

# 湿地沉积物中无机磷的形态特征及主要影响因子研究

刘 蕾, 刘文静, 李学平\*

滨州学院生物与环境工程学院, 山东 滨州  
Email: \*lixueping2008@163.com

收稿日期: 2021年1月25日; 录用日期: 2021年2月19日; 发布日期: 2021年2月26日

## 摘 要

对黄河三角洲退化滨海湿地沉积物中磷形态含量特征及温度、pH、上覆水理化性质对湿地沉积物磷形态含量的影响进行了研究。结果表明, 退化滨海湿地沉积物中不同形态磷中铁结合磷(Fe-P)含量最高, 最大值达到971.7 mg/kg, 闭蓄态磷(O-P)含量最小, 最小值为260.1 mg/kg。Fe-P、Al-P、Ca-P、O-P平均含量分别683.7、400.9、331.6、287.9 mg/kg。当温度 $<20^{\circ}\text{C}$ 时, Fe-P含量随温度升高而增大, 温度 $>20^{\circ}\text{C}$ 时, Fe-P含量随温度升高而下降; Al-P含量随温度升高逐渐增大, O-P含量随温度的升高先下降后增大。Fe-P含量随着pH的增大逐渐降低, pH  $> 9$ 时对Fe-P含量的影响不大; Al-P和Ca-P含量均随pH的升高先下降后增大。

## 关键词

黄河三角洲滨海湿地, 沉积物, 磷, 影响因子

# Speciation Characteristics and Main Influencing Factors of Inorganic Phosphorus in Wetland Sediments

Lei Liu, Wenjing Liu, Xueping Li\*

College of Biological and Environmental Engineering, Binzhou University, Binzhou Shandong  
Email: \*lixueping2008@163.com

Received: Jan. 25<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 26<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 刘蕾, 刘文静, 李学平. 湿地沉积物中无机磷的形态特征及主要影响因子研究[J]. 农业科学, 2021, 11(2): 156-161. DOI: 10.12677/hjas.2021.112023

## Abstract

The characteristics of phosphorus forms in sediments of degraded coastal wetlands in the Yellow River Delta and the effects of temperature, pH, physical and chemical properties of overlying water on phosphorus forms in sediments were studied. The results showed that the content of iron bound phosphorus (Fe-P) in different forms of phosphorus was the highest, and the maximum of Fe-P content was 971.7 mg/kg. The content of closed form phosphorus (O-P) was the lowest, and the minimum of O-P content was 260.1 mg/kg. The average contents of Fe-P, Al-P, Ca-P and O-P were 683.7, 400.9, 331.6 and 287.9 mg/kg, respectively. The content of Fe-P increases with the increase of temperature when the temperature is less than 20°C. The content of Fe-P decreases with the increase of temperature when the temperature is more than 20°C. The content of Al-P increases with the increase of temperature, and the content of O-P decreased and then increased with the increase of temperature. The content of Fe-P decreased gradually with the increasing of pH, and had little effect on the content of Fe-P when pH > 9. The content of Al-P and Ca-P decreased and then increased with the increase of pH.

## Keywords

Yellow River Delta Coastal Wetland, Sediment, Phosphorus, Influencing Factors

Copyright © 2021 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

湿地的运行由于受污染物负荷、自身内部结构等因素的影响，对磷的拦截去除效果并不稳定[1][2]，而且不同湿地类型沉积物磷形态的分布特征也不相同。对南四湖微山湖区沉积物磷形态研究发现，闭蓄态磷的含量最高，并随着土层深度增大逐渐降低；相反，Al-P含量仅有 $4.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，且随着土层深度增大而增大[3]。同一湿地不同区域沉积物中总磷和各形态磷的含量差异也较大，外源污染和沉积物颗粒组成是影响其分布的主要因子，其中无机磷占总磷含量的42.24%~82.04% [4]。影响沉积物中磷释放的因素包括内在和外任两类因素，如磷的含量和组合形态、上覆水的性质、磷的浓度、温度等[5][6][7]。

