

扎龙湿地柱状沉积物中磷的赋存特征及影响因素

张 晴

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年3月10日; 录用日期: 2025年4月4日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

沉积物中各形态的磷具有不同的环境行为, 其中磷的形态浓度是衡量湿地富营养化程度的最基本指标。扎龙湿地具有丰富的生态系统, 但近年来, 由于人为因素的影响, 以及社会经济的快速发展, 对其生态环境构成了严峻的挑战。为了对研究区沉积物中总磷及各形态磷的空间分布特征进行分析, 本文将扎龙湿地分为缓冲区, 试验区, 核心区, 使用ArcMap制作磷及各形态磷的分布图, 对扎龙湿地土壤的理化性质与土壤磷素的相关性进行分析, 探讨其影响因素。通过SMT法对扎龙湿地柱状沉积物中总磷(TP)及各形态磷进行测定, 明确各形态磷之间均呈现显著相关, 揭示出扎龙湿地表层沉积物中各形态磷间可能相互转化。实验结果显示, 无机磷(IP)含量稍高于有机磷(OP), 其中的钙结合态磷(Ca-P)和铁铝结合态磷(Fe/Al-P)赋存形态差异性不大。本研究结果有助于了解湿地生态系统的健康状况, 为湿地保护和管理提供科学依据。

关键词

扎龙湿地, 柱状沉积物, 磷, 赋存形态, 影响因素

Occurrence Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in Columnar Sediments of Zhalong Wetland

Qing Zhang

College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Mar. 10th, 2025; accepted: Apr. 4th, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Different forms of phosphorus in sediments have different environmental behaviors, and the

文章引用: 张晴. 扎龙湿地柱状沉积物中磷的赋存特征及影响因素[J]. 林业世界, 2025, 14(2): 268-278.

DOI: 10.12677/wjf.2025.142032

morphological concentration of phosphorus is the most basic indicator to measure the degree of eutrophication in wetlands. Zhalong Wetland has a rich ecosystem, but in recent years, due to the influence of human factors and the rapid development of social economy, it has posed a severe challenge to its ecological environment. In order to analyze the spatial distribution characteristics of total phosphorus and various forms of phosphorus in the sediments in the study area, this paper divided the Zhalong wetland into buffer zone, experimental area and core area, and used ArcMap to make a map of phosphorus and the distribution of phosphorus in various forms, and analyzed the correlation between the physical and chemical properties of soil and soil phosphorus in Zhalong wetland, and discussed its influencing factors. The total phosphorus (TP) and various forms of phosphorus in the columnar sediments of Zhalong wetland were determined by SMT method, and it was clear that there was a significant correlation between the various forms of phosphorus, revealing that the various forms of phosphorus in the surface sediments of Zhalong wetland may be converted to each other. The experimental results showed that the content of inorganic phosphorus (IP) was slightly higher than that of organic phosphorus (OP), and there was little difference in the occurrence morphology of calcium-bound phosphorus (Ca-P) and iron-aluminum bound phosphorus (Fe/Al-P). The results of this study are helpful to understand the health status of wetland ecosystems and provide a scientific basis for wetland conservation and management.

Keywords

Zhalong Wetland, Columnar Sediments, Phosphorus, Occurrence Morphology, Influencing Factors

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湿地作为重要的生态系统,在磷的循环、截留和转化中发挥着关键作用。湿地中的磷形态复杂多样,其分布特征受环境条件、人为活动及湿地类型的影响显著。不同湿地磷含量差异显著。哈尼梯田湿地土壤 TP 平均含量为 318.74 mg/kg [1],且在水稻收获期达到峰值;而景观表流湿地表层沉积物 TP 含量高达 504.97~893.05 mg/kg [2],可能与外源输入和颗粒沉降有关。多数湿地中 IP 占总磷的 90% 以上,如哈尼梯田 IP 占比最高达 85.95 mg/kg (休闲期) [1],珠江三角洲冲积土壤 IP 占比 91.8% [3]。IP 的主要形态为铁铝结合态和钙结合态。铁铝结合态磷易受外源输入影响,季节差异显著(如哈尼梯田中 $P < 0.05$) [1];而钙结合态磷(Ca-P)因与地质背景相关,季节变化较小。OP 占比较低(通常 $<10\%$),但在植物残体分解过程中可能增加。例如,鄱阳湖湿地植物分解会促进活性有机磷的释放[4]。此外,钙结合态磷因其稳定性,短期内较少参与循环,成为磷的长期储存形态。

扎龙湿地位于黑龙江省西部松嫩平原,是乌裕尔河尾间湖退化而成的苇草湖沼。是我国北方同纬度地区中保留最完整、最原始、最开阔的湿地生态系统,也是最具代表性的植物资源库与基因资源[5]。人类排放的废水量逐渐增加,由于当时环保意识淡薄,导致污水被排放到河流、湖泊等地,并随着流域流入湿地,加重了湿地的污染负担。湿地环境因过度开发而受到破坏。我国湿地正面临着水体富营养化问题[6],这已经成为湿地环境面临的巨大挑战[7]。

沉积物是湿地生态系统的不可或缺的部分,也是湿地富营养物质的地球化学循环的重要环节与界面[8]。沉积物中磷赋存特征影响着湿地的生态结构与功能,本研究聚焦扎龙湿地生态脆弱区沉积物磷形态特征研究[9],重点解析湿地土壤中磷元素的赋存形态及其环境驱动因素[10]。通过系统分析磷素的空间

分布格局与形态转化规律,旨在阐明该元素在湿地生态系统中的迁移路径及其生态效应,为区域磷循环机制研究提供基础数据支撑,同时为湿地保护与生态管理决策制定提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

