

舟山电厂附近海域夏季浮游动物群落结构及时空变化

陆廷¹, 程爱勇¹, 林波¹, 陈德慧², 宋伟华^{3*} (1. 国能浙江舟山发电有限责任公司, 浙江舟山 316000; 2. 杭州海蛎生态科技有限公司, 浙江杭州 310000; 3. 杭州希澳环境科技有限公司, 浙江杭州 310000)

摘要 根据2016—2019年夏季舟山电厂附近海域浮游动物群落的调查成果, 研究浮游动物的种类组成、分布特征、年际变化和空间变化等, 进一步探究群落受舟山电厂的影响情况。结果表明, 历年夏季浮游动物种类数、密度、生物量、Shannon-weaver多样性指数等均在一定范围波动, 年际变化相对较小, 而空间变化较为显著, 表现为排水口海域浮游动物的种类数、密度、生物量总体略高于对照点海域。

关键词 舟山电厂; 浮游动物群落; 种类组成; 分布特征; 年际变化; 空间变化

中图分类号 X174 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)04-0074-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.04.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Community Structure and Spatio-temporal Variations of Zooplankton in the Sea Near Zhoushan Power Plant in Summer

LU Yan, CHENG Ai-yong, LIN Bo et al (Guoneng Zhejiang Zhoushan Power Generation Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316000)

Abstract Based on the survey results of zooplankton community near Zhoushan Power Plant in summer from 2016 to 2019, the species composition, distribution characteristics, interannual variation and spatial variation of zooplankton community were studied to further explore the influence of Zhoushan Power Plant on the community. The result showed that the number of zooplankton species, density, biomass and Shannon-weaver diversity index all fluctuated in a certain range in summer over the years, with relatively small inter-annual variation, but significant spatial variation, which showed that the number of zooplankton species, density and biomass in the drainage area were slightly higher than those in the reference area.

Key words Zhoushan Power Plant; Zooplankton community; Species composition; Distribution characteristics; Interannual variation; Spatial variation

国能浙江舟山发电厂厂址位于舟山市定海区白泉镇外山咀, 现有装机总容量650 MW, 负责定海区、普陀区、岱山县及附近45个岛屿的电力供应。舟山电厂机组的循环冷却水取用黄大洋海水, 采用扩大单元制海水直流供水系统, 机组的循环水排水口布置在电厂东北侧排水渠, 由电厂排水渠排入黄大洋。大量循环冷却水的排出会导致海水水温升高, 对电厂周边海域的海洋生态系统造成影响。

海洋浮游动物是海洋生态系统中重要的组成部分, 其作为海洋中重要的次级生产力, 在海洋食物网的物质循环和能量流动中起着举足轻重的作用^[1-4]。我国众多学者对浮游动物群落开展了调查研究, 沈海琪等^[5-7]研究了浮游动物群落的年际或季节变化、分布特征及影响因素等; 董开兴等^[2, 8-9]对不同河口海域的浮游动物群落开展了对比分析, 分析了群落分布的特征。还有部分学者专门针对电厂附近海域浮游动物群落特征进行研究, 如徐晓群等^[1, 10]对象山港内浮游动物进行了调查研究, 分析了电厂温排水对浮游动物分布的影响; 刘耀谦^[11]对湛江钢铁自备电厂排水口周边海域开展了逐月监测, 分析了附近海域pH、水温与重金属和浮游动物群落的耦合关系。关于舟山电厂附近海域浮游动物群落分布特征及影响等的研究甚少, 因此该研究拟分析舟山电厂附近海域2016—2019年夏季浮游动物群落的分布特征、年际变化和空间变化等, 揭示该海域浮游动物群落结构变化特征, 同时进一步探讨群落受舟山电厂的影响情况, 以为舟山电厂海域生态环境影响评估提供理论科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源与调查站位 为了解舟山电厂运行对附近海域海洋生态环境的影响情况, 神华国华(舟山)发电有限责任公司委托相关部门进行了海洋生态环境质量跟踪监测工作, 并形成了报告。该研究拟引用舟山电厂附近海域海洋生态环境质量跟踪调查报告(2016—2019年)中的调查成果, 探究该海域夏季浮游动物群落分布特征及影响等。

