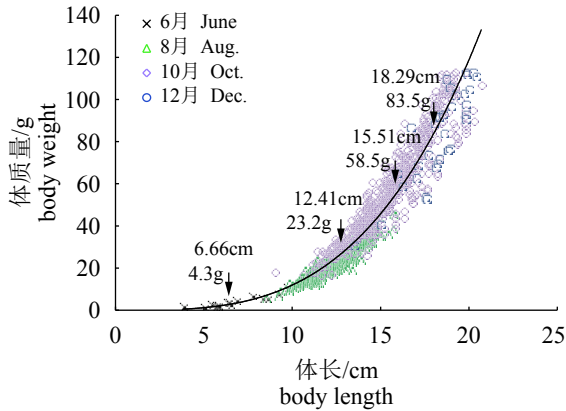


图2 黄海大头鳕幼体体长—体质量曲线

Fig. 2 Body weight-length curve of age 0 group *G. macrocephalus* in the Yellow Sea

9.7 cm, 优势体长为5.0~7.0 cm, 占总体的50%; 8月大头鳕幼体的体长范围为8.5~15.8 cm, 优势体长为11.0~13.0 cm, 占总体的55.6%; 10月大头鳕幼体的体长范围为9.0~20.3 cm, 优势体长为15.0~17.0 cm, 占总体的33.3%; 12月大头鳕幼体

的体长范围为13.5~20.7 cm, 优势体长为17.0~19.0 cm, 占总体的53%。

2.2 0龄大头鳕幼体分布及其栖息环境

根据底拖网调查数据, 大头鳕0龄幼体主要集中在石岛以东及其东南海域, 少数分布在烟威渔场以东海域, 幼体分布海域底层水温范围为6.6~12.1 °C (表3)。春末夏初(6月), 底层水温分布图中有两处被6 °C等温线所包围的低温中心, 一处在黄海北部38.5°N, 122°E附近, 另一处低温中心位置在36°N, 122°E附近; 夏季(8月), 冷水团的势力明显增强, 黄海中、北部大面积区域被8 °C等温线所包围, 形成明显的南、北黄海2个低温中心, 北黄海低温中心位置在38.5°N, 122°E附近, 南黄海低温中心位置在36°N, 123°E附近; 秋季(10月), 北黄海低温中心由夏季的6 °C升高到10 °C, 南黄海低温中心温度变化不明显, 但南黄海低温范围有所缩小; 冬季(12月), 底层水温分布较为均匀, 并没有形成明显的低温中心(图4-a)。