扎龙湿地位于黑龙江省松嫩平原乌裕尔河与双阳河下游湖沼区域(46°52'~47°32'N, 123°47'~124°37'E),行政范围涵盖齐齐哈尔市昂昂溪区、铁锋区、富裕县、泰来县,以及大庆市林甸县和杜尔伯特蒙古族自治县。该保护区总面积 2100 km²,是我国规模最大的丹顶鹤繁殖栖息地和湿地生态系统保护区[11]。区域植被类型以草甸草原、湿草甸为主体,伴生沼泽植被及水生植物群落分布[12]。

2.2. 研究方法

2.2.1. 土壤样品采集与测定

本研究依据黑龙江省功能区划方案,将研究区域划分为核心区、缓冲区和实验区三个功能单元。采用系统随机布点法设置 30 个垂直采样点(图 1)。2023 年 5~7 月间,使用定制采样工具采集 0~60 cm 深度土壤剖面样本,按 10 cm 间隔进行分层取样。采集样品经分类标记后,统一送回实验室处理。

实验室内处理流程包括:样品经自然风干后人工去除杂质,通过 10 目筛网进行初级筛分,其中需精细分析的样品经玛瑙研钵研磨后过 100 目细筛,最终样本密封保存于干燥环境。测定过程中,各形态磷含量依据欧洲测试委员会 SMT 标准流程进行连续提取,含水率采用 105℃ 恒温烘干法测定, pH 值测定使用经校准的 Mettler Toledo FE28 型 pH 计完成电位法分析[13]。

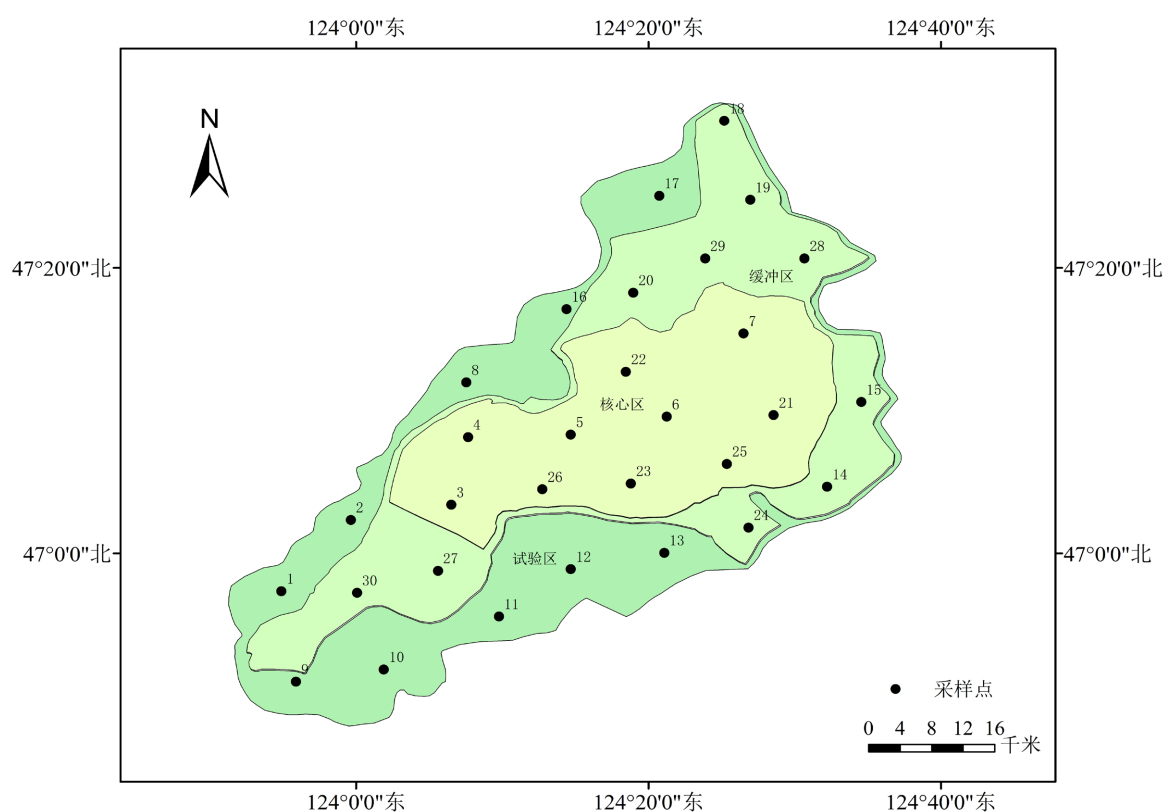


Figure 1. Distribution map of soil sampling points in Zhalong Wetland
图 1. 扎龙湿地土壤采样点分布图

2.2.2. 数据处理

本研究首先对实验数据开展预处理工作，完成异常值剔除与数据清洗后，采用 SPSS 26.0 统计软件进行系统分析。在统计分析过程中，严格实施正态性检验与方差齐性检验作为前置条件，确保参数检验方法的适用性。在此基础上，运用 ArcMap 10.2 软件构建土壤磷采样点分布图及表层空间特征图，同时利用 Origin 2021 软件完成土壤磷剖面分布特征图与相关性分析图的绘制。

