

开放与封闭渔业养殖方式下菜子湖湿地土壤重金属元素组成特征

张经纬¹, 张平究^{1*}, 杨艳芳², 王鑫鑫¹, 陈芳¹, 张金花¹ (1. 安徽师范大学, 地理与旅游学院/江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 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 28 个采样点 2 种渔业养殖方式(开放和封闭)下的土壤及底泥样品为研究对象, 用 X 射线原子荧光光谱仪测定沉积物中 P、S 及重金属元素的含量。采用地累积指数和化学元素背景值对菜子湖湿地土壤污染现状进行评价, 探讨渔业养殖方式对重金属污染物分布的影响。结果表明, 菜子湖湿地土壤呈弱酸性, 土壤较底泥偏酸; 底泥和土壤中全磷含量均处 3 级以上水平, 且封闭式下各样点磷含量大于开放式; 全硫含量分布与养殖方式之间未表现出明显联系。菜子湖湿地底泥中 Zn、Cu、Mn、As 含量高于土壤底泥样品, 开放式下 Zn、Cu、Mn、As 含量均显著低于封闭式, Pb、Cu、Cr、Ni 含量则略高于封闭式。通过对菜子湖湿地重金属的污染状况进行评价, 发现底泥样品中 Zn、Cu、Cr、Ni 含量均小于长江沉积物重金属元素背景值, 未出现污染状况; 土壤样品中除 Ni、Mn 外, Zn、Pb、Cu、Cr、As 含量均超过安徽土壤背景值。

关键词 渔业养殖方式; 天然湿地; 重金属; 组成特征; 污染评价

中图分类号 S154.1

文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)17-0077-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.17.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Composition Characteristics of Heavy Metal Elements in the Soil of Caizi Lake Wetland under Open and Closed Fisheries

ZHANG Jing-wei¹, ZHANG Ping-jiu¹, YANG Yan-fang² et al (1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University / Jianghuai River Basin Surface Process and Regional Response Anhui Provincial Key Laboratory, Wuhu, Anhui 241003; 2. School of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003)

Abstract Soil and sediment samples under two fishery culture methods (open and closed) in 28 sampling points of Caizi Lake wetland were taken as the research object. The P, S and heavy metals in the sediment were determined by X-ray atomic fluorescence spectrometry. The geo-accumulation index and the background value of chemical elements were used to evaluate the current status of soil pollution in Caizi Lake wetland, and the influence of fishery culture methods on the distribution of heavy metal pollutants was discussed. The results showed that the soil of the Caizi Lake wetland was weakly acidic, and the soil was more acidic than the sediment. The total phosphorus content in the sediment and soil was above level 3, and the phosphorus content in every sample under the closed system was greater than that in the open system. There was no obvious relationship between the distribution of total sulfur content and the culture methods. The content of Zn, Cu, Mn and As in the sediment of the Caizi Lake wetland was higher than that of the soil sediment sample. The content of Zn, Cu, Mn and As in the open type was significantly lower than that in the closed type, and the content of Pb, Cu, Cr and Ni was slightly higher than the closed type. By evaluating the pollution status of heavy metals in the Caizi Lake wetland, it was found that the content of Zn, Cu, Cr and Ni in the sediment samples was less than the background value of heavy metal elements in the sediments of the Yangtze River, and no pollution occurred. In addition to Ni, Mn, Zn in soil samples, the average contents of Zn, Pb, Cu, Cr and As exceeded the Anhui soil background value.

Key words Fishery culture methods; Natural wetland; Heavy metal; Composition characteristics; Pollution assessment

湿地是陆地无机离子及有机质通过径流进入水体的最后一道屏障, 是水陆相互作用下形成的独特生态系统, 对营养物质的吸收、转化与固持有较高效率^[1]。湿地渔业养殖是人类对于湿地功能的有效利用, 合理的养殖方式不仅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重要支持, 而如今由于不科学的管理与人类生产生活的影响, 出现湿地水体生境破碎、大量湖泊被层层围网包围、湖泊水体富营养化、重金属含量超标等问题^[2]。

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 年代湖区开始大规模围垦, 到 20 世纪 80 年代开始退耕还湖, 且不同退耕还湖区因地制宜, 选择性恢复为自然湿地或自然水域进行渔业养殖^[3]。2019 年初, 国家有关部门制定了《长江流域重点水域禁捕和建立补偿制度实施方案》, 提出 2019 年底前完成水生生物保护区渔民退捕, 禁捕期暂定实行 10 年^[4]。当前已有

