

不同渔业养殖方式下菜子湖湿地土壤及其鱼塘沉积物有机磷形态分级特征研究

陈芳¹, 张平究^{1*}, 杨艳芳², 张经纬¹

(1. 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241003; 2. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 安徽芜湖 241003)

摘要 以菜子湖湿地 16 个采样点 2 种渔业养殖方式(开放和封闭)下的土壤及鱼塘沉积物样品为研究对象, 采用 Lvanoff 的有机磷分级提取方法, 对不同养殖方式下湿地土壤及鱼塘沉积物有机磷进行分级提取, 分析渔业养殖下有机磷各形态分布的差异及其与其他营养元素之间相关性。结果表明, 渔业养殖下湿地土壤和沉积物的营养元素以及磷含量相对较高, 且大部分元素呈沉积物高于土壤、封闭式高于开放式分布特征。2 种养殖方式下湿地土壤各形态有机磷活性方面均表现为非活性>中活性>活性, Res-Po 为有机磷主要组分; 湿地鱼塘沉积物在开放式下各形态有机磷活性与湿地土壤的变化趋势一致, 封闭下各形态有机磷活性方面表现为中活性>非活性>活性, HCl-Po 为有机磷主要组分。湿地土壤营养元素与各形态有机磷呈显著相关, 表明营养元素的输入能够有效促进有机磷的矿化分解。

关键词 菜子湖湿地; 渔业养殖; 有机磷; 营养元素

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)23-0070-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.23.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Classification Characteristics of Soil Organic Phosphorus Fractions in Caizi Lake Wetland under Different Fishery Breeding Methods
CHEN Fang¹, ZHANG Ping-jiu¹, YANG Yan-fang² et al (1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003; 2. School of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003)

Abstract Taking the soil and sediment samples from 16 sampling points of Caizi Lake Wetland under two different aquaculture modes (open and closed) as the research object, the organic phosphorus of wetland soil under different aquaculture modes was extracted by Lvanoff's method, and the correlation between the distribution differences of different types of organic phosphorus and other nutrients was analyzed. The results showed that the contents of nutrient elements and phosphorus in soil and sediment were relatively high, and most of the elements were higher in sediment than in soil, closed than open distribution. The results showed that the activity of all types of organic phosphorus in wetland soil under the two cultivation methods was non active > medium active > active, and Res-Po was the main component of organic phosphorus; the change trend of all types of organic phosphorus activity in wetland fishpond sediment under the open mode was consistent with that of wetland soil, and the activity of all types of organic phosphorus under the closed mode was medium active > non active > active, and HCl-Po was the main component of organic phosphorus. There was a significant correlation between soil nutrient elements and various types of organic phosphorus, which indicated that the input of nutrient elements could effectively promote the mineralization and decomposition of organic phosphorus.

Key words Caizi Lake Wetland; Fishery culture; Organic phosphorus; Nutrient elements

湿地是地球表层生态系统的重要组成部分, 它是由水陆相互作用形成的具有特殊结构和功能的自然综合体, 是陆地无机盐及有机质通过径流进入水体的最后一道屏障, 是水陆相互作用形成的独特生态系统^[1-2]。湿地渔业养殖是人类对于湿地价值的重要利用, 合理的养殖方式不仅可以为当地居民创造不菲的收益, 同时也为恢复和保护湿地生态提供了重要支持^[3-4], 然而随着经济的发展养殖模式的改变, 渔业养殖快速发展的同时也带来了养殖水体富营养化问题, 磷作为湿地水体富营养化的关键元素, 能够有效表征水体初级生产力和渔业生产性能, 而磷的释放潜力又取决于磷在沉积物中的形态, 有机磷作为沉积物中的一种重要磷酸盐, 对土壤中的磷素转化具有重要作用^[5-6]。

安庆市菜子湖水域位于长江中下游北岸, 是长江流域淡水湖泊群的重要组成部分, 20 世纪 50 年代开始大规模围湖造田, 导致湿地面积不断减少, 80 年代开始退耕还湖, 且不同退耕还湖区因地制宜恢复成自然湿地或水产养殖区^[7]。2020 年 1 月, 安庆市菜子湖湿地作为“引江济淮”工程的重

要输水通道, 正式实施“十年禁渔”政策^[8]。当前已有学者对不同退耕年限下菜子湖湿地土壤及鱼塘沉积物磷素组分特征、酶活性等以及渔业养殖下菜子湖湿地土壤重金属含量特征等进行了研究, 但对退耕还湖后渔业养殖方式差异下湿地土壤及鱼塘沉积物磷形态分布的研究相对缺乏^[9-11]。笔者通过对菜子湖湿地不同区域开放与封闭 2 种养殖模式下的湖边土壤与湖底淤泥进行采集处理, 采用 Lvanoff 的有机磷分级提取方法, 对湿地土壤及鱼塘沉积物有机磷进行分级提取, 研究菜子湖湿地中有机磷形态分布特征, 分析有机磷分级组分与其他指标的关系, 探讨有机磷组分与生物有效性和水体富营养化的关系, 不仅为养殖水体富营养化的有效治理提供思路, 同时也为水产品的安全养殖提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 安庆市菜子湖位于大别山东南侧、长江中下游北岸, 跨安徽省桐城市和枞阳县 2 县市, 地理坐标为 117°01'~117°09' E、30°43'~30°58' N, 由菜子湖、嬉子湖和白兔湖 3 部分构成, 统称菜子湖。全流域面积 3 346 km², 湖泊总面积 226 km², 是长江中下游湿地淡水湖泊群的重要组成部分之一。湖区地貌以丘陵和冲积平原为主, 地处北亚热带季风湿润气候带, 年平均气温 16.6 °C, 年平均降水量 1 325.5 mm。4—10 月为丰水期, 水深 3 m 以上, 11 月—翌年 3 月为枯水期, 湖底大多出露为滩涂^[9-11]。研究区自 1958