3. 结果与讨论

3.1. 湿地沉积物总磷及各形态磷的表层分布特征

扎龙湿地表层沉积物中的总磷(TP)含量的空间分布特点表现为东北部和中西部含量高(见图 2), TP 含量在 307.44~785.88 mg/kg 之间。空间分布特征显示,核心区西南部及毗邻西侧区域呈现显著高值特征,其含量峰值超过 626 mg/kg, 相当于全区平均水平的 2~3 倍。浓度梯度分析表明,该高值区自中心区域向外围呈现辐射状递减模式,形成典型的“核心-边缘”空间分布格局。扎龙湿地北部出现磷素富集,主要是因为乌裕尔河上游富裕、依安地区和克山地区的农业生产,大量的农药、化肥、除草等药剂进入了该地区,造成了磷的大量积累。在中西部地区磷含量很高,是可能是因为其被一大片施用化肥和农药的耕地包围着。

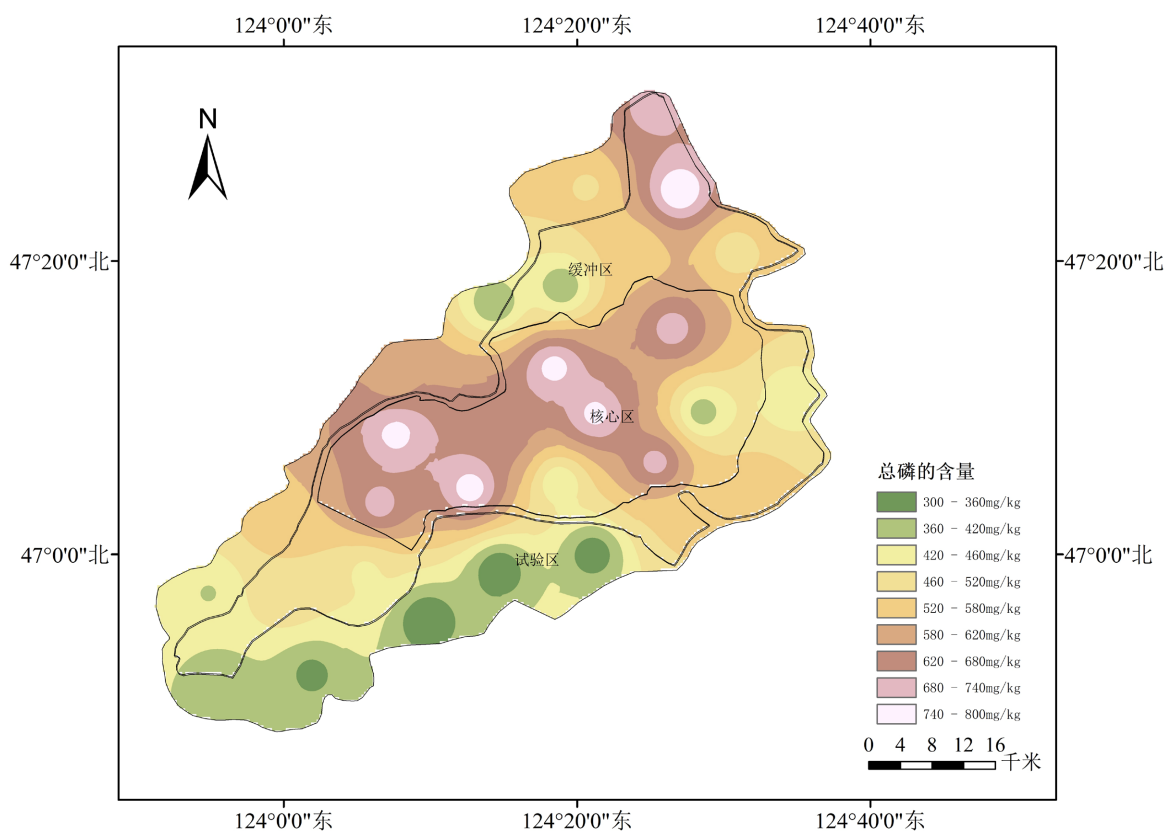


Figure 2. Surface spatial distribution of total phosphorus content in sediments in Zhalong wetland
图 2. 扎龙湿地沉积物总磷含量表层空间分布图

扎龙湿地表层沉积物中的无机磷(IP)含量的空间分布特点表现为在研究区东北部和中西部高(见图 3)。其中 IP 含量最小值(165.09 mg/kg)出现在试验区;核心区 IP 含量较高,主要受农业生产活动影响、植被

覆盖度和有机质含量等因子的影响；缓冲区东北部 IP 含量最大，高达 437.23 mg/kg，可能是因其受到乌裕尔河沿线及周边工业废水和城市生活污水的共同作用所致，造成了污染。

