

利用不同生物指数评价辽河口底栖生态质量适用性

王桂营^{1,2}, 李宏俊^{2*}, 孙艺², 吴忠鑫¹, 马成龙¹

(1.大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁大连 116023; 2.国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116000)

摘要 利用辽河口春季、夏季、秋季 3 个季节大型底栖动物调查数据, 分析 AMBI 指数 (AZTI's Marine Biotic Index)、BENTIX 指数、多因子 AMBI 指数 (Multivariate AMBI, M-AMBI)、香农-威纳多样性指数 (Shannon-Wiener diversity index, H')、丰富度指数 (Margalef, D), 在 3 个季节间数值的差异性和评价结果的合理性及其与环境因子的相关性。结果表明, AMBI 和 BENTIX 指数在 3 个季节间存在显著的差异性, 主要由于具有极显著相关性的环境因子 (总有机碳、温度、盐度) 在 3 个季节间变化较大, 影响底栖动物生态分组。AMBI 和 BENTIX 指数的评价结果基本一致, 但是不能有效地区分人为环境压力和自然环境压力且评价的污染程度偏低, 因此其评价结果不完全合理; D 指数评价结果偏差较大, 主要由于该研究使用的评价标准值存在一定的不合理性; M-AMBI 和 H' 指数评价结果基本一致, 且评价结果更为合理, 更能有效地反映人为环境压力。对于温带大陆性季风气候以及底栖动物组成以敏感物种为主的辽河口, 选择 M-AMBI 和 H' 指数更能合理有效地评价生态环境质量状况。

关键词 辽河口; 底栖动物; 环境评价; 生物指数; 生态质量; 适用性

中图分类号 X 826

文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)18-0087-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.18.022



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

Applicability of Evaluation of Benthic Ecological Quality of Liaohe Estuary by Using Different Biological Indexes

WANG Gui-ying^{1,2}, LI Hong-jun², SUN Yi² et al (1. School of Fisheries and Life Sciences, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, Liaoning 116000)

Abstract This study used the survey data of macrobenthos in the three seasons of spring, summer and autumn in the Liaohe Estuary to analyze the AMBI index (AZTI's Marine Biotic Index), BENTIX index, multivariate AMBI index (Multivariate AMBI, M-AMBI), and Shannon-Wiener diversity index (Shannon-Wiener, H'), richness index (Margalef, D), the difference of values between the three seasons, the rationality of the evaluation results and their correlation with environmental factors. The results showed that there were significant differences in the values of AMBI and BENTIX indexes between the three seasons, mainly due to the significant changes in environmental factors (TOC, temperature, salinity) with extremely significant correlations between the three seasons, which affected the zoobenthos ecology grouping. The evaluation results of AMBI and BENTIX indexes were basically the same, but they cannot effectively distinguish between man-made environmental pressure and natural environmental pressure, and the pollution degree of the evaluation was low, so the evaluation results were not completely reasonable; the D index evaluation results had large deviations, mainly due to this research the evaluation standard value used had certain irrationality; the evaluation results of M-AMBI and H' index were basically the same, and the evaluation results were more reasonable and could effectively reflect man-made environmental pressure. For the temperate continental monsoon climate and the Liaohe Estuary where benthic fauna was composed of sensitive species, the M-AMBI and H' indexes could be more reasonable and effective to evaluate the quality of the ecological environment.

Key words Liaohe Estuary; Benthic fauna; Environmental evaluation; Biological index; Ecological quality; Applicability

辽河口位于辽河与渤海交汇处, 是陆海相互作用最强烈的地区^[1]。随着社会经济快速发展, 大量环境污染物汇聚养殖污染, 使得河口生态环境遭受严重破坏^[1]。利用生物指数对环境状况准确评价, 是环境恢复的重要前提^[2]。2000 年欧盟颁布的“水框架指令”, 极大促进了生物指数的发展^[3]。河口和近岸海域用于生态环境评价的生物类群主要包含大型藻类、浮游植物、鱼类、底栖生物等, 其中利用大型底栖生物类群的方法约占全部评价方法的 27%^[4]。

目前研究中使用底栖生物评价指数最为广泛^[5], 其中海洋底栖生物指数主要包含 AMBI 指数 (AZTI's Marine Biotic Index)、BENTIX 指数、M-AMBI 指数、多样性指数 (H')、丰富度指数 (D)、均匀度指数 (J')、BQI 指数、BOPA 指数、MPI 指数、B-IBI 指数等^[6-10]。AMBI 指数由 Borja 等^[11]提出, 经多年的完善和发展该指数已在欧洲、美洲和非洲等区域得到广泛应用^[12]。BENTIX 指数基于 AMBI 指数, 只是减少生物生态分组类群避免物种分类有误^[13]。 H' 指数由 Shannon 等^[14]

提出, 主要用来描述生物群落的生态学特征, 也用来监测水域底栖生物群落的结构变化, 被认为是较好的环境质量评价指数^[15]。 D 指数通过将具体物种丰度与个体总数相关联系起来量化多样性^[16]。M-AMBI 综合指数包含 AMBI 和 H' 指数以及物种丰度, 被研究者认为能够更有效地反映人为环境压力^[17]。该研究将 AMBI、BENTIX、 H' 、 D 、M-AMBI 指数在辽河口近岸海域进行应用, 以验证 5 种评价指数在辽河口的适用性, 为我国近岸海域环境评价指数的选取以及建立符合我国近岸海域特点的底栖生物指数提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理 在 2013 年 8 月、10 月和 2014 年 5 月对辽河口开展夏季、秋季、春季 3 个航次的大型底栖动物调查。初步设置 32 个站位开展定点采样, 实测 25 个站位 (图 1)。

每个站位使用 0.05 m² 的抓斗式采泥器取样 3 次, 并用孔径为 0.5 mm 的网筛分选大型底栖动物, 5% 甲醛溶液固定保存。实验室中进行形态鉴定、计数和称重, 参照《海洋监测规范》(GB/T 12763.6—2007)。每站位采集 3 份水样和沉积物样低温保存带回实验室测定, 分析的环境因子分为两类: 沉积环境因子包括叶绿素 a (Chl-a) 和沉积物粒度, 其中沉积物粒度分析砂 (sand)、泥砂 (silt)、泥 (clay) 含量百分比; 海

作者简介 王桂营 (1994—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向: 渔业资源。* 通信作者, 研究员, 博士, 硕士生导师, 从事海洋生态学和分子生物学研究。