学者对不同退耕年限下菜子湖湿地土壤铁形态变化、湿地土壤活性铝形态变化、湿地土壤铜和锌形态变化及湿地土壤和相关酶活性变化等进行了一定研究, 但对退耕还湖后人类渔业养殖及方式的差异对菜子湖湿地土壤重金属的影响研究较缺乏^[5-8]。笔者分别对菜子湖不同区域开放与封闭 2 种养殖方式下禁捕令实施前湿地土壤样品进行采集, 对样品 pH、P、S、重金属元素含量进行测定, 研究湿地土壤养殖方式差异与湿地土壤 P、S、重金属元素组成间联系, 为合理利用湿地功能和对当前湿地污染的评估与治理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 安庆市菜子湖(116°07'~117°44'E, 29°50'~30°58'N)位于长江中下游北岸, 为安庆市九大通江湖泊之一, 所辖水域(监测断面)为桐城龙眼河、菜子湖、嬉子湖、白兔湖等^[9]。菜子湖湖区地貌以丘陵和冲积平原为主, 年平均气温 16.6℃, 年平均降水量 1 325.5 mm, 平均水深 1.76 m, 属浅水型漫滩湖泊, 湖区主体属亚热带季风气候, 夏季炎热潮湿, 冬季寒冷干燥。研究区自 1958 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, 指天然的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

基金项目 国家自然科学基金项目(41301249)。
作者简介 张经纬(1997—), 男, 安徽六安人, 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 2020-02-24

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、细叶藁等,存在部分放牧行为。

1.2 样品采集 以安庆菜子湖湿地土壤为研究对象,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(具体采样点见图1),分别选取湿地土壤中湖边出露水面的土壤和湖底淤泥各14个采样点,土壤样品命名为T1~T14,底泥样品命名为D1~D14,一个采样点由3个混合样混合。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,所有样品用聚乙烯塑料袋密封编号,底泥样品需在装有冰袋的冷藏箱临时存储,然后带回实验室。样品采集按开放和封闭养殖方式划分为两类,土壤采样点中T1、T2、T4、T7、T9、T10、T11、T12、T13、T14处于开放式,采样点T3、T5、T6、T8处于封闭式,同时T3于近几年改养殖珍珠,T6可能养殖龙虾;底泥采样点中D2、D3、D8、D10、D12、D14处于开放式,采样点D1、D4、D5、D6、D7、D9、D11、D13处于封闭式,且D4样点中含有人工输入的鸡粪等(有机肥料),D13样点养殖珍珠。

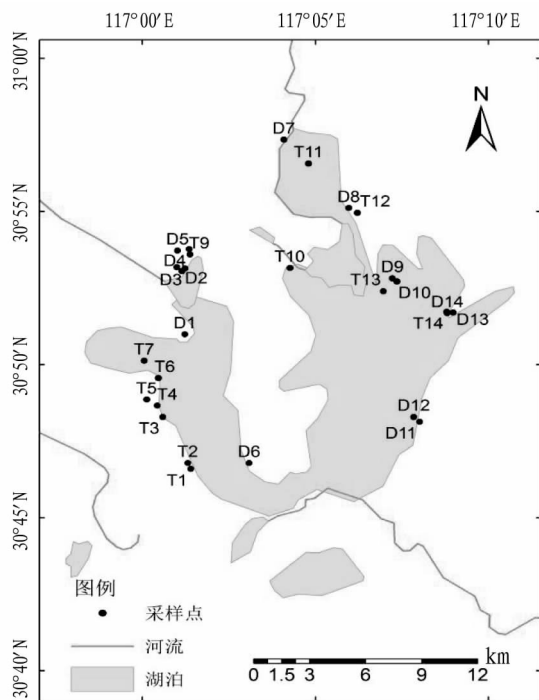


图1 采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling sites

1.3 样品分析 将采集的样品自然风干后挑去肉眼可见的细根、砾石等杂物,均匀混合后研磨,一部分过2 mm筛,进行样品pH测定,样品pH采用水土比2.5:1浸提Mettler Toledo pH计测定。另一部分采用X射线荧光光谱(XRF)仪器测定底泥和土壤样品中全磷、全硫、重金属元素含量,将保存好的底泥及土壤样品经冷冻干燥机干燥,研磨,过200目筛,然后分别取各个采样点样品5 g左右置于用粉末压片机压成塑料薄片,装袋标号待测,将压好的塑料薄片置于X荧光光谱仪(XRF)上的样品杯中,工作曲线设为土壤重金属,逐个进行

定量检测。

1.4 数据统计分析 采用Excel 2003软件对数据进行分析处理,采用SPSS 22.0进行单因素方差和相关性分析,利用Origin 9.0软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 湿地土壤pH、全磷、全硫含量分布特征

2.1.1 pH. 对研究区中各采样点的底泥和土壤进行pH测定,不同养殖方式下菜子湖流域底泥及土壤pH分布特征如图2所示,总体呈弱酸性,底泥pH略高于土壤pH,底泥pH平均值为6.37,土壤pH平均值为5.37。不同养殖方式下底泥及土壤间pH均表现出显著差异,开放式pH略低于封闭式,底泥与土壤开放式pH平均值分别为6.13、5.24,封闭式下分别为6.55、5.70。由此可见,菜子湖湿地土壤封闭与开放方式下pH呈弱酸性,符合安徽省南酸北碱的分布规律。湿地土壤常年或季节性积水厌氧环境中,表面覆盖的枯枝落叶分解较慢,累积产生腐殖酸,使水体及表层土壤处于弱酸性环境,底泥样品长期处于还原性环境,还原性的Fe、Mn等消耗 H^+ ,导致土壤样品较底泥样品偏酸性^[10-11]。