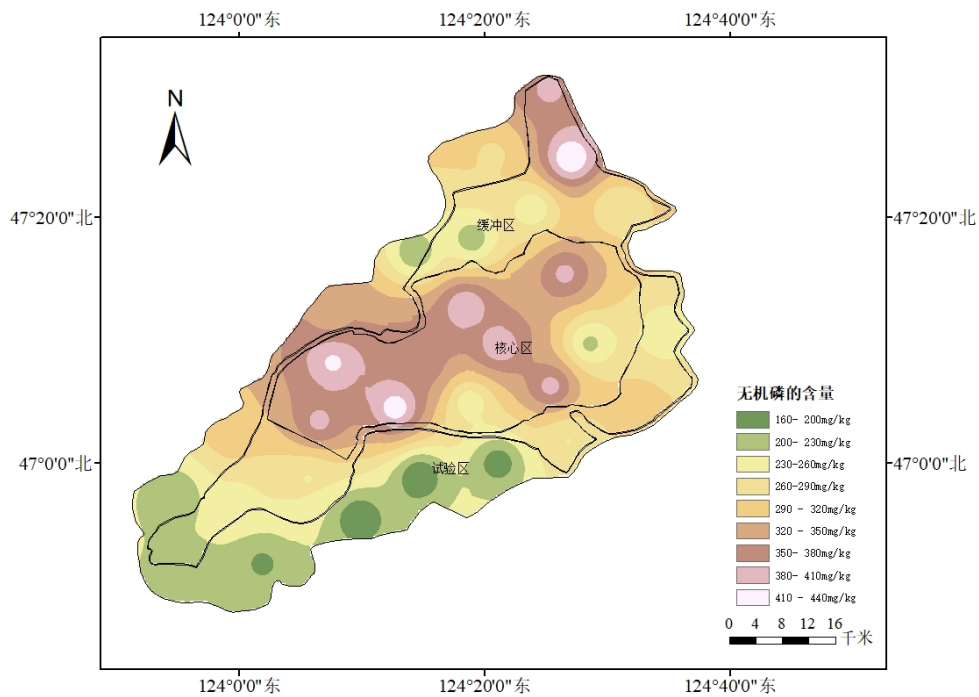


Figure 3. Surface spatial distribution of inorganic phosphorus content in sediments in Zhalong wetland
图 3. 扎龙湿地沉积物无机磷含量表层空间分布图

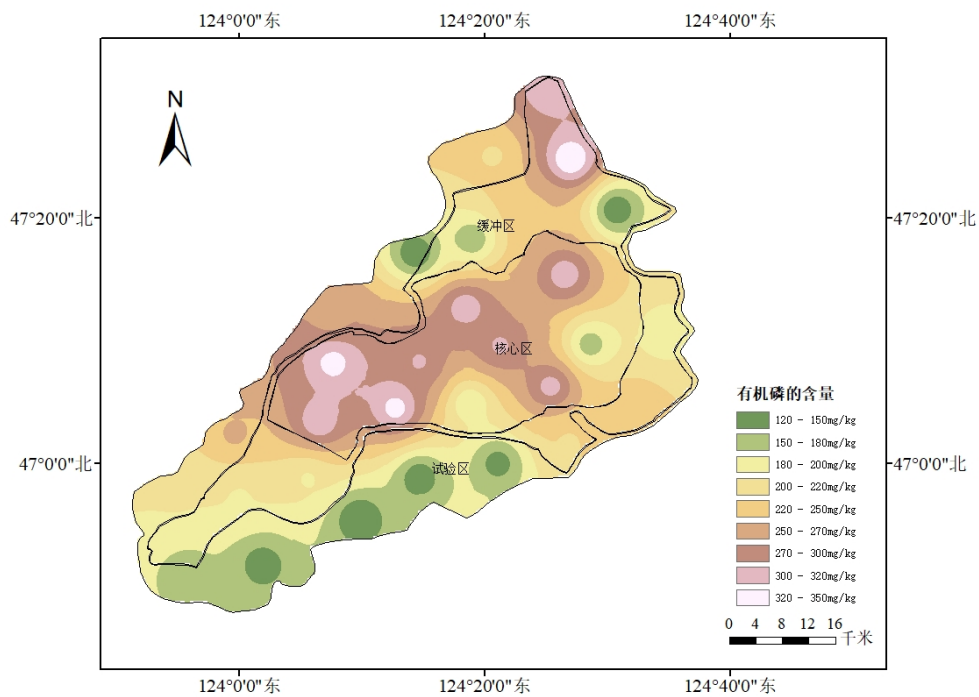


Figure 4. Surface spatial distribution of organo phosphorus content in sediments in Zhalong wetland
图 4. 扎龙湿地沉积物有机磷含量表层空间分布图

扎龙湿地表层沉积物中的有机磷(OP)含量的空间分布特点表现为在研究区中西部和东北部高(见图4), OP含量最小值(126.35 mg/kg)出现在试验区;核心区 OP含量较高,主要归因于该区域密集的农业活动、较高植被覆盖度及有机质富集等环境要素的共同作用;东北部 OP含量分布出现整个研究区最大值(344.65 mg/kg),这可能与该区域乌裕尔河上游的富裕县、依安县及克山县开展的大规模农田建设工程密切相关,导致了大量的化肥和杀虫剂的使用,以及大量的杀虫剂和除莠剂进入了保护区,造成了该地区的有机磷化合物浓度最高[14]。

扎龙湿地表层沉积物中的铁铝结合态磷(Fe/Al-P)含量的空间分布特点表现为在研究区中西部高(见图5), Fe/Al-P含量最小值(64.38 mg/kg)出现在缓冲区;核心区 Fe/Al-P含量分布出现整个研究区最大值(151.23 mg/kg)。主要与外源输入有关。根据齐齐哈尔市环保局的水质检测资料显示,齐齐哈尔市生态环境局环境监测数据显示,扎龙河上游工业废水年排放量达910万吨,其中氮(N)、磷(P)作为主要营养盐输入扎龙湿地。溯源分析表明,该污染负荷主要来源于富裕县、依安县等上游区域工业生产活动,持续的营养盐输入对湿地水体富营养化进程产生显著驱动作用[15]。