黄河三角洲地区现有盐碱类湿地15万公顷，部分湿地土壤退化和盐碱化严重，导致湿地蓄洪防旱和净化水质功能大大下降。那么，对于退化滨海盐碱化湿地磷形态特征如何，目前了解甚少。因此，研究退化滨海盐碱化湿地沉积物中磷形态含量特征，并分析外在因子对沉积物磷形态的影响，这对退化湿地的修复具有重要指导意义。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验区概况

试验区位于黄河三角洲腹地的滨州沾化县北约10 km处的重度退化滨海盐碱芦苇湿地(图1)，试验地面积为1 ha，水溶性总盐含量0.9%~2.4%，pH平均为7.9，该区域属东亚温暖带潮湿大陆季风性气候，

年平均气温 12.5℃, 年平均降水量约 584 mm, 年蒸发量 1800~2000 mm。目前, 该试验区挺水植物主要为芦苇。

## 2.2. 样品的预处理

所研究的湿地位于滨州市, 沉积物样品均取底泥表面 5 厘米到 10 厘米左右部分, 取样时间是 2018 年 9 月, 样品装入塑料袋后, 带回实验室, 将采集的泥样泥样在自然条件下风干, 采用四分法取样研磨并通过 100 目的尼龙筛, 处理后的样品保存于封口袋中备用。

## 2.3. 实验方法

### 2.3.1. 沉积物磷形态分析方法

利用 SMT 法测定沉积物中的 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 OP [8]。

### 2.3.2. 温度控制实验

将样品放入恒温培养箱中, 分别设置于 8℃、15℃、20℃、25℃ 4 种温度中分别按照前面的方法测定磷含量。

### 2.3.3. pH 值控制实验

使用 0.1 mol/L 的硫酸和氢氧化钠溶液控制 pH 值, 分别将土样置于 pH 为 3.0、5.0、7.0、9.0、11.0 来模拟 pH 值的影响。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 沉积物中不同 Ca-P 含量特征

沉积物中 Ca<sub>8</sub>-P 含量最多, Ca<sub>2</sub>-P 含量最少(图 1)。Ca-P 含量最小值出现在 A1, 最小值为 231.4 mg/kg, 因为 A1 在湿地出水口位置底泥偏中性, 不利于沉积物中 Ca-P 积累。最大值出现在 A5, 最大值为 416.2 mg/kg, 因为 A5 在入水口位置底泥酸性较大, 其中的微生物的代谢产生的 CO<sub>2</sub> 少, 利于 Ca-P 的积累。A4 的 Ca-P 含量较高为 412.1 mg/kg, 因为 A4 沉积物表层水藻多, 磷含量基数大。

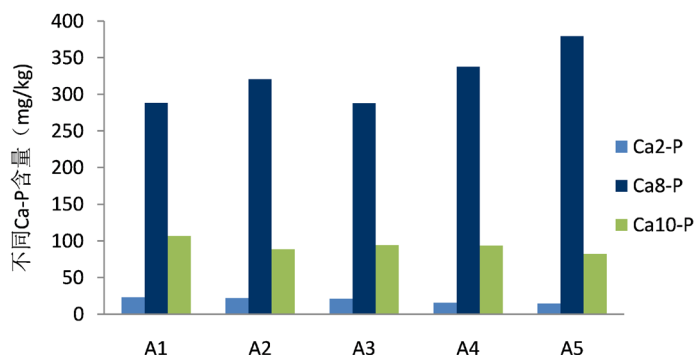
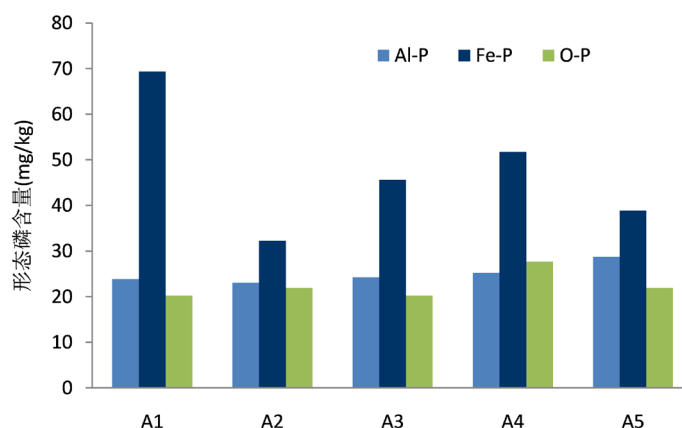