2.1.2 全磷. 从图3可以看出,菜子湖全磷含量总体偏高,底泥和土壤平均值分别为1 033.69、693.81 mg/kg,参照全国第二次土壤普查标准底泥达一级极丰富水平,土壤达3级中等水平。全磷含量表现为封闭式高于开放式、底泥含量高于土壤的分布特征,推测可能是因为封闭的养殖方式受人类活动影响更大,含磷的饲料、药品及其他污染物大量排入水体,使磷元素在湖底底泥富集。封闭式下各采样点全磷含量差异显著。封闭式下的D4、D5达到较高值,其中D4位于黄玉湿地区域,调查发现其鱼塘养殖过程中存在人工施用有机肥(鸡粪),由于水产养殖过程中养殖对象的粪便、排泄物、尸体,以及投放至水体中的部分未被取食的饵料,沉淀到底泥中导致底泥全磷较高^[12]。

2.1.3 全硫. 从图4可以看出,菜子湖底泥和土壤全硫含量与养殖方式间无明显联系,各采样点间硫元素含量差异性显著,其中,底泥样品含量为183.7~1 047.0 mg/kg,封闭式中的D11全硫含量达到了D7、D10的5倍,土壤样品全硫含量为217.33~1 209.66 mg/kg。刘崇群^[13]测得我国南方土壤硫含量在0.001%~0.072%,结果显示除T1、T12、T13、T14、T8外各样点硫含量均在此范围内。

2.2 湿地土壤重金属元素分布特征及污染评价 湿地土壤中的重金属主要由矿物颗粒携带或以矿物的形式通过生物、化学、物理作用进行迁移和沉淀,进而富集在沉积物中。菜子湖湿地底泥与土壤中重金属的分布特征见表1~2。从表1~2可以看出,菜子湖湿地底泥中Zn、Cu、Mn、As含量高于土壤。不同养殖方式下的底泥和土壤重金属含量均存在显著差异,底泥样品中开放式Zn、Cu、Mn、As含量均低于封闭式,Pb、Cu、Cr、Ni含量则略高于封闭式。土壤样品中Mn含量封闭式下显著高于开放式,其他重金属2种养殖方式下未表现出显著差异。不同区域样点重金属含量也存在显著差异,底泥样品中封闭式下D4的Zn、Cr、As含量高于其他样

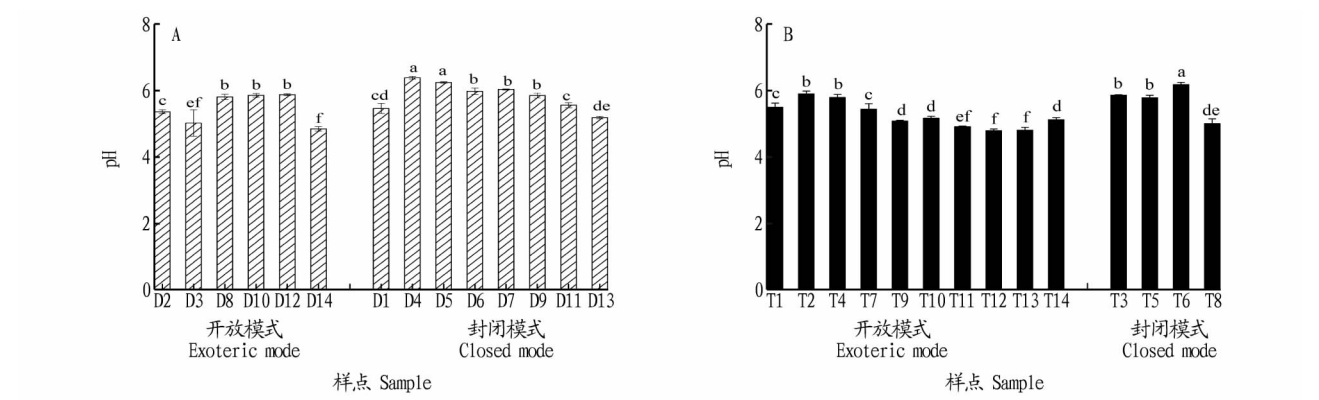


图2 菜子湖湿地各采样点的底泥(A)和土壤(B)pH分布
Fig.2 pH distribution of sediment (A) and soil (B) at each sampling site of the Caizi Lake wetland