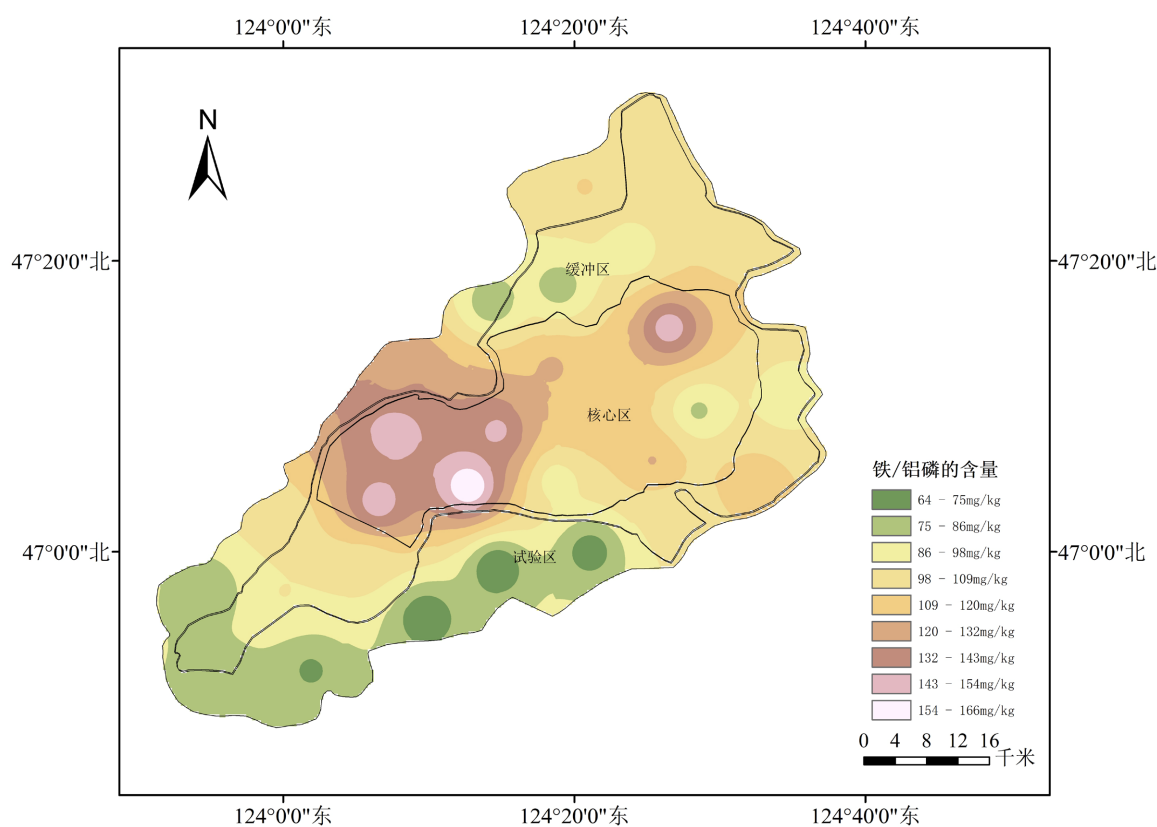


Figure 5. Spatial distribution map of iron, aluminum, phosphorus content in sediments in Zhalong wetland
图5. 扎龙湿地沉积物铁铝结合态磷含量表层空间分布图

扎龙湿地表层沉积物中的钙结合态磷(Ca-P)含量的空间分布特点表现为研究区中西部与东北部高(见图6), Ca-P含量最小值(97.40 mg/kg)出现在试验区;核心区中西部含量较高;研究区钙结合态磷(Ca-P)空间分布特征显示,缓冲区呈现全研究区最高含量(257.96 mg/kg)。其空间分异主要受成岩作用控制,与钙结合态磷的特定形成机制密切相关。具体而言,人类活动产生的磷源(生活/工业)通过活化迁移过程,促使稳定态磷矿物在弱碱性水环境地球化学过程中形成次生Ca-P沉淀[11]。

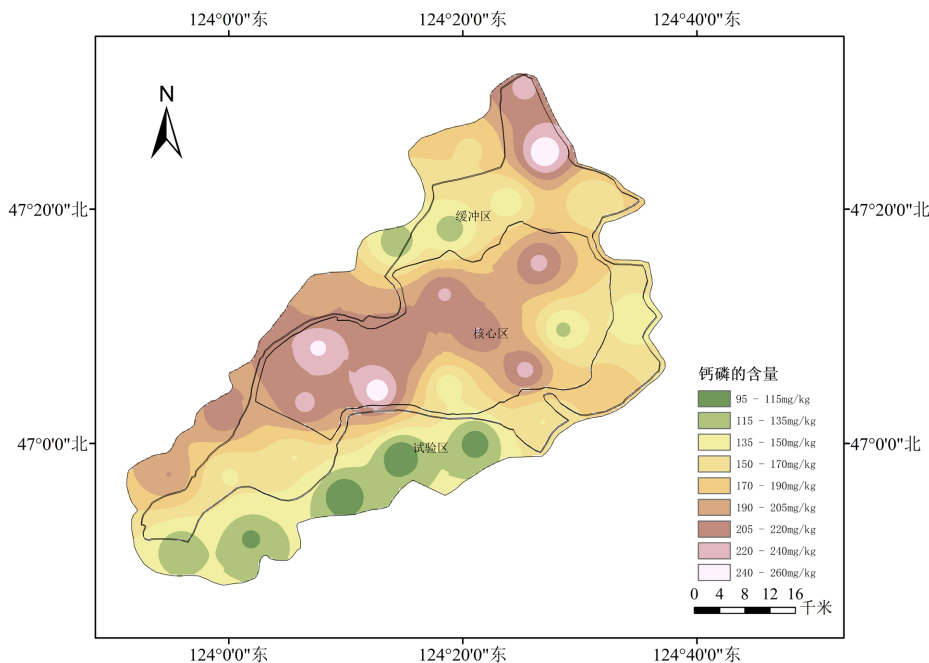


Figure 6. Spatial distribution of calcium and phosphorus content in sediments in Zhalong wetland
图 6. 扎龙湿地沉积物钙结合态磷含量表层空间分布图