收稿日期 2021-02-07; **修回日期** 2021-03-10

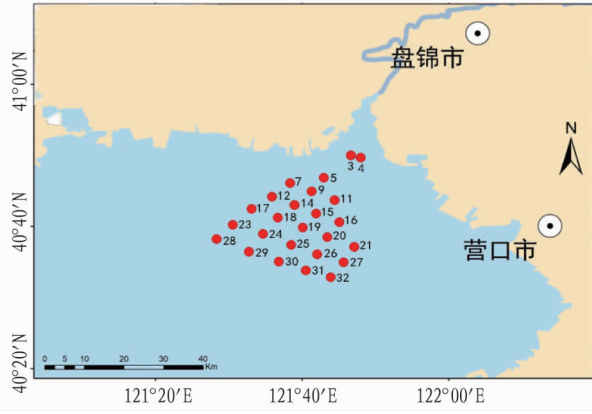


图1 辽河口25个采样点分布

Fig.1 Distribution of 25 sampling points in Liaohe Estuary

水环境因子包括温度(Temp)、盐度(Sal)、pH、溶解氧(DO)、硝酸盐(NO_3)、磷酸盐(PO_4)、总磷(TP)、总氮(TN)、硅酸盐(SiO_3)、总有机碳(TOC)、石油类(oil)、石油烃(PHc)、悬浮物(SS)。

1.2 物种丰度和个体总数 大型底栖动物物种名录通过世界海洋物种登记库(WoRMS)网站查询并校对。每个站位的物种丰度(S)和个体总数(N)由软件PRIMER 6具体计算完成,所得数据共包含春季数据23个、夏季数据21个、秋季数据23个。

1.3 生物指数计算方法及评价标准

1.3.1 AMBI指数和BENTIX指数。根据底栖生物对增加环境压力的敏感性,将底栖生物分成5个生态组^[3]。GI:对有机物富集非常敏感,存在无污染条件下的物种;GII:对有机物富集不敏感的物种(物种密度低且随时间变化不显著);GIII:能耐受过量有机物富集的物种;GIV:第二级机会种(轻度失衡到严重失衡状态过渡);GV:第一级机会种(严重失衡状态)^[6,18]。根据公式计算AMBI和BENTIX指数,具体计算公式如下:

$$\text{AMBI} = [(0 \times \% \text{GI}) + (1.5 \times \% \text{GII}) + (3 \times \% \text{GIII}) + (4.5 \times \% \text{GIV}) + (6 \times \% \text{GV})] / 100 \quad (1)$$

$$\text{BENTIX} = (6 \times \% \text{GS} + 2 \times \% \text{GT}) / 100 \quad (2)$$

$$\text{GS} = \text{GI} + \text{GII} \quad (3)$$

$$\text{GT} = \text{GIII} + \text{GIV} + \text{GV} \quad (4)$$

AMBI指数具体计算过程由网站(<http://www.azti.es>)获得的软件AMBI V5.0完成,对于物种名录中不包含的物种,采用清单中收录的同类群物种代替^[19]。BENTIX指数具体计算过程由BENTIX Add-In V1.0完成^[20]。

1.3.2 Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数。Shannon-Wiener多样性指数(H')以信息理论为基础,假设个体是从一个“无限大”的群落中随机抽样,所得的物种都在样本中^[14]。其计算公式如下:

$$H' = -\sum P_i \log_2 P_i \quad (5)$$

式中, P_i 是物种*i*在样本中个体比例,在样本中 P_i 的真实值未知,可通过 N_i/N 的比值来估计,其中 N_i 为物种*i*的个体数量, N 为个体总数^[14]。

Margalef丰富度指数(D)通过将具体物种丰度与个体总数相关来量化多样性^[16]。其计算公式如下:

$$D = (S-1) / \log_e N \quad (6)$$

式中, S 是物种丰度, N 是个体总数。

H' 指数和 D 指数具体计算过程由软件PRIMER 6完成。

1.3.3 M-AMBI指数。M-AMBI是包含AMBI指数、 H' 指数和物种丰度的综合指数。应用M-AMBI指数时首先需要确定AMBI、 H' 以及物种丰度的参考基准值。M-AMBI指数具体计算过程由软件AMBI V5.0完成。

1.3.4 评价标准的确定。M-AMBI参考基准值的确定:根据已知数据建立数据序列,采用SPSS 17.0进行分析,去除数据序列的异常值。第1种:AMBI取数据序列的第10%位值、 H' 和物种丰度取数据序列的第90%位值为等级优参考基准值^[21],AMBI、 H' 和物种丰度等级优参考基准值分别为0.53、3.74、18,等级劣参考基准值分别为6、0、0。第2种:AMBI取数据序列最小值的0.85倍、 H' 和物种丰度取数据序列最大值的1.15倍为等级优参考基准值^[22],AMBI、 H' 和物种丰度等级优参考基准值分别为0.27、4.80、31,等级劣参考基准值分别为6、0、0。第3种:AMBI取数据序列最小值、 H' 和物种丰度取数据序列最大值为等级优参考基准值^[23],AMBI、 H' 和物种丰度等级优参考基准值分别为0.32、4.17、27,等级劣参考基准值分别为6、0、0。根据以上3种参考基准值使用软件AMBI V5.0计算所得,M-AMBI优-良-中-差-劣之间的边界值均为0.77-0.53-0.39-0.20。

水框架指令(WFD)建议生态环境质量状况评价划分5个等级,因此生物指数将生态环境状况分为5个等级:优-未被污染、良-轻度污染、中-中度污染、差-高度污染、劣-严重污染(表1)。

2 结果与分析

2.1 大型底栖动物组成和特征 在辽河口3个航次中共采集大型底栖动物75种,隶属6门9纲25目54科68属,包含环节动物30种、节肢动物17种、软体动物15种、棘皮动物7种、脊索动物4种、刺胞动物2种。春季采集大型底栖动物37种、夏季44种、秋季42种。对3个季节的物种丰度和个体总数进行差异性分析,得出物种丰度和个体总数在季节间具有显著差异性(表2)。

根据AMBI V5.0软件提供的物种名录,将物种进行生态分组并计算各生态组所占百分比。春季GI~GV生态组百分比均值依次为42.75%、29.11%、22.23%、0.98%、4.93%,以敏感物种为主;夏季GI~GV生态组百分比均值依次为26.62%、13.12%、18.34%、12.29%、29.63%,以第一级机会物种和敏感物种为主;秋季GI~GV生态组百分比均值依次为32.08%、21.57%、18.75%、1.02%、26.58%,以敏感物种和第一级机会物种为主。3个季节GI~GV生态组百分比均值依次为34.04%、21.51%、19.81%、4.54%、20.10%,以敏感物种为主。

2.2 生物指数 经计算(表3),3个季节AMBI指数均值分别为春季1.45、夏季3.08、秋季2.57,标准差分别为春季0.952、夏季1.381、秋季1.864,且在3个季节间具有显著差异