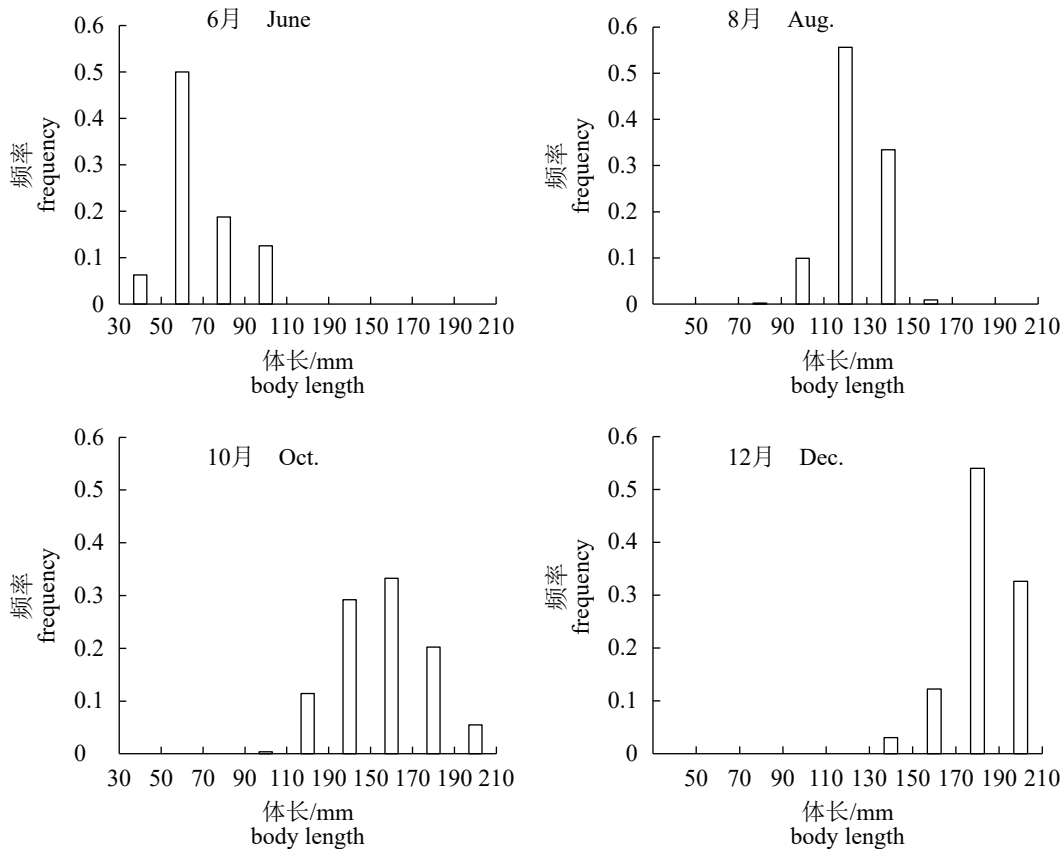


图3 大头鳕幼体体长频率分布

Fig. 3 Body length frequency distribution of the age 0 group *G. macrocephalus*

表 2 大头鳕幼体分布海域水文(底温、底盐和深度)特征

Tab. 2 The hydrological characteristics (bottom temperature, bottom salinity and depth) of the nursery habitats of *G. macrocephalus*

航次时间 survey time	深度/m range of depth	底温/°C temperature range of bottom water	底盐 salinity range of bottom water
2016-06	35.8~79.9	7.1~10.2	31.9~33.2
2016-08	41.8~82.6	6.6~12.0	31.7~33.3
2016-10	48.2~87.2	6.8~12.1	32.0~32.9
2016-12	50.6~80.9	7.7~12.0	32.1~33.0

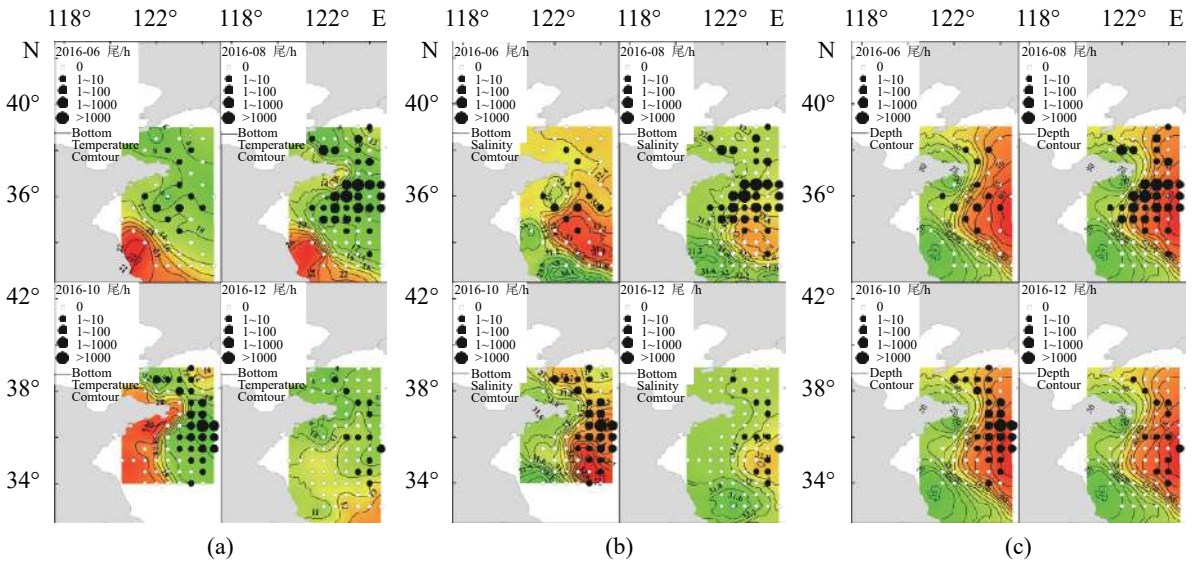


图 4 大头鳕0龄幼体分布与水文要素的关系

(a)大头鳕0龄幼体密度—底层温度；(b)大头鳕0龄幼体密度—底层盐度；(c)大头鳕0龄幼体密度—深度

Fig. 4 Distribution of age 0 group *G. macrocephalus* with hydrological elements

(a) juvenile *G. macrocephalus* density-bottom temperature; (b) juvenile *G. macrocephalus* density-bottom salinity; (c) juvenile *G. macrocephalus* density-depth