3.2. 湿地沉积物总磷及各形态磷的剖面分布特征

由图 7 可知，柱状沉积物总磷柱状含量随深度变化范围为 279.78~802.11 mg/kg，沉积物的垂向剖面上，总磷的含量大体呈现由浅至深逐渐下降趋势。总磷含量在 0~10 cm 层面呈明显增长趋势，在 10~20 cm 有缓步上升趋势，在 20~30 cm 土壤层中呈现明显下降趋势，这可能与沉积物中含有较大粗粉粒有关。在 30 cm 以下更深的土壤层呈现明显下降趋势。

总磷含量随深度变化波动，但总体呈现下降趋势，土壤中的水分、氧气含量、温度和 pH 值也会影响有机质和有效磷的含量。不同深度的土壤，这些因素可能会有所不同，从而对有机质和有效磷的产生和分解产生影响。

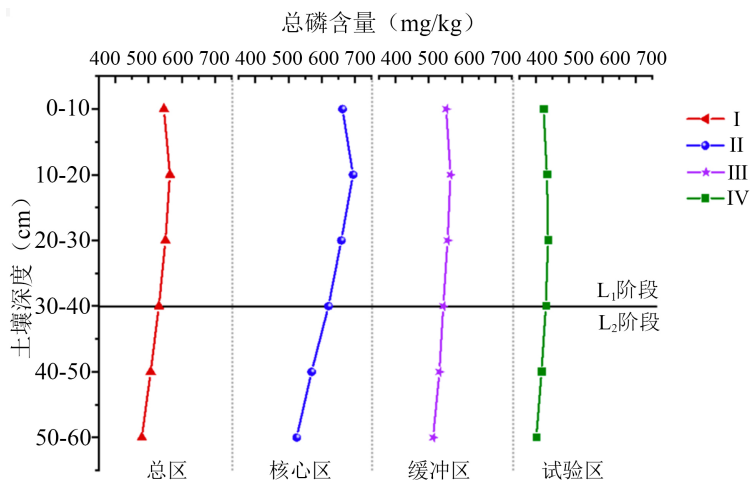


Figure 7. Columnar content of total phosphorus in sediments in Zhalong wetland
图 7. 扎龙湿地沉积物总磷柱状含量图

如图 8 所示, 柱状沉积物中各形态磷含量呈现明显的垂向分布特征。有机磷(OP)含量随沉积深度变化介于 201.35~336.88 mg/kg, 其含量在核心区与缓冲区 20~30 cm 层位达到最大值, 试验区则位于 10~20 cm 层位出现峰值(256.56 mg/kg)。无机磷(IP)含量分布范围为 242.00~366.49 mg/kg, 其中缓冲区和试验区在 20~30 cm 深度出现最高值, 而核心区峰值(366.49 mg/kg)位于 10~20 cm 层位。铁铝结合态磷(Fe/Al-P)含量介于 80.31~138.79 mg/kg, 核心区与缓冲区的最大含量出现在 10~20 cm 层位, 试验区则在 20~30 cm 深度达到峰值(87.34 mg/kg)。钙结合态磷(Ca-P)含量变化幅度为 103.04~354.02 mg/kg, 核心区与缓冲区的最大值出现在 20~30 cm 层位, 试验区峰值(248.25 mg/kg)则位于 10~20 cm 层位。综合分析显示, 各形态磷含量均呈现先升高后降低的垂向分布规律[16]。

核心区 OP、Fe/Al-P、Ca-P 三种磷形态都在 20~30 cm 层面出现峰值, IP 与其他三种磷形态分布规律不同, 峰值出现在土壤 10~20 cm 层面; 缓冲区 OP、IP、Ca-P 三种磷形态都在 20~30 cm 层面出现峰值, Fe/Al-P 则在 10~20 cm 层面出现峰值(113.06 mg/kg)。试验区 IP、Fe/Al-P 在 20~30 cm 层面出现峰值, 而 OP 和 Ca-P 则在 10~20 cm 层面出现峰值。

扎龙湿地土壤中同形态磷含量空间分布存在明显的分异特征, 这种差异与诸多因子息息相关, 主要有: 外来污染物的进入, 通过地表径流、农业灌溉和工业污水排放等方式, 对该区的水质产生了一定的影响; 另外, 该区特有的季节性变化、降水差异和水量分配差异等也是造成该区磷素空间分异的主要因素; 在地形上, 山地、河流、河流等组成的复杂地形对河流流速及污染物运移具有重要的作用; 此外, 由于城镇化过程中大量的工业废弃物、生活废水等人为因素的影响, 使得该区域同种磷素的空间分异特征更加明显。各因子交互作用, 形成了扎龙流域特有的磷素形态, 并体现出其生态系统的复杂与动态特征。不同形态磷含量垂直分布存在差异, 但总体都呈先增后减趋势。含量呈现由浅到深先增后减的规律, 造成这一现象的原因是多方面的。首先是土壤的自净作用、生物作用以及水力传输体系中的物理吸附或沉降作用, 导致磷含量从浅到深先增后减的结果。