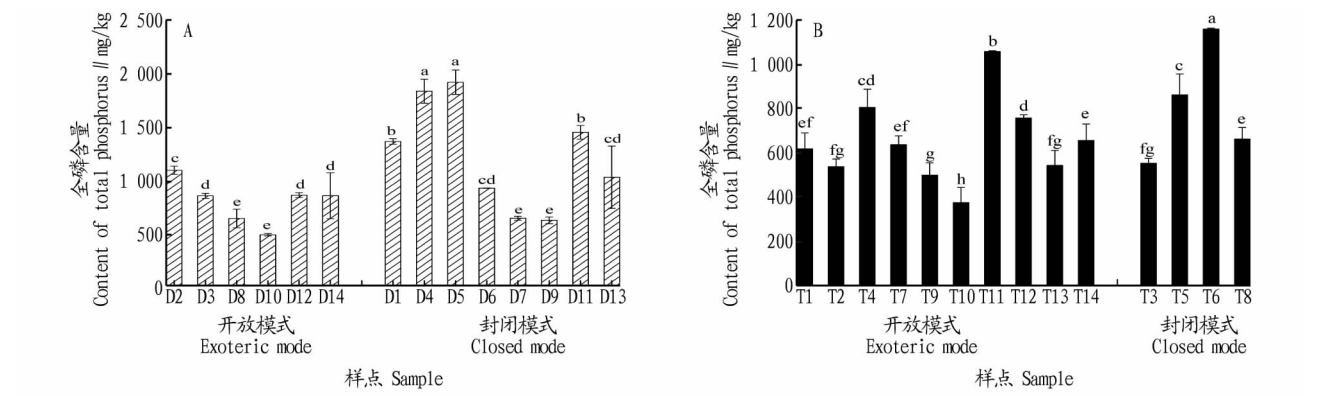


图3 菜子湖湿地各采样点的底泥(A)和土壤(B)全磷分布
Fig.3 Total phosphorus distribution of sediment (A) and soil (B) at each sampling site of the Caizi Lake wetland

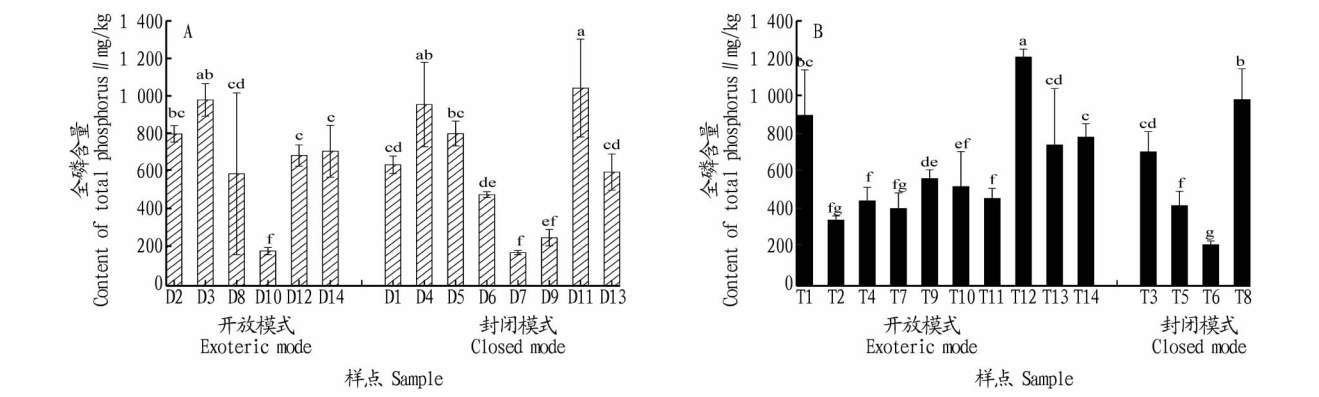


图4 菜子湖湿地各采样点的底泥(A)和土壤(B)全硫分布
Fig.4 Total sulfur distribution of sediment (A) and soil (B) at each sampling site of the Caizi Lake wetland

品,分别为122、96.3、30.7 mg/kg;开放式下D10的Zn、Pb、Cu、Cr、Ni、As含量均显著低于其他样品,分别为49、20.7、18.7、65.7、22.3、7.0 mg/kg。土壤样品中T₄的Cr、Mn、As含量远高于其他样品,分别达124.3、1316.3、42.3 mg/kg;而封闭式下T₆的Pb、As含量低于其他样品,分别为22.7、5.7 mg/kg,Zn、Ni含量高于其他样品,分别为116.51 mg/kg。

为判断安庆菜子湖湿地底泥及土壤污染状况,该研究采用地累积指数法作为评价标准。地累积指数是目前在国内外有着广泛应用的一种研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,由德国科学家Müller提出,该方法尤其适用于现代沉积物中重金属污染的评价,其计算公式见文献[14–15],地

累积指数与污染程度如表3所示。湿地底泥的重金属背景值取长江流域沉积物重金属背景值,湿地土壤重金属背景值取安徽土壤重金属背景值^[16–17]。

根据地累积指数计算出各重金属的 I_{geo} 值,见表1,根据计算结果并结合重金属元素地球化学背景值,对其污染状况进行分析。底泥样品中Zn、Cu、Cr、Ni含量均小于长江沉积物重金属元素背景值,且除As外,其他重金属元素的 I_{geo} 值均小于0,变异系数均小于40%,根据表3可知,菜子湖湿地除D₄、D₁₁外各样点底泥均未出现污染状况且重金属含量离散程度小,空间分布相对均匀;封闭式下的D₄、D₁₁样点的As元素 I_{geo} 值分别为0.4、0,属轻度污染状况。土壤样品中