根据舟山电厂取排水口设置的实际情况, 在排水口附近设置2个调查站位, 同时在离电厂较远海域设置1个对照点站位进行水质生态调查, 调查于每年的7月或8月(夏季)进行。为研究浮游动物群落的空间变化, 该研究将1#站位和2#站位划为排水口海域调查站位, 3#站位为对照点海域调查站位。调查站位详见图1。

1.2 研究方法

1.2.1 年际种类更替率。 物种的年际更替变化采用更替率来计算分析, 公式如下:

$$R = \frac{a+b+2c}{a+b-c} \times 100\%$$

式中, R 为种类更替率, 即与前一年相比较的物种更替情况; a, b 为相邻两年的总种类数; c 为相邻2个年度的共同种类数。

1.2.2 Shannon-weaver多样性指数。 利用Shannon-weaver多样性指数评价海域生物的多样性状况, 并根据多样性指数(H')来评价海域生物的生境质量, 公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

式中, S 为样品中的种类总数; N 为样品中的总个体数; n_i 为样品中第 i 种的个体数。 H' 指数值评价海域生境质量标准:

作者简介 陆廷(1976—), 男, 浙江舟山人, 工程师, 从事环境工程、项目管理工。* 通信作者, 高级工程师, 从事海洋环境影响评价工作。

收稿日期 2021-05-20; **修回日期** 2021-06-24

$0 < H' < 1$ 为极差, $1 \leq H' < 2$ 为差, $2 \leq H' < 3$ 为一般, $H' \geq 3$ 为优良。

2 结果与分析

2.1 浮游动物种类组成 调查海域各年度夏季浮游动物种类数发现(表 1~2), 2019 年夏季共鉴定浮游动物 39 种, 隶属于 23 科 27 属, 其中排水口海域 38 种, 对照点海域 17 种; 2018 年夏季共鉴定浮游动物 27 种, 隶属于 14 科 15 属, 其中排水口海域 22 种, 对照点海域 20 种; 2017 年夏季共鉴定浮游动物 39 种, 隶属于 20 科 24 属, 其中排水口海域 35 种, 对照点海域 22 种; 2016 年夏季共鉴定浮游动物 18 种, 隶属于 11 科 12 属, 其中排水口海域 14 种, 对照点海域 12 种。

鉴定结果显示, 各调查航次均以桡足类为优势类群, 其种类数占航次浮游动物总种类数的比例均在 23.09% 以上; 毛颚类、浮游幼虫类在调查中出现的频率和比例也相对较高。各年度浮游动物类群组成情况详见表 3。不同年份浮游动物种类数在一定范围波动, 年际变化相对较小, 但种类组成年际变化较大。调查海域浮游动物种类的年际变化大小可用种类更替率表示, 其中 2016 年夏季与 2017 年夏季种类更替率为 73.33%, 2017 年夏季与 2018 年夏季种类更替率为 53.33%, 2018 年夏季与 2019 年夏季种类更替率为 59.57%。同一年份, 不同区域夏季浮游动物种类数空间变化较为显著, 即排水口海域浮游动物种类数均高于对照点海域。