基金项目 国家自然科学基金项目(41301249)。

作者简介 陈芳(1997—), 女, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 研究方向: 湿地土壤生态。* 通信作者, 教授, 硕士生导师, 从事湿地土壤生态学研究。

收稿日期 2021-03-11

年开始大规模围垦,1986 年退耕后大多用于渔业养殖,养殖方式主要分为两类:①开放式,指天然或人工的但未与外界水系完全隔开的养殖区和捕捞区;②封闭式,主要指人工采用高坝与外界水体完全隔开的养殖区。养殖品种主要以青鱼、草鱼、鲢鱼等经济鱼为主;部分鱼塘用于养殖珍珠、龙虾等;未开发的湿地植物群落主要为芦苇、细叶藃等,存在部分放牧行为^[11]。

1.2 样品采集与前处理 以安庆菜子湖湿地土壤及鱼塘沉

积物为研究对象,2018 年 3 月环绕菜子湖水域,随机均匀布点,并利用 GPS 进行准确定位(表 1),分别选取湿地土壤中湖边出露水面的 9 个土壤和 7 个湖底淤泥采样点。土壤样品命名为 T1~T9,底泥样品命名为 D1~D7,一个采样点由 3 个样品混合。底泥样品采用抓斗式底泥采样器采集,土壤样品剥离表层植被后采集 0~10 cm 表层土样。将采集的土样自然风干后分成 2 份,一部分过 2 mm 筛进行理化性质分析,另一部分用玛瑙研钵研磨过 100 目筛进行磷含量的测定。

表 1 研究样地基本情况

Table 1 Basic information of the study plot

序号 No.	样点 Sample points	采样地 Sampling place
1	T1	分布于走马墩湖北侧,为开放式养殖,由 100% 狗牙根植被覆盖
2	T2	分布于白兔湖的西北侧,位于王家湾西侧,为原始湿地中开放式养殖,由 100% 狗牙根植被覆盖
3	T3	分布于白兔湖的西北侧,位于小杨庄东南侧,为开放式养殖,由 100% 狗牙根植被覆盖
4	T4	分布于白兔湖东侧,位于先让咀西北侧,为退耕土,属于开放式养殖,由 100% 狗牙根植被覆盖
5	T5	分布于白兔湖东侧,位于麻元村南侧,为开放式养殖,由 100% 狗牙根植被覆盖
6	T6	分布于嬉子湖西侧,位于兔儿咀,为封闭式围埂养殖,为 70% 芦苇植被覆盖,且于 3 年前改养殖珍珠
7	T7	分布于嬉子湖西侧,位于西瓜咀,为封闭式围埂养殖,由 20% 芦苇植被覆盖
8	T8	分布于嬉子湖西侧,位于西瓜咀,为封闭式围埂养殖,由 100% 芦苇植被覆盖,在进行龙虾养殖
9	T9	分布于嬉子湖水域北岸,位于走马墩湖,为封闭式围埂养殖,由 100% 狗牙根植被覆盖
10	D1	分布于嬉子湖北侧,位于走马墩湖另一侧埂外区域,为开放式养殖
11	D2	分布于白兔湖北侧,位于小凤庄,养殖年限为 20 年,为开放式养殖方式
12	D3	分布于白兔湖的东侧,位于享堂,为开放式养殖
13	D4	分布于嬉子湖北侧,位于黄玉湿地,为围埂封闭式养殖,且水中施用大量鸡粪,底泥异味重
14	D5	位于小木咀南侧,为围埂封闭式养殖,且埂内水体分布较多渔网
15	D6	位于王家咀西南侧,为围埂封闭式养殖
16	D7	分布于白兔湖的东侧,位于盛家咀头南侧,为封闭式养殖,近几年改养殖珍珠

1.3 分析方法 ①全磷:X 荧光光谱仪(XRF);②有机磷:烧灼法;③有机磷形态分级:采用 Lvanoff 分级提取方法^[12],将有机磷分为活性有机磷(NaHCO₃-OP)、中活性有机磷(HCL-OP+富里酸-OP)、非活性有机磷(胡敏酸-OP+残渣态-OP);④pH、有机质、有效磷、铵态氮、碱解氮参照土壤农业化学分析方法^[13],磷酸酶:对硝基苯磷酸盐法^[14],植酸酶:偏钒酸铵钼黄法^[15]。

1.4 数据处理 采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行处理和制图;应用 SPSS 20.0 对试验数据进行差异分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 理化性质 对不同养殖方式下菜子湖湿地 9 个湖边土壤和 7 个湖底沉积物进行理化性质测定,结果见表 2、3。湿地土壤和鱼塘沉积物的 pH 总体呈弱酸性,且沉积物的 pH 高于土壤、封闭式高于开放式。不同养殖方式下鱼塘沉积物的有机质(OM)含量低于土壤且开放式高于封闭式。渔业养殖下鱼塘沉积物的有效磷(AP)含量高于土壤且两者均表现为封闭式高于开放式特征。碱解氮(AN)在湿地土壤中含量高于沉积物且土壤与沉积物均表现为封闭式高于开放式特征。铵态氮在土壤中含量低于沉积物,不同养殖方式下湿地土壤表现为封闭式低于开放式特征,湿地鱼塘沉积物表现为封闭式高于开放式特征。磷酸酶和植酸酶在土壤中的活性

