



地理学报 2002年第57卷第4期

长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征

作者: 刘敏 侯立军

实验研究了长江口滨岸潮滩表层沉积物对上覆水体中磷酸盐 (P04-P) 的吸附特性, 结果表明, 沉积物吸磷过程主要发生在0-10小时 (h) 内, 尔后基本上达到一种动态平衡过程, 但在0-0.5 h内沉积物对P04-P的吸附速率最大, 达到10.40-56.40 mg/kg h, 且其吸附速率受细颗粒物含量影响明显。沉积物对P04-P等温吸附曲线符合Langmuir等温吸附方程。据Langmuir方程计算, P04-P的吸附容量达26.32-204.08 mg/kg, 且吸附容量与Fe³⁺和总有机碳 (TOC) 含量有较好的正相关关系; P04-P的吸附效率达21.55-248.30 L/kg, 且吸附效率主要取决于TOC含量。此外, 环境因子 (温度、pH和盐度等) 对沉积物吸磷作用影响显著。

长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征 刘敏, 侯立军, 许世远, 欧冬妮, 张斌亮, 刘巧梅, 杨毅 (华东师范大学地理学系, 教育部城市与环境动态过程开放实验室, 上海 200062) 摘要: 实验研究了长江口滨岸潮滩表层沉积物对上覆水体中磷酸盐 (P04-P) 的吸附特性, 结果表明, 沉积物吸磷过程主要发生在0-10小时 (h) 内, 尔后基本上达到一种动态平衡过程, 但在0-0.5 h内沉积物对P04-P的吸附速率最大, 达到10.40-56.40 mg/kg h, 且其吸附速率受细颗粒物含量影响明显。沉积物对P04-P等温吸附曲线符合Langmuir等温吸附方程。据Langmuir方程计算, P04-P的吸附容量达26.32-204.08 mg/kg, 且吸附容量与Fe³⁺和总有机碳 (TOC) 含量有较好的正相关关系; P04-P的吸附效率达21.55-248.30 L/kg, 且吸附效率主要取决于TOC含量。此外, 环境因子 (温度、pH和盐度等) 对沉积物吸磷作用影响显著。关键词: 磷酸盐; 吸附速率; 吸附容量; 吸附效率; 表层沉积物; 长江河口 中图分类号: X142 磷是水体生态系统中的一种重要生源要素, 是浮游植物生长、繁殖所不可缺少的营养物质, 但是磷的过剩又可导致水体出现富营养化现象 [1, 2]。河口潮滩作为一个独特的生态系统, 面对日益严重的富营养化环境危害, 沉积物对P04-P的吸附对上覆水体及其近岸营养盐环境地球化学循环研究已受到了广泛的关注。Conley 等和Wamken等提出近岸水体中磷含量很大一部分来自于沉积物-水界面间的物质交换 [3, 4], 而沉积物的吸附作用对界面间P04-P的物质交换起着非常重要的作用 [5, 6]。Jugsujinda 等研究表明P04-P的吸附作用受铁氧化物影响显著 [7]。Jones等研究发现有机分子能够与铁铝等金属离子发生络合, 进而会加剧对P04-P的吸附 [8]。Lopez等研究揭示有机碳和碳酸钙含量对P04-P的吸附也有一定的影响 [6]。此外环境因子的变化对沉积物吸磷影响也不容忽视。Shang等研究发现, pH变化对有机磷和无机磷的吸附影响明显 [9]; 盐度变化对潮滩湿地沉积物P04-P的吸附影响也十分显著 [10]; 石晓勇等在黄河口悬浮物P04-P的吸附和解吸研究中发现, 随环境温度的升高, 悬浮物对P04-P的吸附呈线性增加 [11]。长江口作为海陆过渡带, 受人类活动的影响显著, 是一个典型环境脆弱带和敏感区。近年来, 对长江口沉积物中磷的生物地球化学特征 [12]、沉积物中磷的形态分布 [13] 及其沉积物-水界面磷的交换强度 [14] 等进行了研究, 但到目前为止, 对P04-P在沉积物上的吸附特征和环境因素 (尤其盐度和pH) 对沉积物磷吸附的影响机理还未见报道。基于此, 本文通过实验模拟的方法研究了长江河口滨岸带潮滩表层沉积物对磷的吸附特征, 并探讨了环境因子 (温度、盐度和pH等) 对沉积物吸磷的影响及其环境意义。