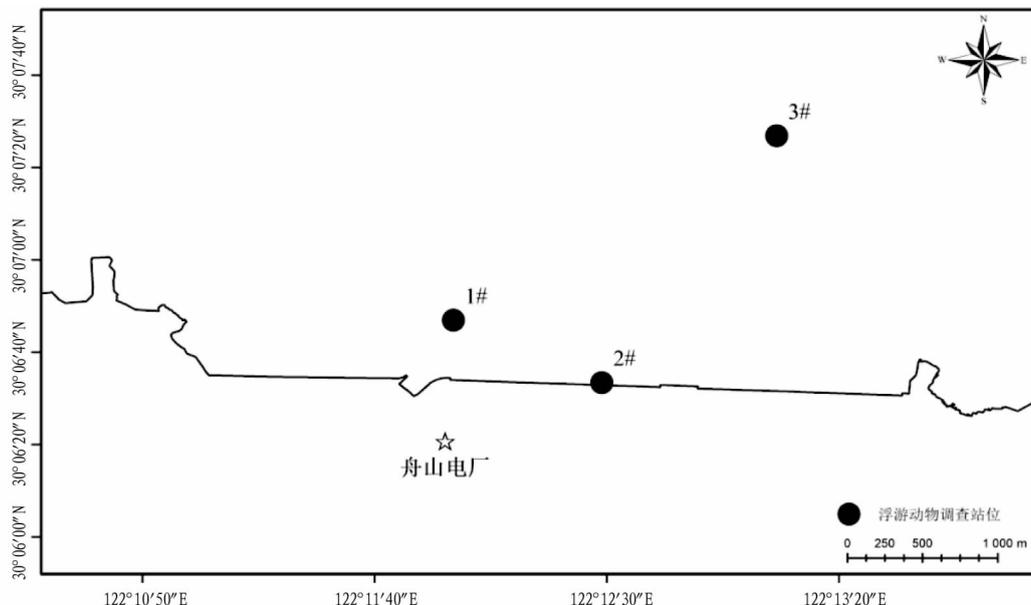


图 1 调查站位示意图

Fig.1 Schematic diagram of survey stations

表 1 调查海域各年度夏季浮游动物种类数

Table 1 The number of zooplankton species in each year of the surveyed sea area in summer

年份 Year	种类数 Number of species	种类数 Number of species	
		排水口 Drainage	对照点 Reference
2019	39	38	17
2018	27	22	20
2017	39	35	22
2016	18	14	12

2.2 浮游动物密度、生物量的时空变化 经分析, 同一季节, 不同年份整个调查海域夏季浮游动物群落密度、生物量在一定范围内波动, 波动幅度较大(表 4)。

同一年份, 不同区域夏季浮游动物密度、生物量差异较为显著(表 5)。历年夏季排水口海域浮游动物密度均值为 101.92 个/ m^3 , 生物量均值为 107.17 mg/m^3 ; 对照点海域密度均值为 91.20 个/ m^3 , 生物量均值为 93.48 mg/m^3 。

表 2 浮游动物物种名录

Table 2 List of zooplankton species

序号 No.	种类名 Category name	拉丁学(英文)名 Latin (English)	2019 年		2018 年		2017 年		2016 年	
			排水口 Drainage	对照点 Reference	排水口 Drainage	对照点 Reference	排水口 Drainage	对照点 Reference	排水口 Drainage	对照点 Reference
1	灯塔水母	<i>Turritopsis nutricula</i>					+			
2	锥状多管水母	<i>Aequorea conica</i>					+			
3	黑球真唇水母	<i>Eucheilota menoni</i>						+		
4	四叶小舌水母	<i>Liriope tetraphylla</i>					+			
5	水螅水母类	<i>Hydropolypse sp.</i>	+							
6	短柄和平水母	<i>Eirene brevistylus</i>		+						
7	华丽盛装水母	<i>Agalma elegans</i>	+	+						
8	双生水母	<i>Diphyes chamissonis</i>	+	+	+	+	+			