显著高于沉积物,磷酸酶在土壤与沉积物中以及沉积物中的植酸酶均表现为封闭式高于开放式特征,土壤中的植酸酶则与沉积物中呈相反的变化特征即开放式高于封闭式。

总体上,渔业养殖下湿地土壤的营养元素含量相对较高,大部分营养元素均呈沉积物高于土壤的分布特征,磷酸酶以及植酸酶则表现出土壤高于沉积物的分布特征。彭沛林等^[16]研究认为沉积物中的有机质以及氮磷的空间分布与人类活动具有明显的相关性,相对于渔业养殖条件下的湖边土壤而言,鱼塘沉积物受人为活动的影响更大,渔业养殖产生的养殖废水更有利于大部分营养元素在湖底的沉积。研究表明微生物和植物根系分泌物是土壤酶的重要来源^[15,17],由于湿地土壤具有高植被覆盖度、高肥力特点,高植被覆盖度和高肥力的土壤条件能够为土壤多种酶促反应提供底物。

2.2 不同养殖方式下湿地土壤及其鱼塘沉积物 TP、IP、OP 分布特征 不同养殖方式下菜子湖湿地 9 个湖边土壤样品和 7 个湖底沉积物样品的 TP、IP、OP 分布特征见图 1,其中全磷(TP)是湿地土壤磷的总储存量,菜子湖湿地土壤和沉积物的全磷平均含量分别为 718.11、1 023.76 mg/kg,渔业养殖下菜子湖湿地土壤的磷含量偏高,参照刘鸿亮等^[18]对沉积物污染水平划分的标准,湿地土壤达中度污染(500 mg/kg < TP < 1 000 mg/kg),湿地鱼塘底泥达严重污染(TP ≥ 1 000 mg/kg),不同养殖方式下菜子湖湿地土壤中沉积物的

表2 不同养殖方式下菜子湖湿地土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of Caizi Lake wetland soil under different cultivation methods

养殖方式 Breeding method	样点 Sample point	pH	OM g/kg	AP mg/kg	AN mg/kg	铵态氮 Ammonium Nitrogen mg/kg	磷酸酶 Phosphatase mg/(kg·h)	植酸酶 Phytase mg/(kg·min)
开放模式	T1	5.07±0.03	8.23±1.84	11.52±4.21	77.00±7.00	32.17±6.74	4 650.3±909.8	1.23±0.88
Open mode	T2	4.90±0.02	4.75±0.57	33.45±3.35	67.67±4.04	32.25±3.54	3 638.9±106.7	0.59±0.51
	T3	5.16±0.06	4.90±0.95	5.31±1.01	81.67±4.04	21.55±9.14	7 623.9±870.2	1.06±0.00
	T4	4.78±0.06	10.52±0.27	12.63±1.70	81.67±22.50	37.90±5.61	7 595.7±360.6	0.94±0.89
	T5	4.80±0.09	12.41±1.40	9.45±1.24	67.67±4.04	22.95±4.33	9 927.4±572.5	1.17±0.41
封闭模式	T6	5.85±0.02	6.76±1.76	28.08±2.12	158.67±8.08	29.17±3.43	8 020.3±663.4	0.47±0.20
Closed mode	T7	5.78±0.08	2.74±1.70	21.51±5.42	95.67±10.70	14.64±16.66	3 053.3±106.2	0.29±0.10
	T8	6.17±0.07	8.43±2.96	33.99±11.99	81.67±4.04	3.98±1.19	2 814.1±148.2	0.12±0.10
	T9	5.00±0.14	9.90±1.11	8.74±2.97	70.00±7.00	30.42±3.00	14 506.8±919.3	0.41±0.10

表3 不同养殖方式下菜子湖湿地鱼塘沉积物理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of bottom mud of fish ponds in Caizi Lake wetland under different culture methods

养殖方式 Breeding method	样点 Sample point	pH	OM g/kg	AP mg/kg	AN mg/kg	铵态氮 Ammonium Nitrogen mg/kg	磷酸酶 Phosphatase mg/(kg·h)	植酸酶 Phytase mg/(kg·min)
开放模式	D1	5.63±0.45	6.84±0.41	11.23±1.71	58.33±4.04	43.52±13.05	3 686.5±64.5	0.35±0.18
Open mode	D2	6.52±0.09	4.23±0.56	6.24±0.81	53.67±4.04	17.18±2.88	2 211.6±136.3	0.41±0.27
	D3	6.57±0.06	2.92±0.96	8.54±1.28	79.33±4.04	19.40±12.43	1 731.1±300.8	0.53±0.35
封闭模式	D4	7.17±0.05	5.20±0.99	90.91±42.45	70.00±7.00	60.37±5.06	4 404.1±466.9	0.23±0.27
Closed mode	D5	6.71±0.11	4.59±0.47	26.70±1.99	100.33±4.04	21.64±3.92	1 830.0±191.2	0.70±0.30
	D6	6.24±0.09	2.74±0.27	23.43±8.30	60.67±4.04	74.72±6.44	1 943.1±106.7	0.59±0.37
	D7	5.82±0.05	4.93±0.55	16.34±4.69	70.00±7.00	19.79±7.22	2 084.4±197.8	1.53±0.54

TP 含量显著高于土壤且土壤与沉积物均表现为封闭式高于开放式分布特征,可能是因为封闭式下养殖受人类活动影响更大,在人工养殖过程中施入大量含磷的饲料、药品和其他污染物,加上土壤中随降水流失的磷元素共同排入到水体中从而在湖底富集^[11]。无机磷(IP)、有机磷(OP)在土壤中平均含量为 424.39、234.81 mg/kg,在沉积物中平均含量为 730.04、253.79 mg/kg,渔业养殖下菜子湖湿地土壤磷主要以 IP 形态存在,这与刘文静等^[9]研究结果一致,不同养殖方式下菜子湖湿地土壤 IP、OP 与 TP 的变化趋势一致。不同区域之间湿地土壤磷分布差异显著,其中土壤中位于王家湾和西瓜咀的开放式样点 T2 和封闭式样点 T8 处的 TP、IP,以及沉积物中位于黄玉湿地的封闭式样点 D4 处的磷含量较高且达到最高值,其他样点之间无显著规律性。湿地土壤 T2、T8 的磷含量较高,可能是因为样点处均有 100% 的植被覆盖度,丰富的植被根系和枯枝落叶有利于提高土壤营养物质的积累速率,同时植被生长离不开磷元素,植物体内吸收的磷也是造成该地湿地土壤磷含量较高的主要原因,这与谢莹等^[19]研究认为植被是促进湿地土壤磷含量增加的重要因素相一致。D4 的磷含量较高是因为根据调查该地水产养殖过程中施入大量人工化肥(鸡粪)且养殖鱼塘水面漂浮有大量死鱼尸体,水体严重污染,大量含磷的粪便、尸体等随养殖水体沉积到湖底淤泥中,从而造成该地磷含量异常偏高^[11]。