大头鳕幼体均分布在黄海冷水团水温较低的海域内，其主要集中海域底温范围为7~12°C。大头鳕幼体分布范围随着黄海冷水团的季节性移动而改变。大头鳕幼体分布海域底层盐度范围为31.7~33.3。大头鳕幼体集中海域底层盐度范围为32.0~33.0(图4-b)。深度方面，根据航次调查数据，大头鳕幼体分布海域深度范围为35.8~87.2 m。黄海大头鳕幼体主要集中海域深度范围为30.0~80.0 m(图4-c)。

大头鳕幼体主要集中在细粉砂、黏土质软泥底质的海域(图5)。细粉砂底质海域中分布的大头鳕幼体最多，黏土质软泥底质海域数量仍然比较多，次之；粉砂质黏土软泥、细砂、粗粉砂底质海域分布的大头鳕幼体较少，但这3种类型底质中大头鳕幼体分布量相差不大(K个独立样本的非参数检验，渐进显著性为0.368>0.01)。

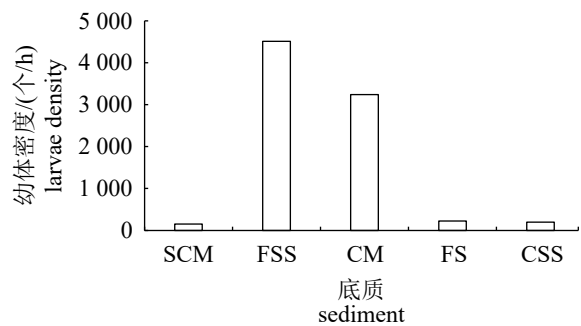


图 5 大头鳕0龄幼体分布与底质的关系

黄海底质分布资料参考《黄、渤海区渔业资源调查和区划》；其中，SCM.粉砂质黏土软泥；FSS.细粉砂；CM.黏土质软泥；FS.细砂；CSS.粗粉砂

Fig. 5 Distribution of age 0 *G. macrocephalus* with sediment

The data of sediment distribution in the Yellow Sea refers to investigation and division of fisheries resource of Yellow sea and Bohai Sea; SCM. silty clay mud; FSS. fine silty sand; CM. clay mud; FS. fine sand; CSS. coarse silty sand

表3 GAM模型统计结果

Tab. 3 Statistical results of GAM in age 0 group
G. macrocephalus density with environment factors

模型因子 model factors	解释偏差/% deviance explained	F检验 F-test (P)
底层温度 bottom temperature	32.7	$4.9 \times 10^{-7**}$
底层盐度 bottom salinity	13.1	$3.2 \times 10^{-2*}$
深度 depth	4.47	5.8×10^{-2}
底质 sediment	18.8	$3.8 \times 10^{-3**}$

注: *表示差异显著($P < 0.05$); **表示差异极显著($P < 0.01$)

Notes: * significant difference ($P < 0.05$); ** highly significant difference ($P < 0.01$)

2.3 统计分析

实验所选环境因子中, 温度是对大头鳕幼体密度影响最为显著的因子(解释偏差为32.7%, $P = 4.9 \times 10^{-7}$), 随着温度的升高, 大头鳕幼体密度有显著减弱的趋势(图6-a); 随着盐度的增加, 大头鳕幼体密度呈现先增加后减小的趋势(解释偏差为13.1%, $P = 3.2 \times 10^{-2}$), 当海水底层盐度为32.5时, 幼体密度倾向于最大(图6-b); 底质对大头鳕幼体密度影响显著(解释偏差为18.8%, $P = 3.8 \times 10^{-3}$)。大头鳕幼体主要分布在细粉砂底质海域, 其次在黏土质软泥底质海域中幼体分布也较多; 而深度对大头鳕幼体密度的影响不显著(解释偏差为4.47%, $P = 5.8 \times 10^{-2}$)(图6-c)。综上, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平, GAM模型筛选出的对大头鳕幼体密度影响显著的因子依次为底层温度、底质、底层盐度。