接下表

续表 2

序号 No.	种类名 Category name	拉丁学(英文)名 Latin (English)	2019 年		2018 年		2017 年		2016 年	
			排水口 Drainage	对照点 Reference	排水口 Drainage	对照点 Reference	排水口 Drainage	对照点 Reference	排水口 Drainage	对照点 Reference
9	拟细浅室水母	<i>Lensia subtiloides</i>	+	+			+	+		
10	五角水母	<i>Muggiaea atlantica</i>	+	+			+	+		
11	栉水母类	<i>Chelophyes</i> sp.	+	+				+		
12	球形侧腕水母	<i>Pleurobrachia globosa</i>	+	+	+	+	+	+	+	
13	瓜水母	<i>Beroe cucumis</i>				+	+			
14	浮游多毛类	<i>Polychaeta</i> sp.			+					
15	浮游螺类	<i>Fuyouluolei</i> sp.	+							
16	胖琥珀螺	<i>Limacina inflata</i>	+							
17	马蹄琥珀螺	<i>Limacina trochiformis</i>	+							
18	尖尾海萤	<i>Cypridina acuminata</i>			+					
19	中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>	+		+	+	+	+	+	+
20	粗新哲水蚤	<i>Neocalanus robustior</i>								+
21	细角新哲水蚤	<i>Neocalanus tenuicornis</i>	+							
22	亚强真哲水蚤	<i>Eucalanus suberassus</i>	+							
23	隆线拟哲水蚤	<i>Calanoides carinatus</i>	+							
24	精致真刺水蚤	<i>Euchaeta concinna</i>	+		+	+	+	+	+	+
25	平滑真刺水蚤	<i>Euchaeta plana</i>	+		+		+			
26	墨氏胸刺水蚤	<i>Centropages mcmerrii</i>								+
27	背针胸刺水蚤	<i>Centropages dorsispinatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
28	异尾宽水蚤	<i>Temora discaudata</i>	+							
29	椭圆形长足水蚤	<i>Calanopia elliptica</i>						+		
30	伯氏平头水蚤	<i>Candacia bradyi</i>	+	+						
31	双刺唇角水蚤	<i>Labidocera bipinnata</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
32	真刺唇角水蚤	<i>Labidocera euchaeta</i>	+		+	+	+	+	+	+
33	左突唇角水蚤	<i>Labidocera sinilobata</i>			+	+	+	+		
34	克氏纺锤水蚤	<i>Acartia clausi</i>			+					
35	红纺锤水蚤	<i>Acartia erythraea</i>	+	+	+	+				
36	太平洋纺锤水蚤	<i>Acartia pacifica</i>	+		+		+	+	+	
37	美丽拟节糠虾	<i>Hemisiriella pulchra</i>					+	+		
38	漂浮囊糠虾	<i>Gastrosaccus pelagicus</i>	+				+	+		
39	黄海刺糠虾	<i>Acanthomysis huanhaiensis</i>	+							
40	短额刺糠虾	<i>Acanthomysis brevirostris</i>	+	+					+	+
41	钩虾属	<i>Gammaridea</i> sp.					+			
42	中华假磷虾	<i>Pseudeuphausia sinica</i>	+	+	+	+	+	+		
43	中国毛虾	<i>Acetes chinensis</i>				+				
44	中型莹虾	<i>Lucifer intermedius</i>				+	+			
45	白虾属	<i>Exopalaemon</i> sp.	+		+					+
46	钩背船形虾	<i>Tozeuma armatum</i>							+	
47	中华箭虫	<i>Sagitta sinica</i>				+	+	+	+	+
48	箭虫属	<i>Sagitta</i> sp.	+	+	+	+	+	+		
49	百陶箭虫	<i>Sagitta bedoti</i>	+	+	+	+	+	+	+	
50	强壮箭虫	<i>Sagitta crassa</i>					+			
51	肥胖箭虫	<i>Sagitta enflata</i>	+	+	+	+	+			
52	美丽箭虫	<i>Sagitta pulchra</i>	+							
53	新多变箭虫	<i>Sagitta neodecipiens</i>					+			
54	住囊虫属	<i>Oikopleura</i> sp.	+					+		
55	长尾住囊虫	<i>Oikopleura longicauda</i>					+			
56	长尾类幼虫	Mecurran larva	+	+	+	+	+	+	+	
57	短尾类蚤状幼虫	Zoea larva (Brachyura)	+		+		+			
58	磁蟹蚤状幼虫	Zoea larva (Porcellana)	+			+	+	+	+	+
59	阿利玛幼虫	Alima larva				+	+	+		+
60	仔鱼	Fish larva	+		+	+	+			
61	棘皮动物长腕幼虫	Echinodermata ophiopluteus larva	+							
62	棘皮动物幼体	Echinodermata larva							+	
63	短尾类大眼幼虫	Megalopa larva					+			
64	幼蟹	Young crab					+			

表 3 调查海域各年度夏季浮游动物类群组成

Table 3 Composition of zooplankton groups in each year of the surveyed sea area in summer