2.3 不同养殖方式下湿地土壤及其鱼塘沉积物各形态有机磷分布特征 不同养殖方式下湿地土壤各形态有机磷分布

特征见图 2,湿地土壤各形态 OP 含量表现为 Res-Po>Hum-Po>NaHCO₃-Po>HCl-Po>Ful-Po,渔业养殖开放式下各形态 OP 含量为 Res-Po>Hum-Po>NaHCO₃-Po>HCl-Po>Ful-Po,封闭式下 OP 含量为 Res-Po>Hum-Po>HCl-Po>NaHCO₃-Po>Ful-Po。其中,NaHCO₃-Po 为活性有机磷,是有机磷中结构最松散最易矿化分解的部分^[20],开放与封闭养殖模式下平均含量为 32.55、18.07 mg/kg; HCl-Po 和 Ful-Po 为中活性有机磷,需要在一定条件下水解矿化成小分子或正磷酸盐,具有一定潜力的生物有效性,但与 NaHCO₃-Po 相比生物有效性较低且不易被植物吸收^[20],开放与封闭养殖模式下平均含量分别为 19.88、24.19 以及 18.43、16.43 mg/kg,湿地土壤中的中活性有机磷主要以 HCl-Po 形式存在;Res-Po 和 Hum-Po 为非活性有机磷,是有机磷中最稳定最难矿化分解的部分^[20],开放与封闭养殖模式下平均含量分别为 55.44、71.93 以及 85.56、84.90 mg/kg,湿地土壤中的非活性有机磷主要以 Res-Po 形式存在,因此除开放式下湿地土壤某些样点 NaHCO₃-Po 含量较高的原因可能与放牧活动有关,总体上不同养殖方式下湿地土壤 OP 活性方面均表现为非活性>中活性>活性。湿地鱼塘沉积物各形态 OP 含量表现为 HCl-Po>Res-Po>Hum-Po>NaHCO₃-Po>Ful-Po,渔业养殖开放式下各形态 OP 含量与开放式下变化趋势一致,封闭式下 OP 含量为 HCl-Po>Res-Po>Hum-Po>NaHCO₃-Po>Ful-Po,其中开放与封闭养殖模式下活性有机磷(NaHCO₃-Po)平均含量为 32.53、32.07 mg/kg;中活性有机磷(HCl-Po 和 Ful-Po)

平均含量为 26.65、260.09 以及 26.03、23.58 mg/kg, 湿地鱼塘沉积物中的中活性有机磷主要以 HCl-Po 形式存在; 非活性有机磷 (Res-Po 和 Hum-Po) 平均含量为 109.59、154.09 以及 63.28、87.63 mg/kg, 湿地鱼塘沉积物中的非活性有机

磷主要以 Res-Po 形式存在, 总体上开放式下湿地鱼塘沉积物 OP 活性方面表现为非活性>中活性>活性, 与湿地土壤的变化趋势一致, 封闭下 OP 活性方面表现为中活性>非活性>活性。