Figure 1. Characteristics of different Ca-P contents in sediments  
图 1. 沉积物中不同 Ca-P 含量特征

### 3.2. 沉积物中其他形态无机磷含量特征

湿地 A1 点的 O-P 的含量达到最大值(图 2), 最大值为 348.5 mg/kg, 因为湿地 A1 点底泥成黑色, 受污染较多, O-P 含量相对较多。A2 的 O-P 含量为最小, 其最小值是 195.6 mg/kg, 因为 A2 受风力扰动和水的搅动作用较大, 不利于 O-P 的积累。其余各点的 O-P 含量相当, 受多种因素影响较小。

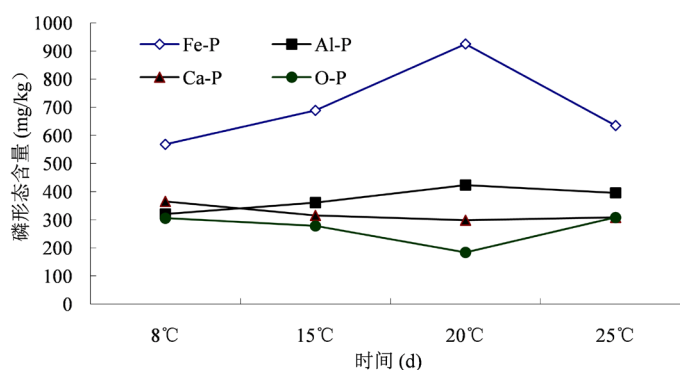


**Figure 2.** Characteristics of other forms of inorganic phosphorus in sediments  
**图 2.** 沉积物中其他形态无机磷含量特征

### 3.3. 温度对磷形态含量的影响

Fe-P 含量随温度的增大其含量先增大后下降, 且变化趋势较大(图 3)。当温度为 8℃、15℃、20℃、25℃时, 其含量分别为 568.5、689.3、925.4、635.4 mg/kg。温度<20℃时, Fe-P 含量随温度升高增大。温度升高有利于 Fe-P 在沉积物中的积累。当温度为 20℃时, 含量为 925.4 mg/kg 达到最大值。温度>20℃时, Fe-P 含量随温度升高下降。

Al-P 含量随温度增大逐渐增大, 因为温度引起溶解氧变化增大其积累, 但变化趋势较小。变化范围为 320.3~423.5 mg/kg。当温度为 20℃时, Al-P 含量为 423.5 mg/kg 时, 而后温度>20℃时, Al-P 含量变化趋于缓和。此时底泥中的光合细菌使得 CO<sub>2</sub> 增多, 减缓 Al-P 的释放。Ca-P 含量的变化曲线趋于平稳, 波动很小, 说明温度变化对两者含量的变化影响较小。O-P 含量随温度的增大其含量先下降后增大, 这是因为 Fe-P、Al-P 与 O-P 之间相互转化, Fe-P、Al-P 含量增大则 O-P 含量降低, Fe-P、Al-P 含量下降则 O-P 含量增大。



**Figure 3.** Effect of temperature on phosphorus forms in sediments  
**图 3.** 温度对沉积物磷形态含量的影响

### 3.4. pH 对磷形态含量的影响

Fe-P 含量随着 pH 的增大, 其含量逐渐降低, 最终趋于平衡(图 4)。变化范围在 880~755.4 mg/kg 之间。当 pH = 3 时, Fe-P 含量达到最大值, 最大值为 880 mg/kg。在 PH = 3 到 pH = 9 范围时, Fe-P 含量随 PH 的增大其下降趋势是较大的, 因为 pH 值铁络合胶体与非晶体磷交换作用增大, Fe-P 积累较少。在

pH = 9 时, Fe-P 含量为 756.9 mg/kg 时, 再随着 pH 的增大其含量变化趋于缓和, 波动不大。说明 pH > 9 时对 Fe-P 含量的影响不大。