表 1 菜子湖湿地底泥中重金属含量及地累积指数 I_{geo}
Table 1 Heavy metal contents and I_{geo} in sediments of the Caizi Lake wetland

养殖方式 Breeding methods	样点 Sampling site	Zn		Pb		Cu		Cr		Ni		Mn		As	
		含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}
开放模式 Exoteric mode	D2	95	-1.2	25.7	-0.7	31.7	-1.4	83.0	-0.6	33.7	-4.2	872.0	-0.5	15.0	-0.6
	D3	106	-1.0	29.0	-0.5	35.7	-1.3	93.7	-0.4	43.0	-3.8	863.7	-0.5	18.0	-0.3
	D8	70	-1.6	28.7	-0.5	30.0	-1.5	84.3	-0.6	34.7	-4.1	214.0	0	17.0	-0.4
	D10	49	-2.1	20.7	-1.0	18.7	-2.2	65.7	-1.0	22.3	-4.8	542.7	-1.2	7.0	-1.7
	D12	91	-1.2	31.7	-0.4	43.0	-1.0	84.0	-0.6	34.3	-4.2	854.7	-0.5	19.0	-0.2
	D14	79	-1.5	27.0	-0.6	32.0	-1.4	77.7	-0.7	31.0	-4.3	680.3	-0.9	20.0	-0.2
封闭模式 Closed mode	D1	96	-1.2	26.7	-0.6	23.3	-1.9	67.7	-0.9	32	-4.3	963.0	-0.4	8.0	-1.5
	D4	122	-0.8	28.3	-0.5	32.3	-1.4	96.3	-0.4	31.3	-4.3	924.0	-0.4	30.7	0.4
	D5	120	-0.8	29.0	-0.5	33.0	-1.4	86.3	-0.6	34.3	-4.2	981.0	-0.3	13.0	-0.8
	D6	121	-0.8	35.0	-0.2	36.0	-1.2	86.3	-0.6	40.0	-3.9	872.0	-0.5	16.0	-0.5
	D7	55	-2.0	25.0	-0.7	19.0	-2.2	58.0	-1.1	22.7	-4.8	660.0	-0.9	13.0	-0.8
	D9	69	-1.6	26.7	-0.6	27.3	-1.6	72.7	-0.8	29.7	-4.4	535.0	-1.2	13.0	-0.8
	D11	87	-1.3	27.7	-0.5	33.7	-1.3	85.7	-0.6	30.7	-4.3	1033.0	-0.3	22.0	0
	D13	78	-1.5	25.3	-0.7	31.0	-1.5	84.3	-0.6	30.7	-4.3	751.0	-0.7	26.0	0.2
平均值 Mean		88.4	-1.3	27.6	-0.6	30.4	-1.5	80.4	-0.7	32.2	-4.3	839.0	-0.6	16.9	-0.5
标准偏差 SD		23.5	0.4	3.3	0.2	6.6	0.3	10.8	0.2	5.5	0.3	190.0	0.3	6.5	0.6
变异系数 CV//%		26.5	-0.3	12.0	-0.3	21.7	-0.2	13.5	-0.3	17.2	-0.1	23.0	-0.6	37.9	-1.1
长江沉积物重 金属元素背景值 Background values of heavy metal elements in the Yangtze River sediments		144.00		26.95		57.04		84.71		40.93		828.90		15.00	

表 2 菜子湖湿地土壤中重金属含量及地累积指数 I_{geo}
Table 2 Heavy metal concentrations and I_{geo} in soils of the Caizi Lake wetland