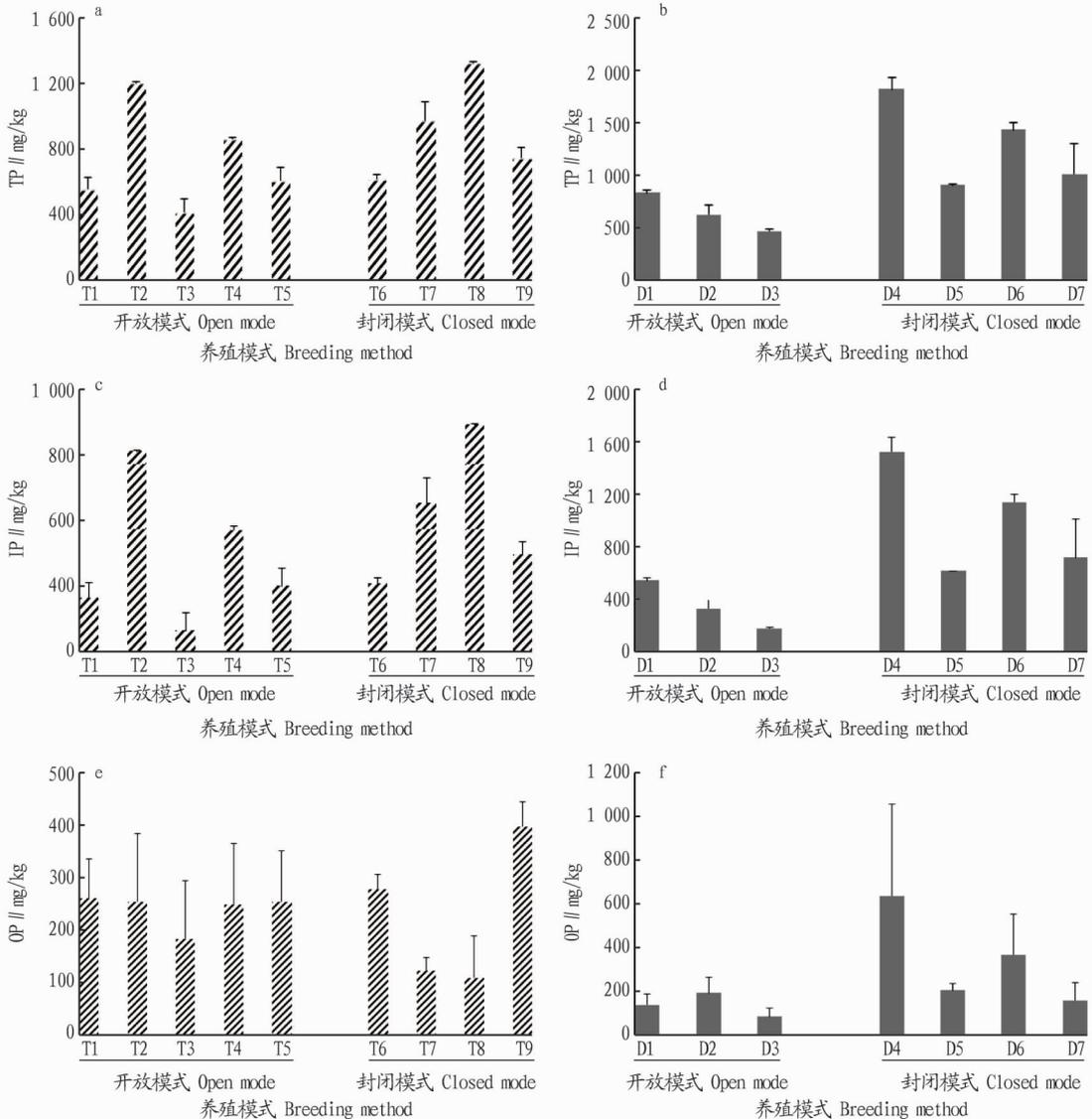


图 1 不同养殖方式下湿地土壤全磷 (TP)、有机磷 (OP) 和无机磷 (IP) 含量

Fig. 1 Total phosphorus (TP), organic phosphorus (OP) and inorganic phosphorus (IP) in wetland soil under different cultivation methods

非活性有机磷作为一种稳定性有机磷, 是有机磷中最难矿化降解的部分, 受外界环境影响最小^[20], 研究区不同养殖方式下湿地土壤与开放式鱼塘沉积物中有机磷以非活性有机磷形态为主, 且主要以 Res-Po 形式存在, Res-Po 作为湿地沉积物有机磷重要组成部分, 尤其植酸态磷作为 Res-Po 中的主要成分, 是一种重要的含磷有机化合物, 在土壤和水体沉积物中广泛存在^[21], 研究区湿地土壤中非活性有机磷含量高可能是土壤大部分为原始湿地或长年退耕土壤, 受人为活动影响较小, 土壤环境长期稳定, 而开放式下鱼塘沉积物中非活性有机磷含量高可能是因为鱼塘常与外界水体相连接, 水体经常循环更新, 沉积物受水体的扰动大, 沉积物部分活性与中活性有机磷矿化分解为非活性有机磷^[6]。封闭

式下鱼塘沉积物中有机磷以中活性有机磷为主, 且主要以 HCl-Po 形式存在, 造成该现象的原因是沉积物样点 D4 处 HCl-Po 含量高达 926.63 mg/kg, 占总有机磷的 66.43%, HCl-Po 作为中活性有机磷的主要组分, 多为易分解的大分子, 稳定性差, 在一定条件下可矿化分解为小分子的有机磷或溶解性正磷酸盐, 通常与湖泊的富营养关系密切^[22], 样点 D4 位于黄玉湿地, 受人工养殖活动强烈, 水产养殖过程中常施入大量的有机化肥, 加上封闭式养殖鱼塘的塘内水体常不与外界水体联系, 湖底沉积物受水体扰动小, 使外来有机物不断在湖底沉积, 稳定态有机磷逐渐矿化分解为非稳态有机磷, 这与李强等^[6]研究污染严重的南淝河中各形态有机磷含量较高的结果一致。