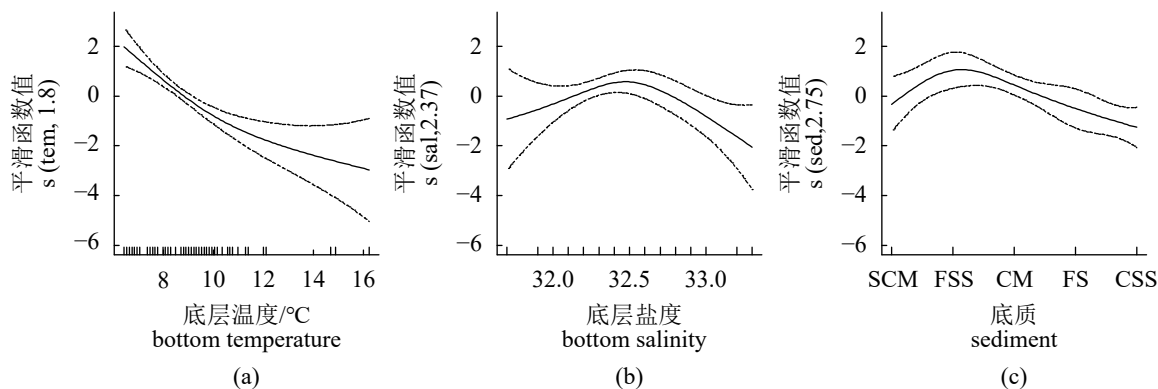


图6 各环境因子与大头鳕幼体密度关系的GAM分析图

括号中数字表示估计自由度, 虚线表示可信区间上下限, 横坐标表示解释变量的实测值

Fig. 6 The relationship between environmental factors and age 0 group density based on the GAM

The vertical axis represents the Spline smoothing function value, the number in parentheses indicates the estimated degree of freedom, and the dotted line represents the upper and lower bounds of the confidence interval, the abscissa represents the measured value of the explanatory variable; the Sediment types in Fig. 6-c are the same as in Fig. 5

3 讨论

3.1 大头鳕幼体生长规律

采用关系式 $W = a \times L^b$ 对鱼类的体长—体质量关系进行回归分析, 求得生长幂指数 b 值, 可以用来判断该鱼种是否为匀速生长^[35-36]。导致幂指数 b 发生变化的原因有很多, 如发育阶段、性别、种群等, 而其他一些相关因素如胃饱满度、疾病及寄生虫量等也均能够引起 b 值的变化^[25, 37-38]。条件因子 a 值会随季节发生变化, 一般鱼类在产卵后 a 值较小, 产卵前性成熟时最高^[35]。本实验中, 大头鳕幼鱼体长与体质量并不是等速增长, 体质量增长较快, b 值为 3.316 1, 与李忠炉等^[19]所报道的黄海大头鳕 b 值(2.994)之间进行 t 检验, 差异显著($P < 0.05$)。根据本实验的研究对象, 生长阶段的不同, 即幼鱼和成鱼之间的生长差异是造成二者之间产生差异的主要原因。对于 a 值, 本实验中大头鳕幼体的条件因子 a 值为 0.005 8, 与李忠炉等^[19]所研究的冬季大头鳕产卵群体 a 值(0.015 5)之间进行 t 检验, 差异亦显著($P < 0.05$), 由实验对象不同导致的性腺发育程度不同是造成 a 值产生差异的主要原因。

3.2 大头鳕幼体分布与水文要素的关系

育幼场的栖息条件会直接影响幼体的生长、存活及其补充率^[39]。黄海大头鳕0龄幼体主要栖息在底温7~12°C、盐度32~33、水深30~80 m、底质为细粉砂或黏土质软泥底质的海区。本实