养殖方式 Breeding methods	样点 Sampling site	Zn		Pb		Cu		Cr		Ni		Mn		As	
		含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}	含量 Content mg/kg	I_{geo}
开放模式 Exoteric mode	T1	112	0.2	36.7	0.0	37.0	-0.2	89.7	-0.5	43	-0.3	507.0	-1.2	10.0	-0.8
	T2	85	-0.2	26.7	-0.5	29.0	-0.5	88.3	-0.5	36	-0.5	483.0	-1.3	19.0	0.2
	T4	75	-0.3	30.3	-0.3	24.0	-0.8	124.3	0.0	35	-0.6	316.0	0.2	42.3	1.3
	T7	58	-0.7	23.7	-0.7	21.3	-1.0	80.7	-0.6	22	-1.2	498.7	-1.2	7.0	-1.3
	T9	71	-0.4	30.0	-0.3	28.3	-0.6	83.7	-0.6	30	-0.8	563.0	-1.0	10.3	-0.7
	T10	65	-0.5	25.3	-0.6	24.0	-0.8	66.0	-0.9	25	-1.1	388.3	-1.6	10.0	-0.8
封闭模式 Closed mode	T11	96	0.0	32.3	-0.2	30.0	-0.5	57.7	-1.1	280	-0.9	1007.0	-0.2	10.0	-0.8
	T12	102	0.1	35.3	-0.1	37.3	-0.2	82.7	-0.6	39	-0.4	506.7	-1.2	13.0	-0.4
	T13	79	-0.3	34.0	-0.1	30.3	-0.5	77.3	-0.7	33	-0.7	450.0	-1.4	12.0	-0.5
	T14	108	0.2	36.3	0.0	42.0	0.0	86.3	-0.5	38	-0.5	518.0	-1.2	13.0	-0.4
	T3	73	-0.4	28.7	-0.4	29.0	-0.5	75.0	-0.7	31	-0.8	279.7	-2.0	8.7	-1.0
	T5	70	-0.4	32.7	-0.2	25.0	-0.7	122.3	0.0	28	-0.9	234.0	0.1	32.0	0.9
	T6	116	0.3	22.7	-0.7	30.7	-0.4	96.0	-0.4	51	-0.1	1061.0	-0.1	5.7	-1.6
	T8	104	0.1	37.7	0.0	34.3	-0.3	86.0	-0.5	40	-0.4	535.7	-1.1	11.3	-0.6
平均值 Mean		86.70	-0.16	30.90	-0.30	30.20	-0.49	86.90	-0.54	34.00	-0.66	667.80	-0.94	14.60	-0.46
标准偏差 SD		19.17	0.32	4.95	0.24	5.83	0.28	18.30	0.29	7.70	0.32	334.30	0.66	10.30	0.78
变异系数 CV//%		22.1	-2.0	16.0	-0.8	19.3	-0.6	21.1	-0.5	22.6	-0.5	50.0	-0.7	70.5	-1.7
安徽土壤重 金属背景值 Background value of heavy metals in Anhui soil		63.2		25.0		27.8		82.7		35.5		769.7		11.4	

表 3 地累积指数与污染程度
Table 3 I_{geo} and pollution levels

I_{geo}	等级 Level	污染程度 Pollution level
≤ 0	1	无污染
$>0\sim 1$	2	轻度
$>1\sim 2$	3	偏中度
$>2\sim 3$	4	中度
$>3\sim 4$	5	偏重
$>4\sim 5$	6	严重
$>5\sim 6$	7	极重

除 Ni、Mn 外,其他重金属的平均含量均超过安徽土壤背景值,Zn、Pb、Cu、Cr、As 分别超出安徽土壤背景值的 37.18%、23.6%、8.63%、5.08%、26.32%。各重金属的变异性从大到小依次为 As、Mn、Ni、Zn、Cr、Cu、Pb, As、Mn 的变异系数>40%,空间差异较大,部分样点可能出现点源污染。T1、T6、T8 的 Zn 元素的 I_{geo} 值分别为 0.2、0.3、0.1,均属轻度污染;T4、T5 的 Mn 元素的 I_{geo} 值分别为 0.2、0.1,属轻度污染;T2、T4、T5 的 As 元素的 I_{geo} 值分别为 0.2、1.3、0.9,T2、T5 属轻度污染,T4 样点属偏中度污染。

上述结果表明,菜子湖湿地底泥中不同养殖方式下的重金属含量有所差异,封闭式下的 Zn、Cu、Mn、As 均高于开放式,且 D4、D11 点 As 处于轻度污染。不同养殖方式下土壤重金属含量无显著差异,但空间差异较大,T1、T2、T4、T5、T6、T8

存在 Zn、Mn、As 元素轻度污染,其原因可能与部分样点区域存在放牧行为有关。重金属元素的分布受淋滤和外源物质输入的影响很大,水产养殖及畜禽饲料中可能含有重金属添加剂,未被生物利用的多数重金属则会排放到外界环境中对土壤和水体造成污染^[18]。何梦媛等^[19]研究认为畜禽粪便的施用会使农田土壤重金属在表层聚积。Zhang 等^[20]研究发现长期施用畜禽粪肥会使地表水中 Cu 的潜在风险增高。总体来看,菜子湖湿地土壤污染状况属于轻度或无污染状况,对生态环境影响较小,不会对生物产生毒性效应。

2.3 湿地土壤理化性质与重金属元素相关性分析 对湿地土壤重金属元素进行相关性分析,结果发现(表 4),底泥中 pH 与重金属元素呈不显著相关;土壤中 pH 与 Pb、Cu 呈显著负相关,而与 Cr、Mn 呈显著正相关。底泥中全磷与 Zn、Cr、Mn 呈极显著正相关,与 As 呈显著正相关;土壤中全磷与 Mn、Zn 呈极显著正相关,与 Ni 呈显著正相关。除 Pb 外,底泥中全硫与其他重金属元素均呈极显著正相关;而土壤中全硫表现出与 Pb、Cu 呈极显著正相关,而与 Mn 呈极显著负相关的趋势。除 As 外,底泥中各重金属元素间均呈显著或极显著相关,相关系数从 0.418(Cu-Mn)到 0.807(Cu-Cr)。对于土壤样品,重金属元素间相关性差异较大,如 Ni、Mn 分别与 Zn、Cu 和 Cr、As 呈极显著正相关,而与其他重金属元素相关性较低。