性。3 个季节 BENTIX 指数均值分别为春季 4.87、夏季 3.59、秋季 4.06,标准差分别为春季 0.981、夏季 0.978、秋季 1.419,且在 3 个季节间具有显著差异性(表 3)。3 个季节 H' 指数均值分别为春季 2.45、夏季 2.70、秋季 2.34,标准差分别为春季 0.883、夏季 1.340、秋季 0.957,且在 3 个季节间具有显著相关

性,春夏季间 $\gamma_p = 0.645^{**}$ 、夏秋季间 $\gamma_p = 0.517^*$ 、春秋季节间 $\gamma_p = 0.440^*$ 。3 个季节 D 指数均值分别为春季 1.57、夏季 2.14、秋季 1.49,标准差分别为春季 0.742、夏季 1.098、秋季 0.881,且在 3 个季节间具有显著相关性,春夏季间 $\gamma_p = 0.526^*$,夏秋季间和春秋季节间不具有显著相关性(表 4)。

表 1 生物指数评价标准值

Table 1 Evaluation standard value of biological index

生物指数 Biological index	优 Optimal	良 Good	中 Medium	差 Poor	劣 Inferior	参考文献 References
AMBI 指数 AMBI index	0~1.2	>1.2~3.3	>3.3~4.3	>4.3~5.5	>5.5	[24]
BENTIX 指数(泥质) BENTIX index (shale)	>4.0~6.0	>3.0~4.0	>2.5~3.0	2.0~2.5	0	[25]
BENTIX 指数(砂质) BENTIX index (sand)	>4.5~6.0	>3.5~4.5	≥2.5~3.5	2.0~2.5	0	[25]
Shannon-Wiener 指数 Shannon - Wiener index	≥4	3~<4	2~<3	1~<2	<1	[26]
Margalef 指数 Margalef index	>4	>4	2.5~4.0	<2.5	<2.5	[26]
M-AMBI 指数	>0.77	>0.53~0.77	>0.39~0.53	>0.20~0.39	≤0.20	—

M-AMBI 指数经 3 种参考基准值计算后得出 3 组不同数值,数值均值:第 2 种参考基准值所得数值<第 3 种参考基准值所得数值<第 1 种参考基准值所得数值,且 3 组数值间具有极显著的相关性($\gamma_p = 1^{**}$),以下分析使用第 3 种参考基准值计算所得数值。M-AMBI 指数均值分别为春季 0.523、夏季 0.545、秋季 0.461,标准差分别为春季 0.145、夏季 0.241、秋季 0.207,且在 3 个季节间具有显著相关性,春夏季间 $\gamma_p = 0.656^{**}$,夏秋季间 $\gamma_p = 0.541^*$,春秋季节间 $\gamma_p = 0.546^*$ (表 4)。

表 2 3 个季节间差异性分析(Kruskal-Wallis 检验)

Table 2 Analysis of differences between the three seasons (Kruskal-Wallis test)

名称 Name	卡方值(χ^2) Chi-square value	P 值 P value
S	9.454	0.009
N	14.184	0.001
AMBI	16.046	0.000
BENTIX	13.149	0.001
H'	3.681	0.159
D	5.338	0.069
M-AMBI	2.069	0.355

表 3 生物指数和评价等级

Table 3 Biological index value and evaluation level

站位 Station	AMBI	BENTIX	H'	D	M-AMBI	AMB 等级 AMB level	BENTIX 等级 BENTIX level	H' 等级	D 等级	M-AMBI 等级 M-AMBI level
spr3	3.750	3.000	1.959	0.733	0.324 8	3	3	4	5	4
spr5	3.500	3.330	1.585	0.739	0.288 8	3	2	4	5	4
spr9	2.538	3.232	0.377	0.968	0.299 5	2	2	5	5	4
spr11	0.429	6.000	1.149	0.563	0.384 4	1	1	4	5	4
spr12	2.500	4.000	2.355	1.221	0.442 3	2	2	3	5	3
spr14	1.500	6.000	1.500	0.668	0.368 2	2	1	4	5	4
spr15	1.125	5.000	3.000	1.898	0.586 8	1	1	2	4	2
spr16	2.000	4.662	2.948	1.839	0.544 3	2	1	3	4	2
spr17	1.500	6.000	1.000	0.434	0.310 5	2	1	4	5	4
spr18	2.000	3.332	1.961	1.022	0.415 5	2	2	4	5	3
spr19	0.955	4.908	3.096	1.996	0.617 0	1	1	2	4	2
spr20	0.500	6.000	3.273	2.316	0.681 2	1	1	2	4	2
spr21	0.326	5.652	2.632	1.475	0.589 7	1	1	3	5	2
spr23	1.250	5.332	3.000	1.898	0.581 3	2	1	2	4	2
spr24	1.125	5.000	2.922	2.171	0.623 9	1	1	3	4	2
spr25	1.263	5.156	3.787	3.074	0.750 8	2	1	2	3	2
spr26	0.732	5.126	3.234	2.431	0.711 6	1	1	2	4	2
spr27	0.522	5.480	2.980	1.897	0.640 4	1	1	3	4	2
spr28	1.500	5.008	2.906	2.054	0.591 6	2	1	3	4	2
spr29	1.563	4.500	3.723	2.900	0.732 3	2	1	2	3	2
spr30	1.962	3.848	2.354	1.437	0.480 2	2	2	3	5	3
spr31	0.500	5.556	2.059	1.051	0.488 9	1	1	3	5	3
spr32	0.321	6.000	2.657	1.390	0.577 5	1	1	3	5	2
sum7	1.500	6.000	0.000	0.000	0.209 7	2	1	5	5	4