验发现决定黄海大头鳕育幼场各种环境要素依次为底层温度、底质和底层盐度,而深度对大头鳕幼体密度的影响不显著。黄海大头鳕幼体的分布受水温限制^[40],黄海冷水团的季节消长对大头鳕幼体分布具有重要影响,其幼体分布范围随着黄海冷水团的季节性移动而改变。Methven等^[41]和Magill等^[42]对大西洋鳕(*G. morhua*)幼体的研究发现,冬季大西洋鳕幼体数量会出现骤减现象,而本研究发现大头鳕幼体也存在类似现象。经分析,上述现象出现原因是6—10月大头鳕幼体分布受水温限制,其幼体仅分布在冷水团区域,分布相对集中;而11月以后黄海水温降低,冷水团消失^[43],大头鳕分布范围扩大,从而出现冬季相对资源密度降低。

不同地理群体大头鳕育幼场水温不同^[44]。陆奥湾(Mutsu Bay)是日本本州东北部和北海道南部附近太平洋侧附近海域大头鳕种群的重要育幼场,同我国黄海水域,其也处在大头鳕在西北太平洋地理分布区的南部边缘,分布于此的幼体主要集中在底温5~12℃的海域^[1, 45];分布在日本北海道东北部太平洋渔场侧的大头鳕幼体主要集中在底温4~8℃的海域^[44];而分布在太平洋东海岸接近大头鳕南部地理分布区边缘的加拿大海域沿岸的大头鳕幼体主要集中在底温6~9℃的海域^[46]。虽然水深并非大头鳕育幼场的限制性环境因子,但不同地理群体大头鳕幼体栖息水深也不尽相同。对于大头鳕幼体栖息深度,本研究发现黄海大头鳕幼体主要分布在深度30~80 m的海域;而分布在加拿大太平洋沿岸的大头鳕幼体主要集中在深度100~135 m的海域^[47];阿拉斯加半岛是白令海东部大头鳕群体的主要育幼场^[47],其幼体主要分布在深度50~80 m的海域^[39, 48];对于亚洲群体,分布在亚洲北部(如勘察加半岛西部)的大头鳕幼体主要集中在深度80~290 m的海域^[49],分布在亚洲南部(如千岛群岛南部、北海道沿岸、朝鲜半岛东部等)的大头鳕幼体主要集中在15~50 m的海域^[1, 45]。

3.3 GAM模型分析结果

本实验通过GAM模型分析,得出影响黄海大头鳕育幼场各种环境要素依次为底层温度、底质和底层盐度,与Alderdice等^[1]和Bian等^[12]通过实验生态学研究得出的海水温度是影响大头鳕早期发育和存活最重要的环境因子,盐度等

对温度的影响起修饰和限定作用的结论相一致。然而,在讨论幼体密度分布与环境因子关系时,环境因子之间可能会存在交互作用^[10],此外,幼体主要分布海域水体(黄海冷水团)在低温的同时会具备高盐的特征^[50],以上均表明温度和盐度之间具有交互作用。而本实验运用GAM模型进行分析时,并没有考虑到因子间交互作用,这可能会对实验误差产生一定的影响。因此,下一步研究重点应放在因子间交互作用,以完善实验结果。

参考文献:

- [1] Alderdice D F, Forrester C R. Effects of salinity, temperature, and dissolved oxygen on early development of the Pacific cod (*Gadus macrocephalus*)[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1971, 28(6): 883-902.
- [2] Cohen D M, Inada T, Iwamoto T, *et al.* An annotated and illustrated catalogue of cods, hakes, grenadiers and other gadiform fishes known to date[R]. FAO Species Catalogue. Rome: FAO, 1990: 442.
- [3] 刘名. 太平洋鲱和大头鳕的群体遗传学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 132-163.
Liu M. Population genetics of Pacific herring and Pacific cod in North Pacific[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 132-163 (in Chinese).
- [4] Sakurai Y, Hattori T. Reproductive behavior of Pacific cod in captivity[J]. Fisheries Science, 1996, 62(2): 222-228.
- [5] Thomson J A. On the demersal quality of the fertilized eggs of Pacific cod, *Gadus macrocephalus* Tilesius[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1963, 20(4): 1087-1088.
- [6] 陈大刚. 黄渤海渔业生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 97.
Chen D G. Fishery ecology in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1991: 97 (in Chinese).
- [7] Holliday F G T, Blaxter J H S. The effects of salinity on the developing eggs and larvae of the herring[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1960, 39(3): 591-603.
- [8] Blaxter J H S. Development: eggs and larvae[J]. Fish Physiology, 1969, 3: 177-252.
- [9] Laurence G C, Howell W H. Embryology and influence