Al-P 和 Ca-P 含量随 pH 的增大先下降后增大。当 pH < 7 时两者含量都是下降的, 因为酸性条件下, 微生物代谢产生二氧化碳减少 Al-P 和 Ca-P 的积累。当 pH = 7 时, Al-P 含量和 Ca-P 含量分别为 285.4、270.6 mg/kg 时, pH > 7 两者含量又逐渐增大, 因为碱性条件下, 水中的氢氧根离子与沉积物胶体中的阴离子相互竞争吸附位, 增大了 Al-P 和 Ca-P 的积累。O-P 含量随 pH 的增大逐渐增大, 但趋势较小, 因为 Fe-P, Al-P, Ca-P 要转化为 O-P。

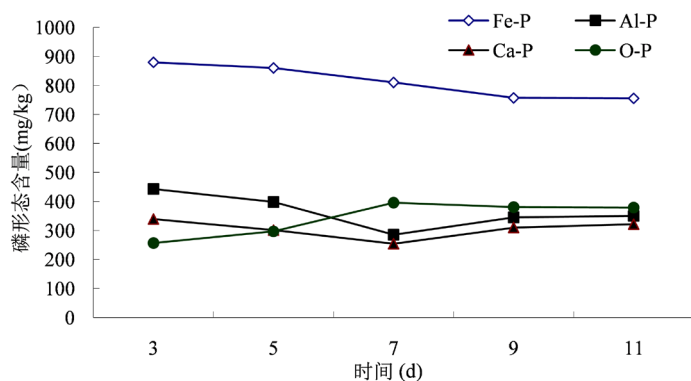


Figure 4. Effect of pH on phosphorus forms in sediments  
图 4. pH 对沉积物磷形态含量的影响

#### 4. 结论

1) 沉积物中总磷含量较大, 最大值为 2119.1 mg/kg, 平均值为 2029.3 mg/kg。Fe-P 含量的平均值为 924.7 mg/kg, Ca-P 含量的平均值为 353.1 mg/kg, Al-P 含量的平均值为 380.0 mg/kg, 有机磷含量的平均值为 296.8 mg/kg, 铁结合磷占总磷的 40.1%。

2) Fe-P 随 pH 的增大含量减少, Al-P 和 Ca-P 含量随 PH 的增大先下降, 当 pH > 7 后增加, O-P 含量的随着 pH 的增加逐渐增加。

3) Fe-P 含量随温度的增加其含量先增加后下降, Al-P 含量随温度增加逐渐增加, 温度变化对 Ca-P 含量影响不大, O-P 含量随温度的升高先下降后增加。

#### 基金项目

国家自然科学基金项目(41601306); 国家级大学生创新训练计划项目(201810449044)。

#### 参考文献

- [1] Wang, Y, Shen, Z.Y., Niu, J.F., et al. (2009) Adsorption of Phosphorus on Sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the Relation with Sediment Compositions. *Journal of Hazardous Materials*, **162**, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.013>
- [2] Prasad, M.B.K. and Ramanathan, A.L. (2010) Characterization of Phosphorus Fractions in the Sediments of a Tropical Intertidal Mangrove Ecosystem. *Wetlands Ecology and Management*, **18**, 165-175. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9157-3>
- [3] 张志斌, 张学杨, 张波, 等. 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1345-1350.
- [4] 宋鹏鹏, 侯金枝, 高丽, 等. 荣成天鹅湖沉积物磷的赋存形态和时空分布特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 98-102.
- [5] 潘齐坤, 罗专溪, 颜昌宙, 等. 城市滨海湿地表层沉积物磷形态与相关关系分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9):

---

2117-2122.

- [6] Ye, X.F., Bai, J.H., Lu, Q.Q., *et al.* (2014) Spatial and Seasonal Distributions of Soil Phosphorus in a Typical Seasonal Flooding Wetland of the Yellow River Delta, China. *Environmental Earth Sciences*, **71**, 4811-4820. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2872-3>
- [7] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 488-494.
- [8] Ruban, V., López-Sánchez, J.F., Pardo, P., *et al.* (2001) Harmonized Protocol and Certified Reference Material for the Determination of Extractable Contents of Phosphorus in Freshwater Sediments: A Synthesis of Recent Works. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, **370**, 224-228. <https://doi.org/10.1007/s002160100753>