续表 3

站位 Station	AMBI	BENTIX	H'	D	M-AMBI	AMB 等级 AMB level	BENTIX 等级 BENTIX level	H' 等级	D 等级	M-AMBI 等级 M-AMBI level
sum9	5.936	2.028	0.469	0.955	0.160 1	5	4	5	5	5
sum11	5.911	2.042	0.222	0.977	0.154 4	5	4	5	5	5
sum12	5.888	2.070	0.256	0.666	0.114 5	5	4	5	5	5
sum14	3.420	3.440	2.443	1.657	0.453 8	3	2	3	4	3
sum15	1.813	3.836	2.890	1.671	0.562 1	2	2	3	4	2
sum16	3.130	3.650	3.298	2.381	0.613 1	2	2	2	4	2
sum17	2.900	3.068	2.895	2.026	0.529 9	2	2	3	4	3
sum18	3.261	3.562	3.028	1.897	0.525 7	2	2	2	4	3
sum19	3.000	3.094	3.236	2.118	0.555 0	2	2	2	4	2
sum21	3.397	3.146	3.405	2.798	0.669 2	3	3	2	3	2
sum23	1.816	4.214	3.604	2.655	0.711 1	2	1	2	3	2
sum24	2.600	3.600	3.240	2.085	0.572 7	2	2	2	4	2
sum25	2.302	4.422	3.520	3.165	0.726 6	2	1	2	3	2
sum26	1.200	5.200	3.646	2.823	0.726 8	1	1	2	3	2
sum27	2.875	3.330	2.585	1.465	0.460 5	2	3	3	5	3
sum28	2.009	4.428	3.944	3.549	0.819 7	2	1	2	3	1
sum29	2.653	3.780	4.168	4.126	0.898 7	2	2	1	2	1
sum30	4.200	2.800	1.922	0.932	0.302 1	3	3	4	5	4
sum31	2.750	3.556	3.929	3.601	0.815 4	2	2	2	3	1
sum32	2.079	4.124	3.986	3.492	0.864 1	2	1	2	3	1
aut4	1.500	6.000	0.000	0.000	0.209 7	2	1	5	5	4
aut5	3.750	4.000	2.000	0.813	0.328 3	3	2	4	5	4
aut7	5.167	2.444	1.357	0.767	0.211 5	4	4	4	5	4
aut9	5.357	2.572	1.880	1.051	0.262 9	4	3	4	5	4
aut11	6.000	0.000	1.000	0.334	0.072 0	5	5	4	5	5
aut12	2.625	4.000	2.000	1.001	0.377 1	2	2	3	5	4
aut14	1.313	5.000	2.750	1.627	0.542 5	2	1	3	4	2
aut15	5.400	2.000	1.371	0.621	0.188 0	4	4	4	5	5
aut16	3.692	3.232	2.346	1.198	0.389 9	3	2	3	5	4
aut17	4.875	3.000	0.811	0.334	0.147 9	4	3	5	5	5
aut18	2.813	4.000	3.000	1.898	0.513 6	2	2	2	4	3
aut19	0.818	5.272	2.550	1.248	0.532 1	1	1	3	5	2
aut20	2.250	4.000	3.096	1.996	0.560 9	2	2	2	4	2
aut21	1.714	4.860	3.374	2.548	0.651 9	2	1	2	3	2
aut24	1.385	4.466	2.753	1.648	0.554 2	2	2	3	4	2
aut25	0.375	5.754	2.906	1.826	0.625 8	1	1	3	4	2
aut26	2.100	3.700	2.616	1.887	0.555 2	2	2	3	4	2
aut27	1.469	4.532	3.809	3.454	0.816 8	2	1	2	3	1
aut28	1.350	4.300	2.113	1.132	0.486 0	2	2	3	5	3
aut29	1.938	3.664	2.225	1.462	0.484 7	2	2	3	5	3
aut30	0.656	5.754	2.781	1.826	0.602 8	1	1	3	4	2
aut31	1.050	5.200	3.284	2.171	0.658 3	1	1	2	4	2
aut32	0.532	5.612	3.757	3.350	0.823 8	1	1	2	3	1

表 4 H' 、 D 、M-AMBI 指数 Pearson 相关性分析Table 4 Pearson correlation analysis of H' , D , M-AMBI index

季节 Seasons	H'	D	M-AMBI
春夏季 Spring and summer	0.645 **	0.526 *	0.656 **
夏秋季 Summer and autumn	0.517 *	0.383	0.541 *
春秋季 Spring and autumn	0.440 *	0.279	0.546 *

注: ** 表示 0.01 水平显著相关; * 表示 0.05 水平显著相关

Note: ** indicates a significant correlation at the level of 0.01; * indicates a significant correlation at the level of 0.05

2.3 生物指数评价等级 根据生物指数评价标准值(表 1), 将生物指数计算所得数值进行依次评级, 分为优(1)、良(2)、

中(3)、差(4)、劣(5)5个等级, 1~5为评价等级代替值, 数值越大所代表的污染程度越高。绘制生物指数评价等级随时空变化的波动图, 其中春季站位依次为 1~23、夏季站位依次为 24~44、秋季站位依次为 45~67(图 2)。

根据生物指数评价等级百分比得出, AMBI 和 BENTIX 指数评价优良等级总占比分别为 78%、82%, 评价等级梯度不明显; M-AMBI 和 H' 指数评价优良等级总占比分别为 54%、38%, 评价等级梯度相对明显; D 指数评价优良等级总占比为 2%, 评价等级梯度不明显(图 3)。AMBI 和 BENTIX 指数在 3 个季节评价等级均值变化趋势相同, 春季<秋季<夏

季;M-AMBI 和 H' 指数在 3 个季节评价等级均值变化趋势相同,夏季<春季<秋季; D 指数在 3 个季节评价等级均值夏季<秋季<春季(图 4)。AMBI 和 BENTIX 指数评价等级,其中有 39 个站位评价等级相同,28 个站位相差 1 个评价等级;AMBI 和 M-AMBI 指数评价等级,其中有 24 个站位评价等级相同,35 个站位相差 1 个评价等级,7 个站位相差 2 个评价等级,1 个站位相差 3 个评价等级;M-AMBI 和 H' 指数评价等级,其中有 39 个站位评价等级相同,28 个站位相差 1 个评价等级; H' 和 D 指数评价等级,其中有 7 个站位评价等级相同,37 个站位相差 1 个评价等级,23 个站位相差 2 个评价等级(图 5)。