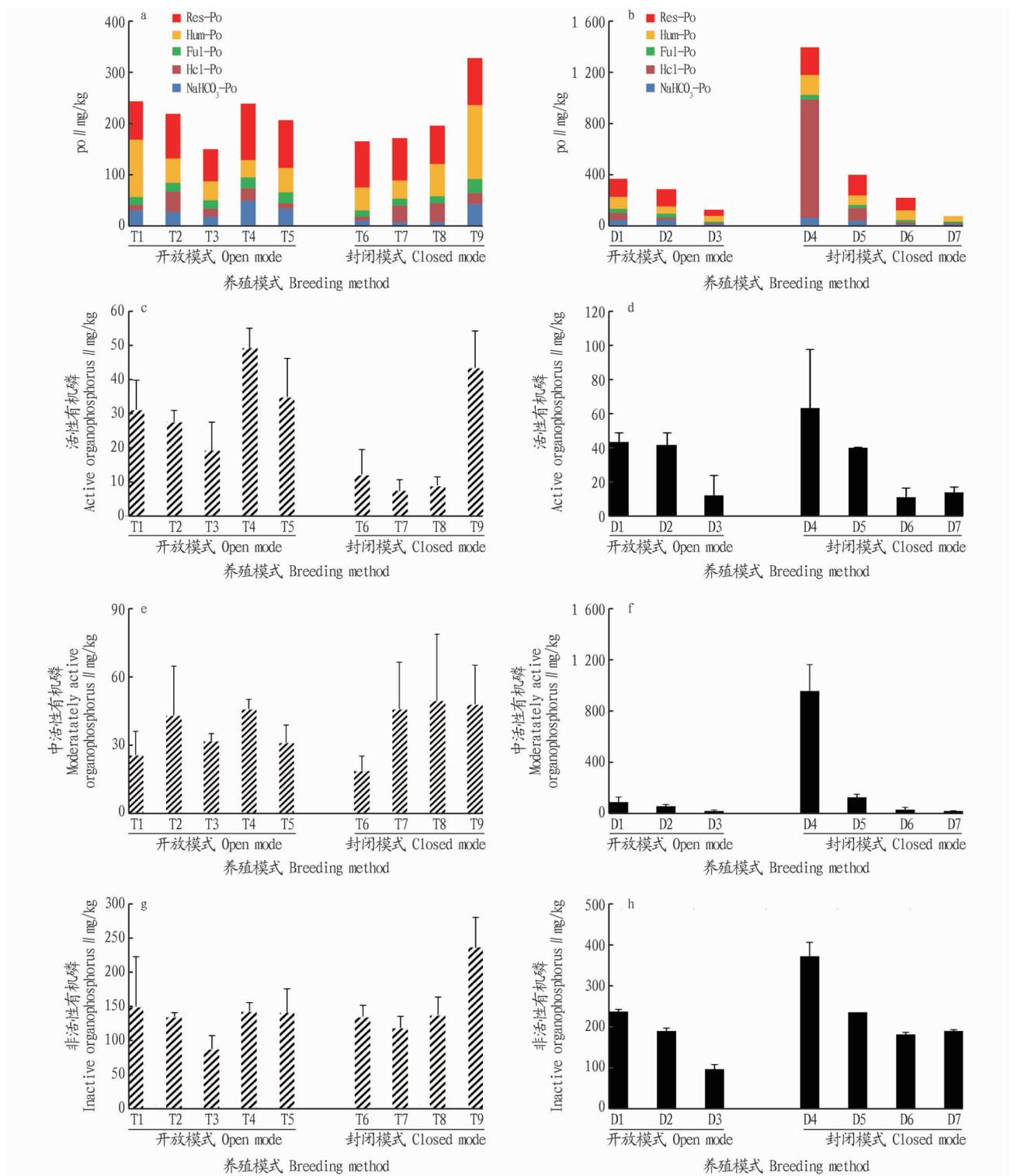


图2 不同养殖方式下湿地土壤各形态有机磷含量

Fig. 2 Organic phosphorus content of wetland soil in different culture modes

2.4 不同养殖方式下湿地土壤及鱼塘沉积物磷与环境因子的相关性分析 对不同养殖方式下湿地土壤与鱼塘沉积物磷与环境因子进行相关性分析,结果表明,pH与湿地土壤 Ful-Po、活性有机磷以及中活性有机磷呈极显著负相关,这说明 pH 的大小对湿地土壤活性与中活性有机磷影响较大,对非活性有机磷影响较小;有机质与湿地土壤活性有机磷呈显著正相关,这表明有机质作为土壤中有机磷的重要载体,

能够有效促进有机磷形态向活性有机磷的转化^[23];有效磷与湿地土壤 TP、IP 呈显著正相关,与鱼塘沉积物非活性有机磷、OP、HCl-Po、Hum-Po 和中活性有机磷呈显著正相关性;铵态氮与鱼塘沉积物 TP、IP 以及湿地土壤 OP、活性、中活性有机磷呈显著正相关关系,说明湿地 N 与 P 具有一定的正相关性,N、P 等营养元素的输入会有效提高有机磷各形态的含量^[24];磷酸酶与湿地土壤 IP、Ful-Po,鱼塘沉积物 HCl-Po、

Hum-Po、活性、中活性以及非活性有机磷均呈显著正相关,植酸酶与湿地土壤 TP、IP 呈显著负相关,与鱼塘沉积物 OP

呈极显著正相关,这表明土壤酶活性能直接影响有机磷的分解转化及其生物有效性(表 4)^[17]。

表 4 不同养殖方式下湿地土壤及鱼塘沉积物磷与环境因子的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil phosphorus and environmental factors in wetland under different cultivation methods

因子 Factor	样地 Sample plot	pH	OM	AP	AN	铵态氮 Ammonium nitrogen	磷酸酶 Phosphatase	植酸酶 Phytase
TP	T	0.374	-0.186	0.792*	-0.190	-0.397	-0.536	-0.706*
	D	0.350	0.074	0.856*	-0.085	0.803*	0.573	-0.130
IP	T	0.374	-0.186	0.792*	-0.190	-0.397	-0.536	-0.706*
	D	0.350	0.074	0.856*	-0.085	0.803*	0.573	-0.130
OP	T	-0.584	0.462	-0.372	-0.035	0.750*	0.802**	0.231
	D	0.612	0.002	0.930**	0.720	0.626	-0.376	0.932**
HCl-Po	T	0.216	-0.402	0.617	-0.349	-0.330	-0.530	-0.619
	D	0.688	0.241	0.975**	0.046	0.44	0.786**	-0.416
Ful-Po	T	-0.712*	0.626	-0.643	-0.588	0.414	0.792*	0.267
	D	0.327	0.608	0.440	-0.132	0.154	0.685	-0.651
Hum-Po	T	-0.166	0.336	-0.284	-0.288	0.193	0.475	-0.030
	D	0.479	0.357	0.907**	-0.061	0.682	0.868*	-0.565
Res-Po	T	-0.385	0.507	0.004	0.057	0.549	0.358	-0.007
	D	0.288	0.643	0.717	0.033	0.218	0.705	-0.107
活性有机磷 Reactive organic phosphorus	T	-0.866**	0.676*	-0.565	-0.497	0.741*	0.606	0.513
	D	0.458	0.620	0.630	-0.021	0.133	0.784*	-0.592
中活性有机磷 Moderately active organic phosphorus	T	-0.904**	0.384	-0.443	-0.558	0.732*	0.512	0.456
	D	0.667	0.257	0.972**	0.040	0.437	0.795*	-0.430
非活性有机磷 Inactive organic phosphorus	T	-0.234	0.508	-0.162	-0.216	0.305	0.646	-0.218
	D	0.398	0.562	0.861*	-0.008	0.450	0.836*	-0.327