时间 Time	水螅水母类 Hydro-medusa	管水母类 Siphonophora	栉水母类 Ctenophora	浮游多毛类 Pelagic polychaete	浮游螺类 Plankton snails	介形类 Ostracoda	桡足类 Copepoda	糠虾类 Mysidacea	端足类 Amphipoda	磷虾类 Euphausiacea	十足类 Decapod	樱虾类 Sakura shrimp	毛颚类 Chaetognath	被囊类 Tunicata	浮游幼虫 Planktonic larvae
2019 年夏季 Summer in 2019	5.13	10.26	5.13	—	7.69	—	33.33	7.69	—	2.56	2.56	—	10.26	2.56	12.83
2018 年夏季 Summer in 2018	—	3.70	3.70	3.70	—	3.70	37.04	—	—	3.70	3.70	7.41	14.82	—	18.53
2017 年夏季 Summer in 2017	10.26	7.69	7.69	—	—	—	23.09	5.13	2.56	2.56	—	2.56	15.38	5.13	17.95
2016 年夏季 Summer in 2016	—	—	5.56	—	—	—	44.44	5.56	—	—	11.11	—	11.11	—	22.22

注：“—”表示未采集鉴定到该类群生物

Note: “—” means that no creatures of this group have been collected and identified

表 4 调查海域各年度夏季浮游动物密度、生物量

Table 4 Density and biomass of zooplankton in each year of the surveyed sea area in summer

年份 Year	密度 Density 个/m ³	生物量 Biomass mg/m ³
2019	133.45	150.50
2018	61.60	62.70
2017	176.58	166.17
2016	14.60	21.95

表 5 各年度夏季排水口和对照点海域浮游动物密度、生物量

Table 5 Density and biomass of zooplankton at the drainage area and the reference area in each year in summer

年份 Year	密度 Density // 个/m ³		生物量 Biomass // mg/m ³	
	排水口 Drainage	对照点 Reference	排水口 Drainage	对照点 Reference
2019	190.20	76.70	180.20	120.80
2018	53.20	70.00	71.90	53.50
2017	153.86	199.29	175.19	157.14
2016	10.40	18.80	1.40	42.50
均值 Mean	101.92	91.20	107.17	93.48

2.3 物种多样性 从表 6 可以看出,同一季节,不同年份整个调查海域夏季浮游动物 Shannon-weaver 多样性指数差异不大;2019 年夏季、2018 年夏季、2017 年夏季和 2016 年夏季调查海域 Shannon-weaver 多样性指数均值分别为 2.97、2.90、3.20、2.70;根据生境质量评价标准可得,各年度夏季调查海域处于一般或优良状态。同一年份,不同区域夏季浮游动物 Shannon-weaver 多样性指数存在一定差异;历年夏季排水口和对照点海域浮游动物多样性指数均值分别为 2.87、3.02;根据生境质量评价标准可得,夏季排水口海域多处于一般状态,对照点海域多处于优良状态。

2.4 环境因子 调查结果显示(表 7),调查海域历年夏季水温均值为 26.39 °C,盐度均值为 25.31‰,pH 均值为 8.00。除 2016 年夏季外,其余 3 个年份夏季水温、盐度差异不大,其中 2019 年夏季水温、盐度均值分别为 26.58 °C、22.94‰,2018 年夏季分别为 28.26 °C、27.25‰,2017 年夏季分别为 26.56 °C、27.22‰,2016 年夏季水温仅 24.15 °C,盐度为 23.82‰。

表 6 各年度夏季排水口和对照点海域浮游动物多样性指数

Table 6 Diversity index of zooplankton at the drainage area and the reference area in each year in summer

年份 Year	排水口 Drainage	对照点 Reference	均值 Mean
2019	2.92	3.02	2.97
2018	2.97	2.84	2.90
2017	3.34	3.05	3.20
2016	2.25	3.16	2.70
均值 Mean	2.87	3.02	2.94

表 7 调查海域各年度水温、盐度、pH 分布

Table 7 Distribution of water temperature, salinity and pH in the survey area in each year

年份 Year	站位 Station	水温 Temperature // °C	盐度 Salinity ‰	pH
2019	排水口海域	26.50	22.88	8.03
	对照点海域	26.65	23.00	8.03
	均值	26.58	22.94	8.03
2018	排水口海域	28.28	27.35	8.05
	对照点海域	28.25	27.15	8.03
	均值	28.26	27.25	8.04
2017	排水口海域	26.78	27.03	8.01
	对照点海域	26.35	27.40	7.97
	均值	26.56	27.22	7.99
2016	排水口海域	24.05	23.65	7.96
	对照点海域	24.25	24.00	7.95
	均值	24.15	23.82	7.96
总均值 Mean		26.39	25.31	8.00