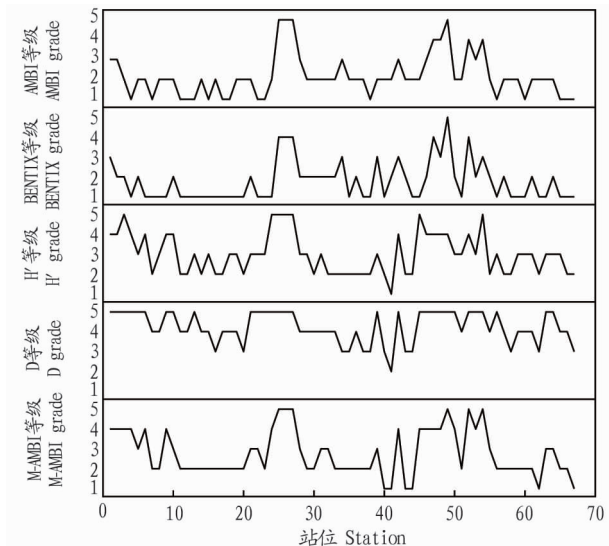


图 2 生物指数评价等级时空波动

Fig.2 Spatio-temporal fluctuation of biological index evaluation grade

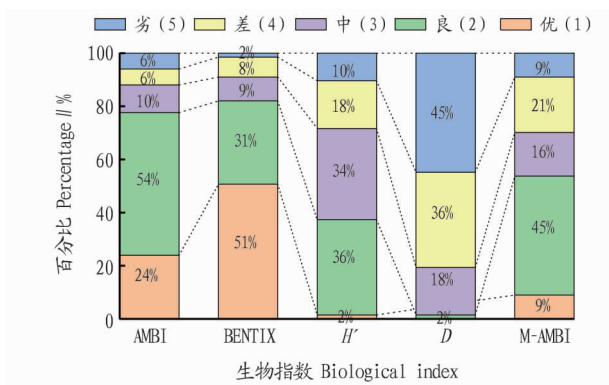


图 3 生物指数评价等级百分比

Fig.3 Percentage of biological index evaluation grade

将生物指数评价等级进行相关性分析和距离程度分析,结果发现(表 5~6),AMBI 和 BENTIX 指数评价等级具有极显著的相关性($\gamma_p = 0.872^{**}$)且评价等级间距离程度为 5.292; AMBI 和 M-AMBI 指数评价等级具有极显著的相关性($\gamma_p = 0.705^{**}$)且评价等级间距离程度为 8.485;M-AMBI 和 H' 指数评价等级具有极显著的相关性($\gamma_p = 0.852^{**}$)且评价等级间距离程度为 5.292; H' 和 D 指数评价等级具有极显著的相关性($\gamma_p = 0.784^{**}$)且评价等级间距离程度为 11.358。

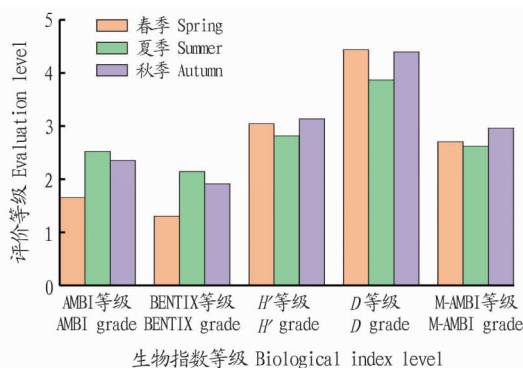


图 4 生物指数在 3 个季节评价等级均值

Fig.4 The average value of biological index in three seasons

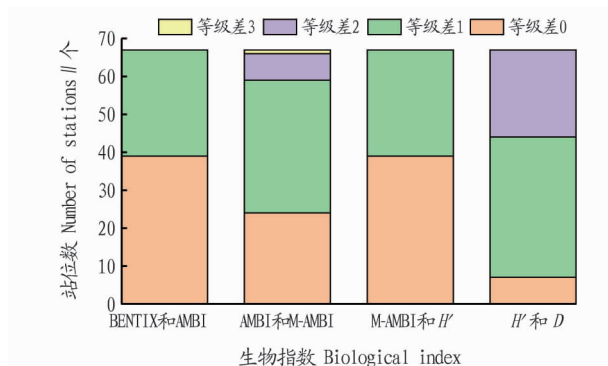


图 5 生物指数评价等级差值站位数

Fig.5 Number of stations with biological index evaluation grade difference

综上对生物指数评价等级的分析以及评价等级多维度分析(图 6),可以将 5 种生物指数评价等级分为 3 类。AMBI 和 BENTIX 指数评价等级基本一致且评价的污染程度偏低, M-AMBI 和 H' 指数评价等级基本一致且评价的污染程度中等, D 指数评价的污染程度偏高。

2.4 环境因子和生物指数相关性分析 AMBI 指数极显著相关的环境因子为 Temp、Sal、DO、TOC,显著相关的环境因子为 pH、 NO_3 、TP;BENTIX 指数极显著相关的环境因子为 Temp、

表 5 生物指数评价等级 Pearson 相关性分析

Table 5 Pearson correlation analysis of biological index evaluation grade

生物指数	BENTIX	H'	D	M-AMBI
AMBI	0.872 ^{**}	0.567 ^{**}	0.331 ^{**}	0.705 ^{**}
BENTIX		0.479 ^{**}	0.391 ^{**}	0.663 ^{**}
H'			0.784 ^{**}	0.852 ^{**}
D				0.784 ^{**}

表 6 生物指数评价等级

Table 6 Biological index evaluation grade

生物指数	BENTIX	H'	D	M-AMBI
AMBI	5.292	10.392	19.157	8.485
BENTIX		13.038	21.749	10.863
H'			11.358	5.292
D				13.454

注:距离分析量度标准为区间 Euclidean 距离

Note:The distance analysis measurement standard is the interval Euclidean distance

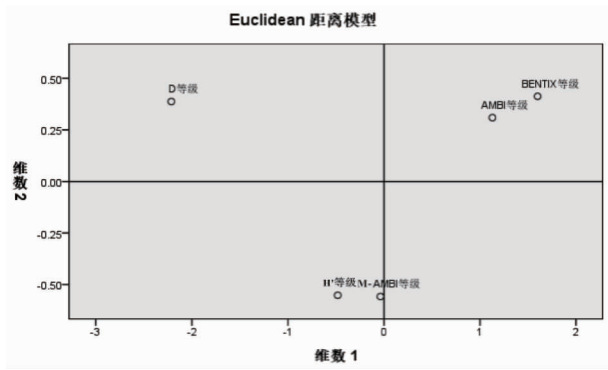
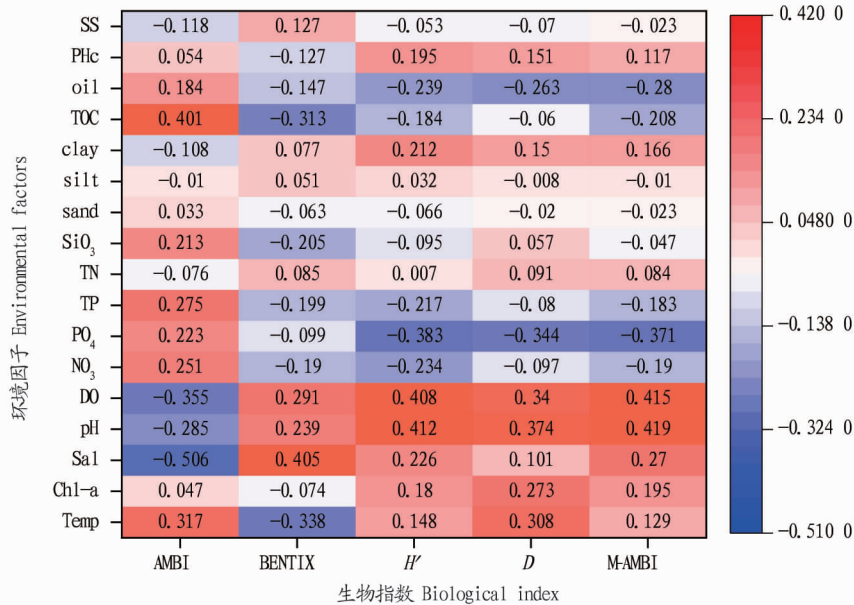