- of temperature and salinity on early development and survival of yellowtail flounder *Limanda ferruginea*[J]. Marine Ecology-Progress Series, 1981, 6(1): 11-18.
- [10] Pankhurst N W, Munday P L. Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages[J]. Marine and Freshwater Research, 2011, 62(9): 1015-1026.
- [11] Bian X D, Zhang X M, Sakurai Y, *et al.* Interactive effects of incubation temperature and salinity on the early life stages of Pacific cod *Gadus macrocephalus*[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2016, 124: 117-128.
- [12] Bian X, Zhang X, Sakurai Y, *et al.* Temperature-mediated survival, development and hatching variation of Pacific cod *Gadus macrocephalus* eggs[J]. Journal of Fish Biology, 2014, 84(1): 85-105.
- [13] Bian X, Zhang X, Sakurai Y, *et al.* Envelope surface ultrastructure and specific gravity of artificially fertilized Pacific cod *Gadus macrocephalus* eggs[J]. Journal of Fish Biology, 2014, 84(2): 403-421.
- [14] 魏南, 余德光, 王广军, 等. 持续充氧对养殖池塘上覆水-泥水界面-沉积物间隙水中离子垂直分布的影响[J]. 水产学报, 2017, 41(7): 1116-1125.
- Wei N, Yu D G, Wang G J, *et al.* Effect of aeration on vertical distribution of the ions in overlying and interstitial waters of microcosms paved with aquaculture sediment[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(7): 1116-1125(in Chinese).
- [15] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: II 磷的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 792-796.
- Zhou J F, Wen Y M, Li Y C. Nutrients diffusion at the water-sediment interface of farming ponds by indoor simulation experiment: II diffusion of phosphorous compounds[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(3): 792-796(in Chinese).
- [16] 高天翔, 武云飞, 张秀梅, 等. 四种鳕鱼的形态学研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 884-890.
- Gao T X, Wu Y F, Zhang X M, *et al.* Morphological study on four kinds of Gadidae fish[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(6): 884-890(in Chinese).
- [17] 高天翔, 张肖荣, 王丹, 等. 几种鳕鱼的生物学初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2003(1): 35-42.
- Gao T X, Zhang X R, Wang D, *et al.* Preliminary biological study on several Gadidae fishes[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003(1): 35-42(in Chinese).
- [18] Forrester C R. Laboratory observations on embryonic development and larvae of the Pacific cod (*Gadus macrocephalus* Tilesius)[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1964, 21(1): 9-16.
- [19] 李忠炉, 金显仕, 张波, 等. 黄海大头鳕(*Gadus macrocephalus*)种群特征的年际变化[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(5): 924-931.
- Li Z L, Jin X S, Zhang B, *et al.* Interannual variations in the population characteristics of the Pacific cod *Gadus macrocephalus* in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(5): 924-931(in Chinese).
- [20] 高天翔, 杜宁, 张义龙, 等. 大头鳕 *Gadus macrocephalus* Tilesius 摄食食性的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2003(4): 74-78.
- Gao T X, Du N, Zhang Y L, *et al.* Preliminary study of diet of Pacific cod, *Gadus macrocephalus* Tilesius[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003(4): 74-78(in Chinese).
- [21] 于道德, 刘名, 刘洪军, 等. 黄海大头鳕胚胎发育过程[J]. 海洋科学, 2014, 38(3): 80-86.
- Yu D D, Liu M, Liu H J, *et al.* The embryonic development of *Gadus macrocephalus* Tilesius[J]. Marine Sciences, 2014, 38(3): 80-86(in Chinese).
- [22] 刘效舜, 吴敬南, 韩光祖, 等. 黄渤海区渔业资源调查与区划[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 3-168.
- Liu X S, Wu J N, Han G Z, *et al.* Investigation and division of fisheries resource of the Yellow Sea and the Bohai Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1990: 3-168 (in Chinese).
- [23] 方明烈. 黄海鳕鱼(*Gadus macrocephalus* Tilesius)摄食习性的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 1982(2): 46-54.
- Fang M L. Preliminary studies on the feeding habits of cod (*Gadus macrocephalus* Tilesius) in the Yellow Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1982(2): 46-54(in Chinese).
- [24] 金显仕. 底拖网资源调查的昼夜误差分析[J]. 海洋水产研究, 1997, 18(1): 42-46.
- Jin X S. Analysis of bottom trawl survey between day and night[J]. Marine Fisheries Research, 1997, 18(1): 42-46(in Chinese).
- [25] Bagenal T B. Methods for Assessment of Fish Production in Fresh Waters[M]. Oxford: Blackwell Scientific