1 样品采集及实验方法 1.1 样品采集 研究区域内, 理论基准面以上的潮滩面积为904 km², 主要分布在长江口南岸、杭州湾北岸和崇明岛、长兴岛、横沙岛、九段沙等岛屿及阴沙周边。自陆向海, 滩地依次可划分为高、中、低潮滩, 其中高潮滩滩面上芦苇发育茂盛, 中潮滩滩面上发育着呈斑状分布的海三棱草, 低潮滩滩面上基本上无植被发育。但由于受围垦等人类活动的影响, 在长江口南岸和杭州湾北岸等许多岸段已无高潮滩出露。此外, 在石洞口、吴淞口、白龙港和金山等岸段受工农业及生活污水排放影响明显。因此, 根据潮滩自然环境特征和受人类活动影响差异性, 沿长江口滨岸带选择崇明岛东旺沙 (DW)、罗泾 (LJ)、石洞口 (SDK)、吴淞口 (WSK)、白龙港 (BLG)、东海农场 (DH)、芦潮港 (LC)、奉新 (FX) 和金山 (JS) 等9个典型采样点 (图1)。本次实验所需表层沉积物样品, 于2000年11月28-30日落潮时分别在上述采样点中潮滩部位采集。样品采集后, 立即在室温下风干, 并研磨过200目筛。

1.2 实验方法 1.2.1 吸附动力学实验 装150 ml 已知浓度 (1 mg/L) 的用人海水 [15] 配制的标准磷酸盐 (P04-P) 溶液于250 ml 锥形瓶中, 调至指定的pH (7.5) 和盐度 (据长江河口滨岸水体盐度梯度变化特征, LJ、SDK、WSK、BLG等处盐度S = 0.5 ‰, DH处盐度S = 5 ‰, LC、FX、JS、DW等处盐度S = 10 ‰), 加1.0 g左右的潮滩沉积物干样, 于恒温t = 20 °C水浴加热器上震荡, 每隔一定时间段进行水样采集, 每次取水样10 ml, 所取的水样在离心机上以4000 rpm的速度, 离心15 min后, 用0.45 μm微孔滤膜过滤。水样中的P04-P用磷钼蓝分光光度法 [16] 测浓度, 按吸附前后的浓度差计算吸附量。以上实验, 在相同的实验条件下, 作2个平行样, 相对均方差 < 5%。1.2.2 等温吸附模拟实验 称取一系列1.0 g左右的潮滩沉积物干样于100 ml 塑料离心管中, 加入50 ml 用人海水配制的已知浓度C0 (0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 mg/L) 的标准P

O4-P溶液。在一定的温度、pH和盐度条件下，于恒温水浴加热器上震荡6小时(h)，平衡24h后，在离心机以4000 rpm的速度离心，并用0.45 μ m微孔滤膜过滤。用磷钼蓝分光光度法测定平衡后水样中P04-P浓度，即得平衡浓度C，单位质量的沉积物对磷的吸附量Q (mg/kg) 应按下式计算： $Q = (C_0 - C) * V / W$ ，其中V (L) 为加到离心管中溶液的体积数，W (kg) 为沉积物干样的重量。以上实验，在相同的实验条件下，作两个平行样，相对离均差 $\leq 5\%$ 。

1.2.3 沉积物组分参数测定

沉积物中Fe³⁺含量是用醋酸铵 (NH₄OAc) 浸取后，用吡啶罗啉比色法测定；沉积物中总有机碳 (TOC) 是用重铬酸钾容量法测定[17]，实验误差 $\leq \pm 5\%$ ；沉积物粒度用LS1000激光粒度仪测定。