图 6 生物指数评价等级多维度分析 (ALSCAL)

Fig.6 Multi-dimensional analysis of biological index evaluation grade (ALSCAL)

Sal、TOC,显著相关的环境因子为 DO;H'指数极显著相关的环境因子为 pH、DO、PO₄;D 指数极显著相关的环境因子为 pH、DO、PO₄,显著相关的环境因子为 Temp、Chl-a、oil;M-AMBI 指数极显著相关的环境因子为 pH、DO、PO₄,显著相关的环境因子为 Sal、oil(图 7)。综上表明 AMBI 和 BENTIX 指数具有相关性的环境因子较为相似,H'、D、M-AMBI 指数具有相关性的环境因子较为相似。

从图 8 可以看出,AMBI 与 BENTIX 指数在 3 个季节具有显著的差异性,主要由于具有极显著相关的环境因子(Temp、Sal、TOC)在 3 个季节间变化较大,影响底栖动物生态分组;H'、D、M-AMBI 指数在 3 个季节间不具有显著的差异性,主要由于具有极显著相关的环境因子(pH、DO)在 3 个季节间相对变化较小(PO₄ 在 3 个季节间变化较大,但未对 3



注: | γ_p | > 0.31 为 0.01 水平显著相关; | γ_p | > 0.25 为 0.05 水平显著相关

Note: | γ_p | > 0.31 is a significant correlation at 0.01 level | γ_p | > 0.25 is a significant correlation at 0.05 level

图 7 环境因子和生物指数的 Pearson 相关性热图

Fig.7 Pearson correlation heat map of environmental factors and biological index

种指数造成明显影响)。

3 讨论与结论

海洋生态系统本身的复杂性以及受人为与自然环境压力的影响,不同的生物指数评价同一区域通常会给出不同的评价结果^[27],使得对海洋生态环境评价的准确性在很大程度上取决于生物指数的选择^[28]。

研究表明 AMBI 指数适用于有机物和营养物富集的区域^[27],BENTIX 指数起初建立于地中海贫营养区域^[29],主要反映有机物富集对底栖生物生态分组的影响。该研究也表明 AMBI 和 BETIX 指数可以反映有机物富集对底栖生物生态分组的影响。研究表明 AMBI 指数更适用于评价非季风气候下河口的环境质量状况^[30],而辽河口属于温带大陆性季风气候,温度和降水量在 3 个季节间存在较大的变化(降水量影响盐度)。该研究也表明温度和盐度的变化对底栖生物生态分组具有一定影响。AMBI 和 BENTIX 指数不能有效

地区分为环境压力和自然环境压力,且辽河口底栖动物组成以敏感物种为主,导致 AMBI 和 BENTIX 指数评价污染程度偏低。

研究者创建 D 指数时,未建立准确的评价标准值。该研究使用的评价标准值是针对具有强烈季节性变化和富营养化问题的葡萄牙河口所建立^[26]。辽河口和葡萄牙河口生态环境存在一定的差异,因此评价标准值的合理性需进一步确定。

M-AMBI 综合指数已被应用于不同的水体类型,大部分的评价结果表明 M-AMBI 指数比单因子指数更能准确地反映实际环境状况^[30]。这与该研究得出的结论一致,但是应用 M-AMBI 指数首先要确立参考基准值,准确建立参考基准值的方法是今后需要深入研究的方向之一。

综上,AMBI 和 BENTIX 指数的评价结果基本一致,但是不能有效地区分为环境压力和自然环境压力且评价的污染程度偏低,因此其评价结果不完全合理。D 指数评价结果

偏差较大,主要由于在辽河口使用上述评价标准值存在一定的不合理性。M-AMBI 和 H' 指数评价结果基本一致,且评价

结果更为合理、更能有效地反映人为环境压力对辽河口生态环境质量状况的影响。

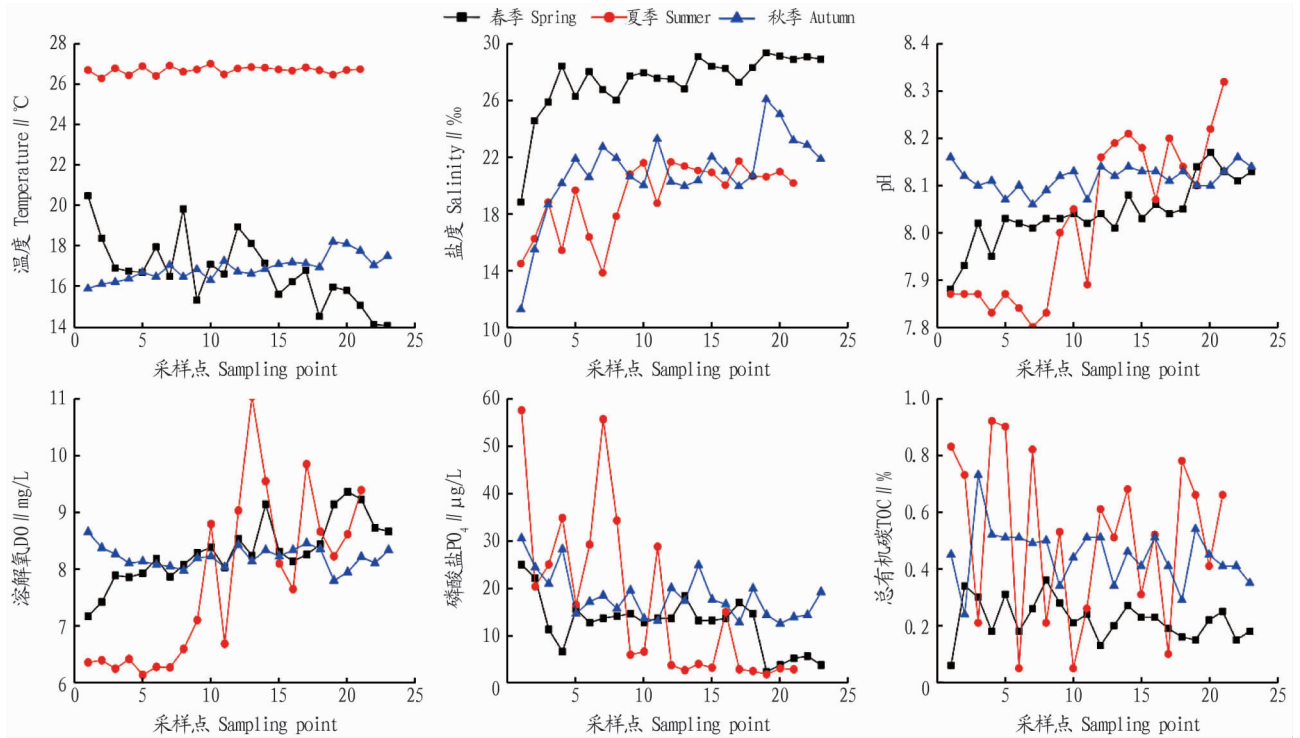


图8 生物指数极显著相关的环境因子时空波动

Fig.8 Spatio-temporal fluctuations of environmental factors with extremely significant correlations in biological index