3 结论与讨论

3.1 调查海域浮游动物群落年际变化特征 调查海域夏季浮游动物种类数、密度、生物量以及 Shannon-weaver 多样性指数在一定范围内波动。2016 年夏季,调查海域浮游动物种类数、密度、生物量等与其他 3 个年份差异相对较大,这是因为 2016 年夏季调查时间为 7 月初,而其余 3 个年份夏季调查时间在 7 月底或 8 月初。这与舟山电厂附近海域 2017—2019 年夏季环境因子(水温、盐度等)变化不大,而 2016 年夏季水温、盐度等较低的结果是一致的。这也解释了

2016年夏季与2017年夏季种类更替率(73.33%)显著高于其余相邻年份间种类更替率的现象。众多研究表明,温度、盐度等是影响浮游动物群落结构的重要环境因子^[3,5-6],故2017—2019年夏季环境因子较为稳定从而显示出浮游动物群落也较为稳定。2017—2019年3个年份夏季的差异则更多来自海流水系等的配比情况,舟山及其附近海域夏季受台湾暖流与黑潮的作用较大,同时夏季处于丰水期受到长江冲淡水等沿岸流作用也强烈^[12-13]。

与骆鑫等^[12]于2014年夏季在环舟山本岛海域浮游动物群落调查结果对比,该研究夏季浮游动物种类数、密度、生物量等均略低,这可能是该研究调查的站位数较少导致的,但其优势种在该研究中也是高频率出现的物种,如中华哲水蚤、背针胸刺水蚤、百陶箭虫等。

3.2 调查海域浮游动物群落空间变化特征 调查海域各年度夏季浮游动物种类数、物种组成、密度、生物量以及 Shannon-weaver 多样性指数等存在较显著的空间变化,即排水口海域浮游动物的种类数、密度、生物量总体略高于对照点海域。这可能与夏季不仅受到台湾暖流与黑潮等海流影响,还受到沿岸流作用有关,在沿岸的排水口海域和离岸较远的对照点海域显示出群落的差异性。

另外,根据 Shannon-weaver 多样性指数计算结果评价调查区域生境质量,夏季排水口海域生境多处于一般状态,对照点海域多处于优良状态,这与种类数、密度、生物量等分布情况呈负相关。Shannon-weaver 多样性指数(H')是一个描述群落多样性的综合统计量,也可以判定受人为扰动情况,当 H' 指数较高人为扰动较小,当 H' 指数低时则扰动较