2 结果与讨论

2.1 沉积物吸附磷动力学

图2显示了表层沉积物对上覆水中磷的吸附动力学过程。从图2可以看出，长江口滨岸潮滩沉积物对水体中的磷具有相似的吸附过程，在前10 h之内，沉积物对磷具有较大的吸附速率，而第10 h之后沉积物吸附磷基本上达到平衡状态，这与Lopez等研究结果[6]一致。沉积物对磷的吸附量随时间的变化曲线符合方程： $Q = (2-1)$ 式中：Q 为在时刻单位质量的沉积物对磷的吸附量；Q' 为吸附平衡后沉积物对磷的吸附量；t 为时间；B为经验常数 (表1)。沉积物对P04-P的吸附是一个复合动力学过程，通常包含快吸附和慢吸附2个过程。实验结果反映，快吸附主要发生在0-10 h之内，10 h之后进入慢吸附平衡过程。为了进一步反映沉积物对P04-P的动态吸附过程，引入了吸附速率这一概念。表2列出了不同取样时段内沉积物对P04-P的吸附速率。表2显示，在0-0.5 h之内潮滩沉积物对P04-P的吸附速率最大，其值在15.66-56.40 mg /kg h之间，反映沉积物对P04-P的吸附主要发生在0-0.5 h之内。沉积物对P04-P的吸附速率主要取决于沉积物的物理化学参数，0-0.5 h之内沉积物对P04-P的吸附速率，与 $\leq 63\%$ 细颗粒物质的体积百分含量呈较好的正相关关系 ($r = 0.670$, $r^2 = 0.05$, $n = 9$) (图3)，说明在快吸附过程中主要以物理吸附为主，因而细颗粒沉积物含量越高，粒径越小，比表面积越大，沉积物颗粒表面“活性点位”越多[18]，吸附速率也就越大。

2.2 沉积物对P04-P的等温吸附

在一定水温 (20 oC)、pH (7.5) 和盐度 (LJ、SDK、WSK、BLG等处S = 0.5 ‰, DH处S = 5 ‰, LC、FX、JS、DW等处S = 10 ‰) 的条件下，通过改变上覆水中P04-P的浓度，研究了滨岸潮滩沉积物对P04-P的等温吸附曲线 (图4)。实验结果表明，滨岸潮滩沉积物对P04-P的等温吸附曲线符合修正的Langmuir方程，即 $Q = \frac{Q_m C}{C + NAP}$ (2-2) 式中：Q (mg/kg) 为吸附平衡后单位质量的沉积物对P04-P的吸附量；Q_m (mg/kg) 为单位质量的沉积物对P04-P的吸附容量；C (mg/L) 为吸附平衡浓度；NAP (mg/kg) 为本底吸附态磷，可通过线性回归方程 ($Q = mC - NAP$, m为斜率) 得到[5]。表3 中列出了有关长江口滨岸潮滩沉积物对P04-P等温吸附Langmuir方程的特征参数。研究区域内，潮滩沉积物对P04-P的吸附容量在26.32-204.08 mg/kg之间。沉积物对P04-P的吸附容量受沉积物本身的物理化学参数控制[6]。图5a、5b显示，吸附容量与TOC和Fe³⁺含量有较好的正相关关系，相关系数分别为0.945 ($r^2 = 0.01$, $n = 9$) 和0.721 ($r^2 = 0.05$, $n = 9$)，反映长江口潮滩沉积物对P04-P的吸附容量主要受TOC和Fe³⁺含量控制。从吸附容量的地区分布来看，长江口南岸边滩沉积物对P04-P的吸附容量普遍较大，而杭州湾北岸沉积物的吸附容量较小，这可能与上覆水体中盐度存在明显地区差异有关。野外实测盐度资料显示，长江口南岸水体盐度 $< 1\%$ ，主要受长江淡水的控制；杭州湾水体的盐度在10‰-16‰之间；DW采样点处上覆水体的盐度在10 ‰左右，反映出P04-P的吸附容量受水体盐度地区差异的影响。此外，从沉积物中TOC、Fe³⁺含量与P04-P吸附容量的地区分布特征看出，沉积物理化性质对P04-P吸附容量的地区分布差异影响显著 (图6)。当上覆水中P04-P浓度较低或适中时，沉积物对P04-P为线性吸附，此时Langmuir等温吸附曲线方程的斜率，可用来衡量沉积物对P04-P的吸附效率。长江河口滨岸潮滩沉积物对P04-P的吸附效率在21.55-248.30 L/kg之间 (表3)，研究发现，研究区内沉积物的吸附效率与TOC 含量有较好正相关关系 ($r = 0.917$, $r^2 = 0.01$, $n = 9$) (图7)，反映出沉积物对P04-P的吸附效率主要取决于TOC含量，与Lopez等研究结果[6]相吻合。