- Publications Ltd., 1978: 101-136.
- [26] 李忠炉. 黄渤海小黄鱼、大头鳕和黄鲛种群生物学特征的年际变化[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011: 40-55.
- Li Z L. Interannual changes in biological characteristics of small yellow croaker *Larimichthys polyactis*, Pacific cod *Gadus macrocephalus* and anglerfish *Lophius litulon* in the Bohai Sea and Yellow Sea[D]. Qingdao: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Marine Research Institute), 2011: 40-55 (in Chinese).
- [27] Pauly D. Fish population dynamics in tropical waters: A manual for use with programmable calculators[M]. Makati, Manila, Philippines: International Center for Living Aquatic Resources Management (I. C. L. A. R. M.), 1984: 325.
- [28] Froese R. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22(4): 241-253.
- [29] 王雪辉, 杜飞雁, 邱永松. 南海北部主要经济鱼类体长与体重关系[J]. 台湾海峡, 2006, 25(2): 262-266.
- Wang X H, Du F Y, Qiu Y S. Length-weight relationships of important commercial fishes in northern South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2006, 25(2): 262-266(in Chinese).
- [30] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized additive models[M]. London: Chapman and Hall, 1990: 1-335.
- [31] Kabacoff R I. R in Action: Data analysis and graphics with R[M]. 2nd ed. Shelter Island, NY: Manning Publications Co., 2015: 283.
- [32] Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle[M]//Kotz S, Johnson N L. Breakthroughs in Statistics: Foundations and Basic Theory. New York: Springer, 1992: 610-624.
- [33] Burnham K P, Anderson D R. Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach[M]. 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2003: 1-454.
- [34] 周慧敏, 冯剑丰, 朱琳. 基于GAM的渤海中部水体叶绿素a环境因子影响分析[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 531-536.
- Zhou H M, Feng J F, Zhu L. Effects of environmental factors on the chlorophyll a in central Bohai Sea with GAM[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(4): 531-536(in Chinese).
- [35] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 18-40.
- Zhan B Y. Fish stock assessment[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995: 18-40 (in Chinese).
- [36] 华元俞, 胡传林. 鱼种重量与长度相关公式($W=aL^b$)的生物学意义及其运用[C]//中国鱼类学会. 鱼类学论文集(第1辑). 北京: 科学出版社, 1981: 125-133.
- Hua Y Y, Hu C L. The biological significance of the relative formula of weight and length of fish species and its application[C]//Chinese Ichthyological Society. Proceedings of Ichthyological (Series 1). Beijing: Science Press, 1981: 125-133 (in Chinese).
- [37] 常剑波, 孙建贻, 段中华, 等. 网湖似刺鲃种群生长和死亡率研究[J]. 水生生物学报, 1994, 18(3): 230-239.
- Chang J B, Sun J Y, Duan Z H, et al. Study on the population growth and mortality of *Paracanthobrama guichenoti* Bleeker in Wanghu Lake[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1994, 18(3): 230-239(in Chinese).
- [38] Le Cren E D. The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*)[J]. Journal of Animal Ecology, 1951, 20(2): 201-219.
- [39] Hurst T P, Cooper D W, Duffy-Anderson J T, et al. Contrasting coastal and shelf nursery habitats of Pacific cod in the southeastern Bering Sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(2): 515-527.
- [40] Laurel B J, Hurst T P, Copeman L A, et al. The role of temperature on the growth and survival of early and late hatching Pacific cod larvae (*Gadus macrocephalus*)[J]. Journal of Plankton Research, 2008, 30(9): 1051-1060.
- [41] Methven D A, Bajdik C. Temporal variation in size and abundance of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) at an inshore site off eastern Newfoundland[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, 51(1): 78-90.
- [42] Magill S H, Sayer M D J. Abundance of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) in the shallow rocky subtidal and the relationship to winter seawater temperature[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2004, 84(2): 439-442.
- [43] 任慧军, 詹杰民. 黄海冷水团的季节变化特征及其形成机制研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2005, 20(S1): 887-896.
- Ren H J, Zhan J M. A numerical study on the seasonal