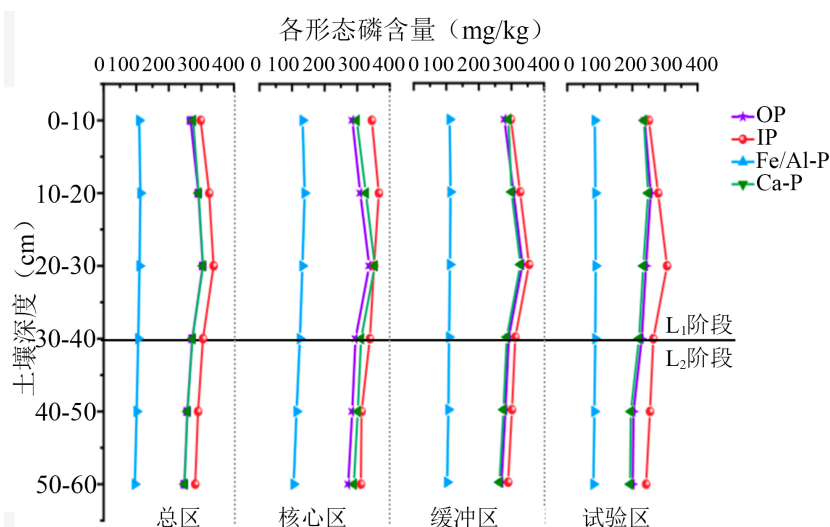


Figure 8. Phosphorus columnar content of sediments of Zhalong wetland
图 8. 扎龙湿地沉积物各形态磷柱状含量

3.3. 湿地沉积物磷的影响因素分析

磷的迁移转化受诸多环境因子的调控, 这些环境因素的变化会对磷的吸附与释放产生一定的作用, 进而使磷在土壤中的赋存形态与含量分布发生变化。

由表 1 可知, 土壤含水率与总磷及各形态磷含量之间呈现正相关, 含水率与 OP 含量呈现显著正相关($r = 0.701, P < 0.01$), 与 IP 含量之间呈现显著正相关($r = 0.677, P < 0.01$), 与 OP 含量之间呈现显著正相关($r = 0.695, P < 0.01$), 与 Fe/Al-P 含量之间呈现显著正相关($r = 0.817, P < 0.01$), 与 Ca-P 含量之间呈现显著正相关($r = 0.688, P < 0.01$)。即随着水分含量越大, 溶解度越大。土壤水分充足, 土壤无机磷会有很高的有效性, 由于土壤中含有丰富的水分和较高的磷素可利用性, 因此, 当土壤湿度越大时, 磷素的运移速率就更高, 磷酸根离子在根际土的浓度也越高。在土壤湿度较低的情况下, 磷素的有效迁移率较低且迁移速度较慢。土壤含水量的增加, 有利于植物对磷的吸收和利用。理想的土壤环境中, 充足的水分供给, 不但可以提高根系对磷的吸收与利用, 也可以使磷素从土壤深层向表层移动。保持土壤湿润、肥沃的土壤使保证作物正常生长的关键。它通过优化土壤的养分平衡, 为植物提供磷必要的生长条件。

Table 1. Correlation between soil moisture content and phosphorus and phosphorus content of various forms

表 1. 土壤含水率与磷及各形态磷含量的相关性

	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
含水率	0.701**	0.677**	0.695**	0.817**	0.688**

注: **在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

由表 2 可知, 土壤 pH 与磷及各形态磷的相关性都呈现显著负相关, 土壤 pH 与 OP 含量呈现显著负相关($r = -0.706, P < 0.01$), 与 IP 含量呈现显著负相关($r = -0.677, P < 0.01$), 与 OP 呈现显著负相关($r = -0.692, P < 0.01$), 与 Fe/Al-P 含量呈现显著负相关($r = -0.830, P < 0.01$), 与 Ca-P 含量呈现显著负相关($r = -0.696, P < 0.01$), 即沉积物 pH 越大, 越有利于沉积物中磷的释放。作为关键环境因子, 土壤 pH 值通过改变磷素赋存特征、调节迁移转化过程等作用机制, 显著影响磷形态分布与含量水平。其酸碱度变化直接控制磷素在土壤固-液相间的解吸-吸附平衡, 进而决定磷的生物有效性水平。

在酸性的自然环境中, 磷会与 Fe、Al 和 Mn 等元素生成难溶性化合物, 导致磷的有效性降低。在酸性和钙质类型土中, 由于土壤中含有大量钙离子, 容易与钙离子生成钙结合态磷, 进一步降低了土壤磷素的生物有效性。

Table 2. Correlation between soil pH and phosphorus and various forms of phosphorus

表 2. 土壤 pH 与磷及各形态磷的相关性

	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
pH	-0.706**	-0.680**	-0.692**	-0.830**	-0.696**

注: **在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

土壤磷是植物生长和发育的主要环境因子, 其含量的多少和赋存形态直接决定着植物的生长和产量。磷以多种形态存在于土壤中, 包括有机磷、无机磷、离子态磷等。通过对土壤总磷与各形态磷进行相关性分析(见表 3), 发现土壤 TP 与 IP 之间呈现显著正相关($r = 0.987, P < 0.01$), 与 OP 呈现显著正相关($r = 0.968, P < 0.01$), 与 Fe/Al-P 之间呈现显著正相关($r = 0.858, P < 0.01$), 与 Ca-P 呈现显著正相关($r = 0.942, P < 0.01$)。

磷素在和不同形态的磷之间的连续转换, 构成了磷在土壤中的迁移和循环的生理活动, 是磷资源的可持续发展的的重要途径。在磷素运移与再循环的阶段, 形成了一个充满生命活力的平衡。在这一动态平衡中, 磷元素以特定的比例和形式存在于不同的环境条件下, 保持着相对的稳定性。因而, 在不同的条件下, 不同的磷素组分变化均可能会对土壤有效磷含量造成不同程度的影响。

Table 3. Correlation between total soil phosphorus and various forms of phosphorus
表 3. 土壤总磷及各形态磷之间的相关性