表 4 菜子湖湿地土壤中的重金属含量与土壤理化性质的相关性
Table 4 Correlation between heavy metal content in soil and soil physical and chemical properties in Caizi Lake wetland

元素 Element	样地 Plot	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni	Mn	As	pH	P	S
Zn	D	1.000									
	T	1.000									
Pb	D	0.704**	1.000								
	T	0.448**	1.000								
Cu	D	0.639**	0.773**	1.000							
	T	0.833**	0.697**	1.000							
Cr	D	0.743**	0.576**	0.807**	1.000						
	T	-0.031	0.058	-0.163	1.000						
Ni	D	0.733**	0.772**	0.753**	0.745**	1.000					
	T	0.863**	0.217	0.634**	0.276	1.000					
Mn	D	0.497**	0.481**	0.418**	0.545**	0.525**	1.000				
	T	0.066	-0.076	-0.289	0.656**	0.126	1.000				
As	D	0.364*	0.289	0.546**	0.704**	0.232	0.253	1.000			
	T	-0.263	0.134	-0.302	0.806**	-0.084	0.662**	1.000			
pH	D	0.182	0.188	-0.102	-0.020	-0.229	0.118	-0.050	1.000		
	T	-0.051	-0.565**	-0.348*	0.547**	0.267	0.371*	0.299	1.000		
P	D	0.744**	0.237	0.290	0.499**	0.213	0.494**	0.376*	0.295	1.000	
	T	0.474**	-0.055	0.069	0.269	0.391*	0.765**	0.134	0.272	1.000	
S	D	0.680**	0.361*	0.657**	0.800**	0.591**	0.640**	0.581**	-0.240	0.681**	1.000
	T	0.366*	0.781**	0.682**	-0.208	0.214	-0.491**	-0.198	-0.631**	-0.300	1.000

注:“D”表示底泥,“T”表示土壤,*表示相关性达显著水平($P<0.05$),**表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)
Note:“D” is sediment,“T” is soil,* indicates correlation is significant at the 0.05 level,** indicates correlation is significant at the 0.01 level

由以上结果可知,底泥中 pH 与重金属之间无相互影响,土壤的酸碱度会影响金属的迁移,pH 升高会使 Cr、Mn 稳定性增加不易发生迁移^[21]。pH 与 Pb、Cu 呈显著负相关,这

可能与这 2 种重金属适宜在酸性环境中活化有关^[22]。磷含量的增加,显著增加了底泥和土壤对 Zn、Ni、Cr、Mn、As 的吸附量,表明菜子湖湿地中这 4 种重金属与磷通过相同的污染

途径进入湿地土壤中,进入土壤中的磷素产生了更多负电荷,会进一步增加土壤对重金属的吸附^[23]。底泥中全硫与重金属均呈显著正相关,这可能与沉积物中的硫酸盐在积水环境中发生还原反应生成金属硫化物,造成微量元素和重金属元素的释放有关^[24]。对底泥重金属元素之间进行相关性分析结果显示,底泥重金属元素间除 As 外均分别呈极显著相关关系,而土壤重金属元素间相关性较为复杂,这说明底泥中 Pb、Cu、Mn、Ni、Zn、Cr 可能存在相同的污染源或相同的迁移规律^[25-26]。

3 结论

菜子湖湿地土壤 pH 呈弱酸性,底泥 pH 略高于土壤 pH,开放式下 pH 略低于封闭式。底泥中全磷含量达 1 级极丰富水平,土壤中全磷含量达 3 级中等水平,土壤及底泥全磷含量均表现为封闭式高于开放式的分布特征。菜子湖各采样点间硫元素含量差异性显著,但与养殖方式间无明显联系。

菜子湖湿地底泥中 Zn、Cu、Mn、As 含量高于土壤。开放式底泥下 Zn、Cu、Mn、As 含量均低于封闭式,Pb、Cu、Cr、Ni 含量则略高于封闭式。底泥样品中 Zn、Cu、Cr、Ni 含量均小于长江沉积物重金属元素背景值,且重金属含量离散程度小,空间分布相对均匀,大部分样点地累积指数均小于 0,属于无污染状况。土壤样品中除 Ni、Mn 外,其他重金属的平均含量均超过安徽土壤背景值,空间差异较大,部分样点出现轻度污染。

湿地土壤酸碱性、磷、硫含量均会对重金属分布产生显著影响,底泥中 pH 与重金属未表现出显著相关;土壤中 pH 与 Pb、Cu 呈显著负相关,而与 Cr、Mn 呈显著正相关。底泥中全磷与 Zn、Cr、Mn 呈极显著正相关;土壤中与 Mn、Zn、Ni 呈显著正相关。除 Pb 外,底泥中全硫与其他重金属元素均呈极显著正相关;土壤中分别与 Pb、Cu 呈极显著正相关,与 Mn 呈极显著负相关。除 As 外,底泥中各重金属元素间均呈显著或极显著相关关系,相关系数从 0.418 (Cu-Mn) 到 0.807 (Cu-Cr)。

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] 高攀.安徽菜子湖湿地植物群落结构特征及优势种生态适应性研究[D].合肥:安徽大学,2011.