注:“T”表示土壤,“D”表示鱼塘沉积物;*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关;**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关

Note:“T” referred to soil,“D” referred to sediment;* referred to significant correlation at $P<0.05$ level;** referred to significant correlation at $P<0.01$ level

3 结论

(1) 渔业养殖下湿地土壤营养元素的含量相对较高,大部分营养元素均呈沉积物高于土壤的分布特征,磷酸酶以及植酸酶则表现出土壤高于沉积物的分布特征,不同养殖方式下湿地土壤除有机质、植酸酶外,其他营养元素均呈封闭式高于开放式特征。

(2) 渔业养殖下湿地土壤的磷含量较高,其中湿地土壤达中度污染,湿地鱼塘沉积物达严重污染,且不同养殖方式下湿地土壤和沉积物磷含量均表现为封闭式高于开放式分布特征。不同养殖方式下湿地土壤各形态有机磷活性方面均表现为非活性>中活性>活性,Res-Po 为有机磷主要组成部分;湿地鱼塘沉积物在开放式下与湿地土壤的变化趋势一致,封闭下表现为中活性>非活性>活性,HCl-Po 为有机磷主要组分,造成该现象产生原因是底泥样点 D4 处 HCl-Po 含量高达 926.63 mg/kg,占有机磷的 66.43%。

(3) 湿地土壤及鱼塘沉积物中营养元素对各形态有机磷的含量及分布产生显著影响,其中,pH 与湿地土壤 Ful-Po、活性有机磷以及中活性有机磷呈极显著负相关;有机质与湿地土壤活性有机磷呈显著正相关;有效磷与湿地土壤 TP、IP 呈显著正相关,与鱼塘沉积物非活性有机磷、OP、HCl-Po、Hum-Po 和中活性有机磷呈显著正相关性;铵态氮与鱼塘沉积物 TP、IP 以及湿地土壤 OP、活性、中活性有机磷呈显著正相关,表明 N、P 等营养元素的输入会有效提高有机磷各形态

的含量;磷酸酶与湿地土壤 IP、Ful-Po,鱼塘沉积物 HCl-Po、Hum-Po、活性、中活性以及非活性有机磷均呈显著正相关,植酸酶与湿地土壤 TP、IP 呈显著负相关,与鱼塘沉积物 OP 呈极显著正相关,土壤酶活性能直接影响有机磷的分解转化及其生物有效性。

参考文献

- [1] 王兆德,郑洪福,姚菊祥,等.太湖流域南区湿地磷状况及其滞留能力[J].湖泊科学,2009,21(1):53-60.
- [2] TWEEL A W, BOHLEN P J. Influence of soft rush (*Juncus effusus*) on phosphorus flux in grazed seasonal wetlands[J]. Ecological engineering, 2008,33(3/4):242-251.
- [3] DELGADO-BAQUERIZO M, MAESTRE F T, GALLARDO A, et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands[J]. Nature, 2013,502(7473):672-676.
- [4] 李洁,张文强,金鑫,等.环渤海滨海湿地土壤磷形态特征研究[J].环境科学学报,2015,35(4):1143-1151.
- [5] 杨富亿,文波龙,李晓宇,等.达里诺尔湿地水环境和鱼类多样性调查 III.达里湖水体中的氮和磷含量及分布[J].湿地科学,2021,19(1):47-58.
- [6] 李强,尹俊华,席北斗,等.巢湖入湖河流沉积物中有机磷的形态分级研究[J].环境工程学报,2014,8(2):441-447.
- [7] 徐小雨.菜子湖群大型底栖动物的群落结构研究[D].合肥:安徽大学,2010.
- [8] 王钟,范中亚,杨忠勇,等.“引江济淮”工程对安徽菜子湖水龄分布的影响[J].湖泊科学,2018,30(6):1576-1586.
- [9] 刘文静,张平究,董国政,等.不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化[J].生态学报,2014,34(10):2654-2662.
- [10] 包先明,程新锋,纪磊,等.不同退耕年限下菜子湖湿地土壤酶活性变化[J].土壤,2016,48(4):692-697.

(下转第 120 页)

于其他试验组;10月10—25日,F组克氏原螯虾的特定生长率也最高。这表明离子钙能刺激小龙虾蜕壳生长,但会降低克氏原螯虾培育的成活率和繁殖力。但是,9月10日至9月25日,F组克氏原螯虾的特定生长率迅速下降,可能与试验玻璃缸面积空间小,导致蜕壳虾遭到其他虾残食有关。

表3 不同时间段各组克氏原螯虾的特定生长率

Table 3 Specific growth rate of *P. clarkii* in each group in different time periods %/d

组别 Group	日期 Date				
	08-25— 09-10	09-10— 09-25	09-25— 10-10	10-10— 10-25	08-25— 10-25
A	1.762	0.276	0.339	0.299	0.669
B	1.793	0.110	-0.022	0.771	0.663
C	1.094	0.384	0.984	-0.255	0.552
D	1.943	0.535	0.436	0.060	0.743
E	1.529	-0.145	0.861	0.691	0.734
F	2.546	-0.638	0.270	1.496	0.918
G	2.186	-0.127	1.438	-0.516	0.745

表4 各组克氏原螯虾抱卵率和成活率

Table 4 The spawning rate and survival rate of *P. clarkii* in each group %

组别 Group	抱卵率 Spawning rate	成活率 Survival rate
A	62.5	76.7
B	61.5	72.2
C	71.0	72.2
D	62.2	84.4
E	58.9	62.1
F	58.3	63.6
G	81.6	70.0