2.3 环境因子对P04-P吸附特性的影响

pH、盐度和温度是影响沉积物吸附特性的主要因素。为此，在上覆海水P04-P的初始浓度为1mg/L的条件下，模拟了pH、盐度和温度的变化对沉积物吸附磷特性的影响。

2.3.1 pH效应

据长江口滨岸水体pH值变化范围，该实验将pH设在5.0-10.0之间，在一定温度 (20oC) 和盐度 (LJ、SDK、WSK、BLG等处S = 0.5 ‰, DH处S = 5 ‰, LC、FX、JS、DW等处S = 10 ‰) 的条件下，模拟了pH值对沉积物吸附磷特性的影响 (图8)。由图8可见，沉积物对P04-P的吸附作用受pH值变化影响非常强烈。pH对长江口潮滩各采样点处沉积物吸附磷特性的影响具有相似性。pH在7-8之间P04-P的吸附量较小；在偏酸性 (pH ≤ 7) 的条件下，随pH增大，P04-P的吸附量逐渐减小，而在偏碱性 (pH > 8) 条件下，随pH值的升高，P04-P的吸附量逐渐增大。P04-P在沉积物上的吸附量Q-pH曲线呈“U”形，且符合方程 $Q = aX + bX^2 + c$ ，其中Q为单位质量的沉积物对P04-P的吸附量；X为pH值；a、b、c为常数(表4)。滨岸潮滩沉积物中富含钙，在沉积物-水体系中易形成P04-P-Ca-沉积物固体颗粒三元体系，在偏酸性的沉积物-水体系中P04-P的络合作用及钙在沉积物颗粒上的交换作用较小，这时P04-P的界面作用主要以阴离子交换为主，且随pH的增大阴离子交换速率变小，因而沉积物对P04-P的吸附量随pH增大而逐渐变小；在偏碱性条件下，钙能够在沉积物固体颗粒上发生阳离子交换作用，并结合水中的P04-P，形成表面络合物，而使沉积物对P04-P的吸附量随pH的增大而增大[19]。

2.3.2 盐度效应

据长江口滨岸水体盐度变化范围，实验将盐度S设在0-25 ‰，在温度t = 20 oC和pH = 7.5条件下，模拟了盐度对沉积物吸附磷特征的影响。实验结果表明 (图9)，在低盐度区，随盐度的增加，沉积物对P04-P的吸附量而显著增加，而当盐度大于5‰时，反而随盐度的增加，吸附量略有下降趋势，这与文献[18, 20, 21]中的研究结果基本一致。这可能在低盐度范围内，随盐度增加离子强度增大，水体中发生颗粒凝聚而吸附P04-P，从而使吸附量增加。当盐度增加到一定程度时，水中的Cl⁻、SO₄²⁻、OH⁻、和Br⁻等阴离子与P04³⁻竞争沉积物表面的交换“活性点位”，从而降低了沉积物对P04-P的吸附能力，使P04-P吸附量随盐度的增加而减小。

2.3.3 温度效应

在一定pH (7.5) 和盐度 (LJ、SDK、WSK、BLG等处S = 0.5 ‰, DH处S = 5 ‰, LC、FX、JS、DW等处S = 10 ‰) 的条件下，模拟了不同的环境温度对沉积物吸附磷特性的影响。图10显示了环境温度与沉积物对P04-P吸附量的关系。实验结果表明，温度对P04-P的吸附影响显著，随温度的升高，P04-P的吸附量基本上呈线性增加。石晓勇等在黄河悬口悬浮物对P04-P的吸附-解吸研究中也得到了类似的结论[11]，反映了随环境温度的升高，发生在水-沉积物固体颗粒界面上的离子交换强度和速率加大，提高了沉积物对P04-P的吸附量。

3 沉积物对P04-P吸附的环境意义

在河口滨岸水体环境中，沉积物-水界面间P04-P的物质交换包含有许多生物和非生物过程，其中界面吸附在P04-P的物质传输过程中起着非常重要的作用。在长江口近岸水体中P04-P是决定水体发生富营养化的主要限制性因素，同时长江