参考文献

- [1] 杨丽娜. 大辽河口生态系统健康评价指标体系与技术方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [2] 林和山, 俞炜炜, 刘坤, 等. 基于 AMBI 和 M-AMBI 法的底栖生态环境质量评价: 以厦门五缘湾海域为例[J]. 海洋学报, 2015, 37(8): 76-87.
- [3] SIMBOURA N, ARGYROU M. An insight into the performance of benthic classification indices tested in Eastern Mediterranean coastal waters[J]. Marine pollution bulletin, 2010, 60(5): 701-709.
- [4] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 等. 不同底栖生物指数在福建省近岸海域的适用性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 2051-2058.
- [5] 耿世伟, 渠晓东, 张远, 等. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2281-2287.
- [6] 吴海燕, 陈克亮, 张平, 等. 基于不同生物指数的罗源湾生态环境质量状况评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 825-831.
- [7] 杨颖, 刘鹏霞, 周红宏, 等. 近 15 年长江口海域海洋生物变化趋势及健康状况评价[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8892-8904.
- [8] 于海燕, 李新正, 李宝泉, 等. 胶州湾大型底栖动物生物多样性现状[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 416-422.
- [9] 黄睿婧. 海洋底栖生物指数在不同生境的应用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2011.
- [10] 蔡文倩, 周娟, 林岩璇, 等. 基于底栖生物指数的辽东湾生态质量状况评价[J]. 海洋科学, 2016, 40(10): 105-112.
- [11] BORJA A, FRANCO J, PÉREZ V. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments[J]. Marine pollution bulletin, 2000, 40(12): 1100-1114.
- [12] 彭广海, 付婧, 马增岭, 等. 基于 3 种生物指数的三沙湾养殖活动底栖环境效应研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(4): 106-118.
- [13] SIMBOURA N, ZENETOS A. Benthic indicators to use in Ecological Quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new Biotic Index[J]. Mediterranean marine science, 2002, 3(2): 77-111.
- [14] SHANNON C E, WIENER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963.
- [15] 蔡立哲, 马丽, 高阳, 等. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2002, 41(5): 641-646.
- [16] 朱晓芬, 陈彬, 俞炜炜, 等. 厦门湾大型底栖动物分类学多样性指数及分类充分性[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5554-5565.
- [17] MUXIKA I, BORJA A, BALD J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive[J]. Marine pollution bulletin, 2007, 55: 16-29.
- [18] 蔡文倩, 刘录三, 孟伟, 等. AMBI 方法评价环渤海潮间带底栖生态质量的适用性[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 992-1000.
- [19] PAGANELLI D, FORNI G, MARCHINI A, et al. Critical appraisal on the identification of Reference Conditions for the evaluation of ecological quality status along the Emilia-Romagna coast (Italy) using M-AMBI[J]. Marine pollution bulletin, 2011, 62(8): 1725-1735.
- [20] MULIK J, SUKUMARAN S, SRINIVAS T, et al. Comparative efficacy of benthic biotic indices in assessing the Ecological Quality Status (EcoQS) of the stressed Ullas estuary, India[J]. Marine pollution bulletin, 2017, 120(1/2): 192-202.
- [21] LIU L S, LI B Q, LIN K X, et al. Assessing benthic ecological status in coastal area near Changjiang River estuary using AMBI and M-AMBI[J]. Chinese journal of oceanology and limnology, 2014, 32(2): 290-305.
- [22] 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 等. 长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI 和 M-AMBI 法[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1725-1734.
- [23] DAUVIN J C, RUELLET T. Polychaete/amphipod ratio revisited[J]. Marine pollution bulletin, 2007, 55: 215-224.
- [24] BLANCHET H, LAVESQUE N, RUELLET T, et al. Use of Biotic Indices in semi-enclosed coastal ecosystems and transitional waters habitats—Implications for the implementation of the European Water Framework Directive[J]. Ecological indicators, 2008, 8(4): 360-372.
- [25] CHAINHO P, COSTA J L, CHAVES M L, et al. Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese estuary[J]. Marine pollution bulletin, 2007, 54(10): 1586-1597.
- [26] MEDEIROS J P, CHAVES M L, SILVA G, et al. Benthic condition in low salinity areas of the Mira estuary (Portugal): Lessons learnt from freshwater and marine assessment tools[J]. Ecological indicators, 2012, 19: 79-88.
- [27] 罗先香, 杨建强. 海洋生态系统健康评价的底栖生物指数法研究进展[J]. 海洋通报, 2009, 28(3): 106-112.

2.9 基因蛋白互作网络预测分析 为进一步了解上述基因可能的互作蛋白,该部分参考 STRING 在线数据库,对这些基因可能的互作网络进行了预测。结果表明,除 OsILI2 与 OsILI3 外,其余蛋白质均有预测的蛋白质网络互作图。这表明大部分基因可以通过蛋白质的相互作用参与生长过程的调控(图 7)。

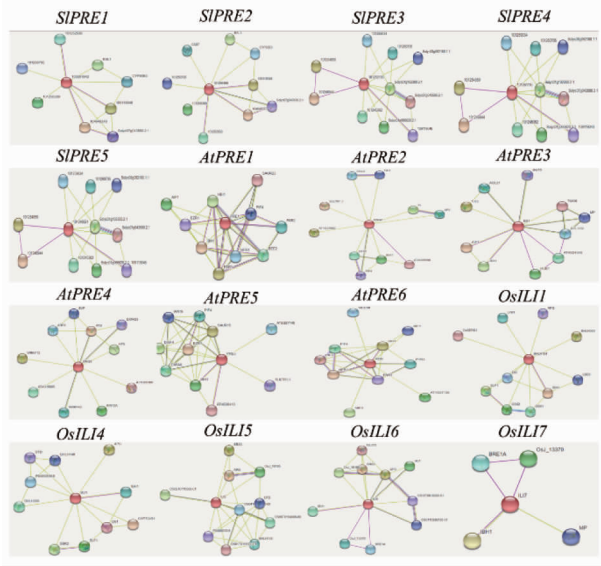


图 7 番茄、拟南芥 PREs、水稻 ILIs 蛋白互作网络预测

Fig.7 Protein interaction network prediction of tomato, *Arabidopsis* PREs and rice ILIs