大^[14]。排水口海域受到电厂温排水增温等的影响较大,人为扰动大 H' 指数较低,而对照点海域人为影响较小,故 H' 指数相对较高。

参考文献

- [1] 徐晓群,杜萍,寿鹿,等.长期温排水影响下的象山港浮游动物群落分布和季节变化[C]//第七届长三角科技论坛——环境保护与生态文明分论坛论文集.杭州:浙江省科协,浙江省环境科学学会,浙江省生态学会,2010:48-61.
- [2] 董开兴.飞云江口外水域和苍南近岸水域浮游动物生态特征比较[D].厦门:厦门大学,2015.
- [3] 杜明敏,刘镇盛,王春生,等.中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J].生态学报,2013,33(17):5407-5418.
- [4] LAMPERT W. The relationship between zooplankton biomass and grazing: A review[J]. *Limnologia*, 1988, 19: 11-20.
- [5] 沈海琪,许永久,王健鑫,等.2017—2018年长江口海域夏季浮游动物群落的年际变化及影响因素[J].中国水产科学,2020,27(3):327-335.
- [6] 杨璐,刘捷,张健,等.渤海湾浮游动物群落变化及其与环境因子的关系[J].海洋学研究,2018,36(1):93-101.
- [7] 杨杰青,全为民,史赞荣,等.东海近岸海域浮游动物群落时空分布[J].水产学报,2018,42(7):1060-1076.
- [8] 卢伍阳,马增岭,徐兆礼,等.春季我国不同纬度河口浮游动物群落变化趋势[J].海洋学报,2016,38(10):83-93.
- [9] 王亮根,李亚芳,杜飞雁,等.大亚湾人工鱼礁区和岛礁区浮游动物群落特征及对仔稚鱼的影响[J].南方水产科学,2018,14(2):41-50.
- [10] 傅强,朱礼鑫,沈益绿,等.滨海电厂温排水对临近海域浮游动物生态特征的影响研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(7):25-33.
- [11] 刘耀谦.湛江钢铁自备电厂附近海域 pH、水温与重金属和浮游动物群落的耦合关系[D].湛江:广东海洋大学,2016.
- [12] 骆鑫,曾江宇,徐晓群,等.舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2016,36(24):8194-8204.
- [13] 沈国英,施并章.海洋生态学[M].2版.北京:科学出版社,2002:37-39.
- [14] WILHM J L. Use of biomass units in shannon's formula[J]. *Ecology*, 1968, 49(1): 153-156.
- [10] 卓拉,栗萌,吴普特,等.黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析[J].水利学报,2020,51(9):1059-1069.
- [11] 张雄化.水资源利用效率与虚拟水国际贸易关系分析:基于粮食安全的视角[J].云南社会科学,2015(1):66-70.
- [12] 杨雪,何玉成,刘成.水资源安全视角下我国粮油虚拟水贸易实证研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):41-50.
- [13] 韦苏捷,贺培.中国—东盟农产品虚拟水贸易分析及启示[J].国际贸易,2015(12):36-42.
- [14] 孙才志,王中慧.中国“一带一路”沿线国家农产品贸易的虚拟水量流动特征[J].水资源保护,2019,35(1):14-19,26.
- [15] 于畅,岳丹萌,宫梦蝶,等.“一带一路”沿线国家原木水足迹核算及空间流动格局研究[J].林业经济,2020,42(10):16-27.
- [16] 丁雪丽,张玲玲,王宗志.基于省际间粮食贸易的虚拟水综合效益分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(5):978-987.
- [17] 张启楠,张凡凡,李福夺,等.粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(7):21-28.
- [18] 邢莹.中国省际粮食贸易中的虚拟水生态补偿:基于粮食净调出省(区)数据[J].江苏农业科学,2016,44(1):467-468.
- [19] 李新生,黄会平,韩宇平,等.京津冀农业虚拟水流动及对区域水资源压力影响研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):40-48.
- [20] 韩雪,梁璇,王倩.中国主要农产品虚拟要素贸易网络结构特征分析[J].生态学报,2020,40(11):3851-3865.
- [21] 吴普特,卓拉,刘艺琳,等.区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价[J].科学通报,2019,64(18):1953-1966.
- [22] 蔡婕萍,左高山,许和连.虚拟水:国际水资源管理与启示[J].生态经济,2019,35(10):200-206,223.

(上接第73页)

参考文献

- [1] 韩昕雪琦,安婷莉,高学睿,等.我国西北地区主要农作物贸易对区域水资源影响[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):82-97.
- [2] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[C]//ODA. Priorities for water resources allocation and management. Londra: ODA, 1993: 13-26.
- [3] ZIMMER D, RENAULT D. Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results[C]//HOEKSTRA A Y. Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Delft, Netherlands: UN ESCO/HE Inst for Water Educ, 2003: 93-107.
- [4] 孙才志,张蕾.中国农产品虚拟水—耕地资源区域时空差异演变[J].资源科学,2009,31(1):84-93.
- [5] 李莹,毛世峰,张勇.基于虚拟水理论的黑龙省主要农产品虚拟水价值研究[J].安徽农业科学,2016,44(19):244-247.
- [6] 方芳,马琼.新疆2002—2016年主要农作物虚拟水含量时空分布分析[J].中国农村水利水电,2019(8):36-41.
- [7] 郭相平,余涛,吴梦洋,等.中国省区虚拟水流动及对农业用水的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(8):744-749.
- [8] 陈红,王浩坤,秦帅.水足迹视角下黑龙江粮食生产用水绿色效率研究:基于三阶段 SBM-Malmquist 指数分析法[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2790-2804.
- [9] 贾琨颖,田贵良.虚拟水下区域农业对水资源短缺的脆弱性研究[J].节水灌溉,2017(8):53-57.