河口作为海陆过渡带, 在冲淡水和外海海水的交互过程中, 环境物理化学参数(尤其pH和盐度)变化剧烈, 严重影响了沉积物-水界面间P04-P的物质交换, 因此, 研究沉积物对P04-P的吸附特性具有重要的环境意义。从长江口潮滩沉积物吸附磷动力学曲线上可以看出, 沉积物对P04-P的吸附在0-10 h之内基本上达到了动态平衡, 且在0-0.5 h之内沉积物对P04-P的吸附速率最大, 说明在一个涨落潮期间, 潮滩沉积物与上覆海水之间有充足的时间进行物质交换, 反映了潮滩沉积物的吸附磷特性对保持上覆水体中P04-P的含量有重要作用。本文主要研究了单个环境因子变化对沉积物吸附P04-P的影响。实验结果表明, 环境因子(温度、盐度和pH等)的微小变化对沉积物吸附磷的量具有显著的影响, 如果在多环境因子的综合作用下, 沉积物对上覆海水中P04-P的吸附特性势必会变的更加复杂。尤其河口滨岸地区是一个典型的环境敏感区和脆弱带, 环境因子pH和盐度易同时发生剧烈变化, 必将加剧沉积物-上覆海水界面间P04-P的物质交换的复杂性, 进而会影响滨岸水体环境质量, 但这方面的工作还有待于深入研究与探讨。

4 结论

潮滩表层沉积物P04-P的吸附动力学过程揭示, 沉积物对P04-P的快吸附过程主要发生在0-10 h内, 尔后基本上达到了一种慢吸附的平衡过程。不同取样时段内沉积物对P04-P的吸附速率显示, 沉积物对P04-P的吸附主要发生在0-0.5 h之间, 且其吸附速率受细颗粒物含量影响显著。滨岸潮滩表层沉积物对P04-P的吸附容量在26.32-204.08 mg/kg之间, 且吸附容量与TOC和Fe³⁺含量有较好的正相关关系, 反映出长江口潮滩沉积物对P04-P的吸附容量与Fe³⁺和TOC含量有密切关系; 沉积物对P04-P的吸附效率在21.55-248.30 L/kg之间, 且吸附效率与TOC含量有显著的正相关关系, 反映沉积物对P04-P的吸附效率主要取决于TOC含量。环境因子(pH、盐度和温度等)对沉积物吸附P04-P作用有显著的影响。随pH的变化, 沉积物对P04-P的吸附量呈“U”形变化曲线, pH在7-8之间P04-P的吸附量较小; 在偏酸性(pH < 7)的条件下, 随pH增大, P04-P的吸附量逐渐减小, 而在偏碱性(pH > 8)条件下, 随pH值的升高, P04-P的吸附量逐渐增大。在低盐度区, 随盐度的增加, 沉积物对P04-P的吸附量而显著增加, 而当盐度大于5‰时, 反而随盐度的增加, 吸附量略有下降趋势。温度也是影响沉积物吸磷量的重要因素之一, 随温度的升高, P04-P的吸附量基本上呈线性增加。