(上接第 55 页)

- [7] 曾荣耀,童小兰.塔罗科血橙新系促花保果研究[J].中国果菜,2016,36(6):30-31.
- [8] 张伦德.塔罗科血橙树冠调控与促花保果技术初探[J].中国热带农业,2009(4):58-59.
- [9] 谢雪芳.塔罗科血橙及其配套栽培技术[J].果农之友,2008(2):45.
- [10] 段志坤.柑橘环割促花保果技术[J].科学种养,2012(8):23-24.

- [3] 杨艳芳,孔令柱,郑真,等.退耕还湖后湿地土壤对磷的吸附解吸特性[J].应用生态学报,2014,25(4):1063-1068.
- [4] 农业农村部、财政部、人力资源社会保障部印发《长江流域重点水域禁捕和建立补偿制度实施方案》[J].科学种养,2019(6):4.
- [5] 李云飞,杨艳芳,王娅娅,等.不同退耕年限下菜子湖湿地土壤铁形态变化[J].环境科学学报,2015,35(10):3234-3241.
- [6] 王娅娅,杨艳芳,李云飞,等.不同退耕年限下菜子湖湿地土壤活性铝形态特征[J].长江流域资源与环境,2016,25(2):307-315.
- [7] 耿慧,张平究,李云飞,等.不同退耕年限下菜子湖湿地土壤 Cu 和 Zn 形态特征[J].土壤通报,2017,48(5):1256-1263.
- [8] 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.
- [9] 章宜洁.安庆市地表水污染特征分析及防治对策[J].安庆师范学院学报(自然科学版),2012,18(1):87-90.
- [10] 卢宏亮,赵明松,刘斌寅,等.基于 Boruta-支持向量回归的安徽省土壤 pH 值预测制图[J].地理与地理信息科学,2019,35(5):66-72.
- [11] 陈晓梅.三江平原湿地营养元素分布特征及其影响因素[D].烟台:鲁东大学,2019.
- [12] 邱明红,钟才荣,胡杰龙,等.水产养殖与植被恢复对红树林湿地土壤的影响[J].湿地科学与管理,2014,10(2):33-38.
- [13] 刘崇群.中国南方土壤硫的状况和对硫肥的需求[J].磷肥与复肥,1995(3):14-18.
- [14] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geo Journal, 1969, 2(3): 109-118.
- [15] 简敏菲,李玲玉,余厚平,等.鄱阳湖湿地水体与底泥重金属污染及其对沉水植物群落的影响[J].生态环境学报,2015,24(1):96-105.
- [16] 王岚,王亚平,许春雪,等.长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J].环境科学,2012,33(8):2599-2606.
- [17] 陈兴仁,陈富荣,贾十军,等.安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J].中国地质,2012,39(2):302-310.
- [18] LU X O, WERNER I, YOUNG T M. Geochemistry and bioavailability of metals in sediments from northern San Francisco Bay[J]. Environment international, 2005, 31: 593-602.
- [19] 何梦媛,董同喜,茹淑华,等.畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J].环境科学,2017,38(4):1576-1586.
- [20] ZHANG F S, LI Y X, YANG M, et al. Copper residue in animal manures and the potential pollution risk in northeast China[J]. Journal of resources and ecology, 2011, 2(1): 91-96.
- [21] 袁兆华,吕宪国,周嘉.三江平原旱田耕作对湿地土壤理化性质的累积影响初探[J].湿地科学,2006,4(2):133-137.
- [22] 蔡芸霜,张建兵,陆双龙,等.洲岛土壤重金属分布特征及风险评价[J].江苏农业科学,2020,48(2):247-256.
- [23] 张慧娟,刘云根,王妍,等.阳宗海湖滨湿地沉积物中重金属的空间分布特征[J].水生态学杂志,2017,38(2):44-50.
- [24] 刘振乾,段舜山,李爱芬,等.不同土壤水分条件下酸性硫酸盐土硫形态转化特征[J].应用生态学报,2004,15(9):1570-1574.
- [25] 易雨君,王文君,宋劫.长江中下游底泥重金属污染特征、潜在生态风险评价及来源分析[J].水利水电技术,2019,50(2):1-7.
- [26] SUNDARAY S K, NAYAK B B, LIN S, et al. Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments-A case study: Mahanadi basin, India[J]. Journal of hazardous materials, 2011, 186(2/3): 1837-1846.

- [11] 李秀姣.柑橘环割/环剥促花技术要点[J].广西园艺,2002(5):43-44.
- [12] 李进学,胡承孝,高俊燕,等.柑橘成花机理与调控研究进展[J].中国果树,2012(3):67-70.
- [13] 何绍兰,邓烈,李宜琴,等.促抑花处理对柑桔花芽分化期 N 素和氨基酸代谢的影响[J].西南农业大学学报,1995,17(6):501-505.
- [14] 李学柱,李劲,邓烈.甜橙过量结果与喷布 GA3 抑花的核酸调控[J].中国农业科学,1992,25(3):72-75.