3 讨论与结论

截至目前,已有功能研究报道的 PREs 以及水稻 ILIs 均属于非典型的 bHLH 转录因子^[8,14-15]。这些基因通过赤霉素、油菜素内酯^[16]以及生长素参与植物营养生长与生殖生长^[17]的调控。目前,拟南芥 *AtPRE1~AtPRE6*、*SIPRE1~SIPRE2* 以及 *OsILI1*、*OsILI4* 均有功能研究报道,而其余基因暂无功能研究。该研究通过生物信息学的方法,结合已有的功能研究报道,对番茄、拟南芥 PREs 以及水稻 ILIs 基因进行生物信息学分析,为这些基因功能的进一步研究奠定理论基础。

该研究对 3 个物种共 18 个蛋白质的理化性质进行了初步分析,发现这些蛋白质均属于疏水性蛋白质,且稳定性较差;此外, α 螺旋和无规则卷曲是这些蛋白质主要的二级结构组分,仅有较少的 β 转角与延伸链存在其中,从三维结构模拟可以更直观地发现这一点。蛋白质的三维空间模拟结果表明,这些蛋白质可以通过二聚化的形式参与调控植株生长。与其他蛋白质的互作网络预测表明,这些蛋白通过与其他蛋白质的相互作用发挥调控作用。蛋白质保守基序分析

与蛋白质多序列比对及进化关系分析表明这些蛋白质在调控植物生长发育方面存在功能相似性。

通过对 3 个物种共 18 个基因进行生物信息学分析,从染色体定位、基因结构、蛋白质理化性质以及二级、三级结构分析等方面做出分析预测,为进一步的功能研究提供理论基础与数据支撑。

参考文献

- [1] 赵凌侠,李景富.番茄起源、传播及分类的回顾[J].作物品种资源,1999(3):29-31.
- [2] QUINET M, ANGOSTO T, YUSTE-LISBONA F J, et al. Tomato fruit development and metabolism[J]. *Frontiers in plant science*, 2019, 10:1-23.
- [3] CUI J, JIANG N, ZHOU X X, et al. Tomato MYB49 enhances resistance to *Phytophthora infestans* and tolerance to water deficit and salt stress[J]. *Planta*, 2018, 248(6):1487-1503.
- [4] MEINKE D W, CHERRY J M, DEAN C, et al. *Arabidopsis thaliana*: A model plant for genome analysis[J]. *Science*, 1998, 282(5389):662-682.
- [5] LI X X, DUAN X P, JIANG H X, et al. Genome-wide analysis of basic/helix-loop-helix transcription factor family in rice and *Arabidopsis*[J]. *Plant physiology*, 2006, 141(4):1167-1184.
- [6] LEE S, LEE S, YANG K Y, et al. Overexpression of PRE1 and its homologous genes activates gibberellin-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant & cell physiology*, 2006, 47(5):591-600.
- [7] BAI M Y, SHANG J X, OH E, et al. Brassinosteroid, gibberellin and phytochrome impinge on a common transcription module in *Arabidopsis*[J]. *Nature cell biology*, 2012, 14(8):810-817.
- [8] CASTELAIN M, LE HIR R, BELLINI C. The non-DNA-binding bHLH transcription factor PRE3/bHLH135/ATBS1/TMO7 is involved in the regulation of light signaling pathway in *Arabidopsis*[J]. *Physiologia plantarum*, 2012, 145(3):450-460.
- [9] ZHANG L Y, BAI M Y, WU J, et al. Antagonistic HLH/bHLH transcription factors mediate brassinosteroid regulation of cell elongation and plant development in rice and *Arabidopsis*[J]. *Plant cell*, 2009, 21(12):3767-3780.
- [10] HYUN Y, LEE I KIDARI, encoding a non-DNA Binding bHLH protein, represses light signal transduction in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant molecular biology*, 2006, 61(1/2):283-296.
- [11] ZHU Z G, CHEN G P, GUO X H, et al. Overexpression of SIPRE2, an atypical bHLH transcription factor, affects plant morphology and fruit pigment accumulation in tomato[J]. *Scientific reports*, 2017, 7:1-11.
- [12] CHEN K Y, CONG B, WING R, et al. Changes in regulation of a transcription factor lead to autogamy in cultivated tomatoes[J]. *Science*, 2007, 318(5850):643-645.
- [13] ZHU Z G, LIANG H L, CHEN G P, et al. The bHLH transcription factor SIPRE2 regulates tomato fruit development and modulates plant response to gibberellin[J]. *Plant cell reports*, 2019, 38(9):1053-1064.
- [14] TANAKA A, NAKAGAWA H, TOMITA C, et al. BRASSINOSTEROID UPREGULATED1, encoding a helix-loop-helix protein, is a novel gene involved in brassinosteroid signaling and controls bending of the lamina joint in rice[J]. *Plant physiology*, 2009, 151(2):669-680.
- [15] IKEDA M, FUJIWARA S, MITSUDA N, et al. A triantagonistic basic helix-loop-helix system regulates cell elongation in *Arabidopsis*[J]. *Plant cell*, 2012, 24(11):4483-4497.
- [16] WANG H, ZHU Y Y, FUJIOKA S, et al. Regulation of *Arabidopsis* brassinosteroid signaling by atypical basic helix-loop-helix proteins[J]. *The plant cell* 2009, 21(12):3781-3791.
- [17] MARA C D, HUANG T B, IRISH V F. The *Arabidopsis* floral homeotic proteins APETALA3 and PISTILLATA negatively regulate the BANQUO genes implicated in light signaling[J]. *Plant cell*, 2010, 22(3):690-702.

(上接第 93 页)

- [28] MUNARI C, MISTRI M. Towards the application of the Water Framework Directive in Italy: Assessing the potential of benthic tools in Adriatic coastal transitional ecosystems[J]. *Marine pollution bulletin*, 2010, 60(7):1040-1050.
- [29] MULIK J, SUKUMARAN S, DIAS H Q. Is the benthic index AMBI imper-

vious to seasonality and data transformations while evaluating the ecological status of an anthropized monsoonal estuary? [J]. *Ocean and coastal management*, 2020, 186:1-12.

- [30] BORJA A, TUNBERG B G. Assessing benthic health in stressed subtropical estuaries, eastern Florida, USA using AMBI and M-AMBI[J]. *Ecological indicators*, 2011, 11(2):295-303.