V_C 作为甲壳动物的一种必需添加素,可通过多种途径影响其机体的生长发育、健康和繁殖,如 V_C 可激活吞噬细胞,使之发挥更大的吞噬能力,而吞噬作用在甲壳动物免疫防御中具有极其重要的意义^[10-12]。该试验中拌喂 V_C +EM 菌的 D 组和拌喂 V_C 的 A 组试验虾的成活率分别为 84.4% 和 76.7%,明显高于其他试验组。这表明高温季节 V_C 可增

强克氏原螯虾的免疫力和抗应激能力,提高其养殖成活率。田立立等^[7]认为,饲料中添加适量的维生素 C (120 mg/kg) 可以促进克氏原螯虾的生长,提高机体免疫和抗氧化能力。艾春香等^[13]认为,饲料中添加 0.5%~1.0% 的 V_C 可以有效增强河蟹的非特异性免疫能力。

该试验中不喷喂任何功能性添加剂的 G 组喂养试验虾抱卵率最高,拌喂 EM 菌的 C 组次之,表明 6 种功能性添加剂对于提高克氏原螯虾的繁殖力不具有积极作用。

4 结论

在高温和克氏原螯虾繁殖季节,适量拌喂离子钙可以有效促进克氏原螯虾的生长速度;拌喂 V_C 和 EM 菌可以提高克氏原螯虾的成活率;用于繁殖的克氏原螯虾,无须喂养任何功能性添加剂,就可以取得不错的繁殖效果。

参考文献

- [1] 周鑫,徐增洪,赵朝阳.克氏原螯虾人工繁殖及无公害养殖技术(二)[J].科学养鱼,2009(2):12-14.
- [2] 方春林,邓勇辉,余智杰,等.克氏原螯虾生物学特性的研究[J].江西水产科技,2010(3):18-20.
- [3] 刘其根,李应森,陈蓝荪.克氏原螯虾的生物学[J].水产科技情报,2008,35(1):21-23.
- [4] 徐进,魏开金,徐滨,等.克氏原螯虾对高温应激的生理学响应[J].淡水渔业,2017,47(6):9-13.
- [5] 洪徐鹏,陆宏达,张庆华,等.黄芪多糖对克氏原螯虾抗白斑综合征病毒(WSSV)感染的效果研究[J].上海海洋大学学报,2014,23(3):423-428.
- [6] 洪徐鹏,夏思瑶,唐嘉苒,等.黄芪多糖对克氏原螯虾生长和非特异性免疫指标的影响[J].上海海洋大学学报,2013,22(4):571-576.
- [7] 田立立,王金娟,孟祥龙,等.维生素 C 对克氏原螯虾生长及非特异性免疫机能的影响[J].水产养殖,2021,42(6):29-34.
- [8] 张秀霞,汪蕾,李军涛,等.饲料添加光合细菌对红螯螯虾幼虾生长、消化酶活力与免疫力的影响[J].饲料研究,2021,44(6):62-65.
- [9] BOURGET E,CRISP D J. Factors affecting deposition of the shell in *Balanus balanoides*(L.)[J]. Journal of the marine biological association of the UK, 1975,55:231-249.
- [10] BACHÈRE E,MIALHE E,NOËL D,et al. Knowledge and research prospects in marine mollusc and crustacean immunology [J]. Aquaculture, 1995,132(1/2):17-32.
- [11] VADSTEIN O. The use of immunostimulation in marine larviculture: Possibilities and challenges [J]. Aquaculture, 1997,155(1/2/3/4):401-417.
- [12] SMITH V J, CHISHOLM J R S. Non-cellular immunity in crustaceans [J]. Fish & shellfish immunology, 1992,2(1):1-31.
- [13] 艾春香,陈立侨,高露霞,等. V_C 对河蟹血清和组织中超氧化物歧化酶及磷酸酶活性的影响[J]. 台湾海峡,2002,21(4):431-438.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 曲博,李敏,其美,等. 外源植酸酶对野鸭湖湿地土壤有机磷转化的影响研究[J]. 生态环境学报,2015,24(2):250-254.
- [16] 彭沛林,叶华香,臧淑英,等. 扎龙湿地克钦湖表层沉积物中有机质、全氮和全磷含量分布特征[J]. 湿地科学,2021,19(1):110-116.
- [17] 朱芸芸,李敏,曲博,等. 湿地植物根际土壤磷酸酶活性变化规律研究[J]. 环境科学与技术,2016,39(10):106-112.
- [18] 刘鸣亮,金相灿,荆一凤. 湖泊底泥环境疏浚工程技术 [J]. 中国工程科学,1999,1(1):81-84.
- [19] 谢莹,肖蓉,崔圆,等. 黄河三角洲天然和恢复盐沼土壤磷分布特征 [J]. 湿地科学,2015,13(6):735-743.
- [20] 马双丽,倪兆奎,王圣瑞,等. 鄱阳湖沉积物有机磷形态及对水位变化响应 [J]. 环境科学学报,2016,36(10):3607-3614.
- [21] SUZUMURA M, KAMATANI A. Mineralization of inositol hexaphosphate in aerobic and anaerobic marine sediments: Implications for the phosphorus cycle [J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1995,59(5):1021-1026.
- [22] 梁海清. 湖泊沉积物有机磷、有机碳形态及其迁移、转化 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [23] 李楠,单保庆,张洪,等. 北运河下游典型灌渠沉积物有机磷形态分布特征 [J]. 环境科学,2010,31(12):2911-2916.
- [24] 韩年,袁旭音,周慧华,等. 洪泽湖入湖河流沉积物有机磷分布特征及外源输入对其形态转化的影响 [J]. 湖泊科学,2020,32(3):665-675.

(上接第 75 页)