参考文献(References) [1] Cambridge D E C. Phosphorus: An Outline of Its Chemistry, Biochemistry and Technology. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 7. [2] Berner E K, Berner R A. The Lake Water Cycle, Geochemistry and Environment. New Jersey: Englewood Cliffs, Prentice Hall Inc., 1987. 190. [3] Conley D J, Stockenberg A, Carman R et al. Sediment-water nutrient fluxes in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45: 591-598. [4] Warnken K W, Gill G A, Santschi P H et al. Benthic exchange of nutrients in Galveston Bay, Texas. *Estuaries*, 2000, 23(5): 647-661. [5] Slomp C P, Malschaert J F P, Van Raaphorst W. The role of adsorption in sediment-water exchange of phosphate in North Sea continental margin sediment. *Limnol. Oceanogr.*, 1998, 43(5): 832-846. [6] Lopez P, Lluch X, Vidal M et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the Balearic (Spain) related to their composition. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42: 185-195. [7] Jugsujinda A, Krairapanona, W H Patrick, JR. Influence of extractable iron, aluminum, and manganese of P sorption in flooded acid sulfate soils. *Biol. Fertil. Soil*, 1995, 20: 118-124. [8] Jones R I, P J Shaw, H DE Haan. Effects of dissolved humic substances on the speciation of iron and phosphate at different pH and ionic strength. *Environ. Sci. Technol.*, 1993, 27: 1052-1059. [9] Shang C, Stewart J W B, Huang P M. pH effect on kinetics of adsorption of organic and inorganic phosphates by short-range ordered aluminium and iron precipitates. *Geoderma*, 1992, 53: 1-14. [10] Sundareshwar P V, Morris James T. Phosphorus sorption characteristics of intertidal marsh sediments along an estuarine salinity gradient. *Limnol. Oceanogr.*, 1999, 44(7): 1693-1701. [11] Shi Xiaoyong, Shi Zhi li, Yu Heng et al. The discussion on phosphate buffering mechanisms in Huanghe Estuary I. *Limnol. Oceanogr.*, 1999, 30(2): 192-197. [石晓勇, 史致丽, 余恒 等. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨I. *海洋与湖沼*, 1999, 30(2): 192-197.] [12] Yu G H, Martin J M, Zhou J Y. Biochemical study of the Changjiang estuary. In: *Proceedings of the International Symposium on Biochemical Study of the Changjiang Estuary and Its Adjacent Coastal Waters of the East China Sea*. Beijing: Ocean Press, 1990. 898. [13] Liu Min, Lu Min, Xu Shiyuan et al. Phosphorus species in aquatic sediments at the Yangtze Estuary and Shanghai coast. *Earth Science Frontier*, 2000, 7(Suppl.): 94-98. [刘敏, 陆敏, 许世远 等. 长江河口及其上海滨岸水体沉积物中磷的存在形态. *地学前缘*, 2000, 7(增刊): 94-98.] [14] Liu Min, Hou Lijun, Xu Shiyuan et al. Nitrogen and phosphorus diffusive fluxes at sediment-water interface from estuarine tidal flats. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(3): 19-23. [刘敏, 侯立军, 许世远 等. 河口滨岸滨岸潮滩沉积物-水界面N、P的扩散通量. *海洋环境科学*, 2001, 20(3): 19-23.] [15] Han Wuying. The investigation manual on chemical elements in sea water. Beijing: Ocean Press, 1986. 33. [韩舞鹰 编. 海水化学要素调查手册. 北京: 海洋出版社, 1986. 33.] [16] Xie Xianqun, Wang Lijun. Observation and analysis of water environment factors. Beijing: China Standard Press, 1998. 56-57. [谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1998. 56-57.] [17] Nanjing Agriculture College. *Agricultural and Chemical Analysis of Soil*. Beijing: Agriculture Press, 1980. 33-239. [南京农学院主编. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1980. 33-239.] [18] Lin Ronggen, Wu Jingyang. The phosphate adsorption on and release from sediments in Huanghe Estuary. *Acta Oceanology Sinica*, 1994, 16(4): 82-90. [林荣根, 吴景阳. 黄河口沉积物对磷酸盐的吸附与释放. *海洋学报*, 1994, 16(4): 82-90.] [19] Zhao Hongbin, Liu Liansheng, Zhang Zhengbin. Anion exchange of solid ion with phosphate in sea water: the V shape curve between pH and exchanging rate of solid ion with phosphate in sea water. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, 28(3): 294-301. [赵宏宾, 刘莲生, 张正斌. 海水中磷酸盐在固体离子上阴离子交换作用—海水中磷酸盐-固体离子相互作用的V形交换率-pH曲线. *海洋与湖沼*, 1997, 28(3): 294-301.] [20] Strirling H P, Wormald A P. Phosphate/sediment interaction in Tolo and Long Harbours, Hongk

ong, and its role in estuarine phosphorus availability. Estua. Coast Mar. Sci., 1977, 5: 631-642. [21] Tanaka K. Phosphate adsorption and desorption by the sediment in Chikugo River Estuary, Japan. Bull. Seikai Reg Fish Res. Lab., 1988, 66: 1-12. Phosphate Adsorption Characteristics of Tidal Flat Surface Sediments and Its Environmental Effect from the Yangtze Estuary LIU Min, HOU Lijun, XU Shiyuan, OU Dongni, ZHANG Binliang, LIU Qiaomei, YANG Yi (Department of Geography, Urban Environmental Processes of the Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China) Abstract: Key words:

关键词: 磷酸盐; 吸附速率; 吸附容量; 吸附效率; 表层沉积物; 长江河口