- variability of the Yellow Sea cold water mass and the related dynamics[J]. *Journal of Hydrodynamics: Series A*, 2005, 20(S1): 887-896(in Chinese).
- [44] Sakurai Y. An overview of the Oyashio ecosystem[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(23-26): 2526-2542.
- [45] Takatsu T, Yoshida Y, Kooka K, *et al.* Spatial and temporal distribution of Pacific cod *Gadus macrocephalus* juveniles in Mutsu Bay, Japan[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 2001, 65(1): 6-14.
- [46] Ketchen K S. Observations on the ecology of the Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in Canadian waters[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1961, 18(4): 513-558.
- [47] Hurst T P, Moss J H, Miller J A. Distributional patterns of 0-group Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the eastern Bering Sea under variable recruitment and thermal conditions[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2012, 69(2): 163-174.
- [48] Parker-Stetter S L, Horne J K, Farley E V, *et al.* Summer distributions of forage fish in the eastern Bering Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 94: 211-230.
- [49] Moiseev P A. Cod and flounders of the far eastern seas[J]. *Izvestiia Tikhookeanskovo Nauchno-Issledovatel'skovo. Instituta Rybnovo Khoziaistvai Okeanografii*, 1953, 40: 21-118.
- [50] 江蓓洁, 鲍献文, 吴德星, 等. 北黄海冷水团温、盐多年变化特征及影响因素[J]. *海洋学报*, 2007, 29(4): 1-10.
- Jiang B J, Bao X W, Wu D X, *et al.* Interannual variation of temperature and salinity of northern Huanghai Sea cold water mass and its probable cause[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(4): 1-10(in Chinese).

Distribution of the age 0 group Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the Yellow Sea and its relationship with environmental factors

ZHANG Renyuan^{1,2}, BIAN Xiaodong^{2,3}, SHAN Xiujuan^{2,3}, JIN Xianshi^{2,3*}, GUAN Lisha^{2,3}

(1. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,

Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment, Shandong Province, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

3. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Pacific cod *Gadus macrocephalus* is distributed around the rim of the North Pacific Ocean, and it's considered as an ecologically important species. Studies on the biological characteristics and distribution patterns of juvenile Pacific cod would be helpful to understand cod population dynamics. Based on the data collected during the fishery resources surveys carried out in June, August, October and December 2016, the growth of the age 0 group Pacific cod in the Yellow Sea was studied, and the generalized additive model (GAM) was used to analyze the distribution characteristics and their relationship with environmental factors of the age 0 group Pacific cod. The results showed that the age 0 Pacific cod was allometric. Growth rate of the body weight was not equal to the body length, and the weight gain was faster. Allometric factor b was 3.3161. The age 0 group Pacific cods in the Yellow Sea were distributed in the waters in bottom salinity range of 31.7 to 33.3, in bottom water temperature range from 6.6 to 12.1 °C and in depth range of 35.8 to 87.2 m. The favorite sediment in the nursery habitats was fine silty sand and soft clay mud. The seasonal variation in the distribution pattern of the age 0 group Pacific cod was synchronized with the seasonal variation of the Yellow Sea cold water mass. The environmental factors which had significant effects on the ecological density of the cod juvenile were in the order of bottom water temperature, sediment and bottom salinity, while the depth had no significant influence on the juvenile density.

Key words: *Gadus macrocephalus*; growth; distribution patterns; environmental factors; generalized additive model(GAM)

Corresponding author: JIN Xianshi. E-mail: jin@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Basic Research Program of China(2015CB453302); National Natural Science Foundation of China(41506168); Special Funds for Taishan Scholar Project of Shandong Province