	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
TP	1	0.987**	0.968**	0.858**	0.942**
IP	0.987**	1	0.958**	0.868**	0.945**
OP	0.968**	0.958**	1	0.827**	0.943**
Fe/Al-P	0.858**	0.868**	0.827**	1	0.817**
Ca-P	0.942**	0.945**	0.943**	0.817**	1

**在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

磷是生命必需元素, 其形态转化还受微生物活动和氧化还原(Eh-pH)条件的协同调控。微生物作为磷循环的“引擎”, 通过酶促反应和代谢调控主导磷的形态转化; 而氧化还原条件通过改变矿物稳定性与电子受体有效性, 深刻影响微生物活性及磷的界面行为。铁-硫循环与微生物群落的互作构建了磷迁移的“氧化还原栅栏”, 而界面微环境的动态变化进一步调控磷的生物有效性。

4. 结论

使用 ArcMap 对 5 种不同的磷素含量形态绘制空间分布图, 使用 Origin 对总磷绘制柱状含量图, 总结分析 TP、IP、OP、Fe/Al-P、Ca-P 的分布规律, 分析影响其分布规律的影响因素。对 TP、IP、OP、Fe/Al-P、Ca-P 之间采用 SPSS 进行相关性分析, 再逐步对含水率、pH 值对磷及各形态磷之间进行相关性分析。

研究表明, 扎龙湿地在不同区域内总磷含量的分布差异, 这一现象与 IP 之间存在着紧密的联系, 证明 IP 的分布对总磷的分布起着决定性的作用; 扎龙湿地的中西部和东北部无机磷含量高于其他区域, 这可能是由于这些区域更频繁地遭受人类活动, 如农业灌溉、工业排放以及自然沉降等因素的影响。此外, OP 与 Fe/Al-P 含量高低是扎龙湿地富营养化面对的最大风险。因此, 在沉积物磷控制技术里, 不仅应注重降低总磷, 而且必须综合运用多种手段, 对生物可利用磷脱除和控制。

沉积物中磷含量高, 其潜在释放能力也较大。土壤总磷及各形态磷含量的空间分布不均匀, 其中, 东北部和中西部含量都偏高, 且具有明显的空间差异性。

通过详细分析沉积物中磷的分布、形态及其与理化性质的相关性, 为湿地生态系统的保护与管理提供科学依据。土壤的含水率、pH 值等因素影响磷形态的分布, 磷形态转化是微生物代谢与地球化学过程协同作用的结果。

有关单位要加强对排入湿地及乌裕尔河排放废水的工业企业的监管, 周边县、市应尽快建成城市污水管网; 强化科学合理地施用农药、化肥, 减少外源性的损失; 在此基础上, 通过对流域内源磷排放的控制, 对其进行生态修复, 并通过生态修复和生态修复等措施来实现流域内源磷的高效减排。

参考文献

- [1] 夏欣, 宋维峰, 彭正耀. 哈尼梯田湿地土壤不同形态磷的时空分布特征[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 676-685.
- [2] 王叶姣, 田在锋, 吴亦红, 等. 景观表流湿地沉积物磷赋存形态及特征研究[J]. 绿色科技, 2018(24): 86-88.
- [3] 唐贤, 黄伟濠, 卢瑛, 等. 珠江三角洲平原不同母质土壤磷形态分布及其有效性[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 861-869.
- [4] 李荣富, 廖文成, 吴虎彬, 等. 干湿交替条件下鄱阳湖洲滩湿地土壤磷形态转化与释放风险研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(3): 365-376.
- [5] 王伟泽, 胡鹏, 王建华, 等. 扎龙湿地植被覆盖度及其分布结构对水文气象要素的响应[J]. 水生态学杂志, 2020,

- 41(5): 89-97.
- [6] Sivasankar, R., Ezhilarasan, P., Sathish Kumar, P., Naidu, S.A., Rao, G.D., Kanuri, V.V., *et al.* (2018) Loriccate Ciliates as an Indicator of Eutrophication Status in the Estuarine and Coastal Waters. *Marine Pollution Bulletin*, **129**, 207-211. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.027>
- [7] 吴江水, 童亚康. 我国湿地保护面临的主要问题及保护建议[J]. 江西农业, 2020(18): 71, 73.
- [8] 李敏, 韦鹤平, 王光谦, 等. 长江口、杭州湾水域沉积物对磷吸附行为研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 132-136.
- [9] Cui, Y., Xiao, R., Xie, Y. and Zhang, M. (2018) Phosphorus Fraction and Phosphate Sorption-Release Characteristics of the Wetland Sediments in the Yellow River Delta. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **103**, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.005>
- [10] Zhang, Y., He, F., Liu, Z., Liu, B., Zhou, Q. and Wu, Z. (2016) Release Characteristics of Sediment Phosphorus in All Fractions of West Lake, Hang Zhou, China. *Ecological Engineering*, **95**, 645-651. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.014>
- [11] 叶华香. 扎龙湿地沉积物营养盐和重金属空间分异规律及潜在生态风险研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2014.
- [12] 佟守正. 沟渠对扎龙湿地退化的影响及生态恢复设计研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [13] Psenner, R., Bostrom, B., Dinka, M., *et al.* (1988) Fractionation of Phosphorus in Suspended Matter and Sediment. *Archiv für Hydrobiologie Beihefte*, **30**, 83-112.
- [14] 叶华香, 臧淑英, 贾晓丹, 等. 扎龙湿地表层沉积物磷的赋存形态及空间分布特征[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2): 108-112.
- [15] 李玉文, 梁晶, 李智娟. 扎龙湿地水体富营养化与治理措施研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(2): 165-168.
- [16] 陈珏, 支鸣强, 朱德龙, 等. 太湖沉积物营养物及重金属污染分布特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1457-1465.