

研究报告

生物稳定塘常规运行状态模拟与分析

文 湘 华

钱 易 顾夏声

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

(清华大学环境工程研究所, 北京 100084)

摘要 利用在系统实验基础上建立的生态学模型对生物稳定塘的常规运行状态进行了模拟和计算, 得到以下主要结论: 多级塘各塘中的有机碳、无机氮及溶解性总磷浓度均随进水浓度的升高而增大, 因而使用多级塘仍须严格控制进水水质; 生物稳定塘系统有较高的去除有机氮的能力, 但去除总氮的能力有限, 出水中无机氮浓度仍较高; 藻类含碳、氮、磷对进水浓度变化的响应规律一致, 存在一个使藻类生长最佳的营养物浓度, 本模拟中该浓度为进水 $C_{oi} = 72.00\text{mg/L}$, $TN_i = 23.80\text{mg/L}$, $TP_i = 2.46\text{mg/L}$, 藻类浓度的提高有利于溶解性营养物质的去除; 菌含碳、氮、磷对进水浓度变化的响应规律服从 Monod 方程。

关键词 生态学模型, 生物稳定塘, 模拟。

生物稳定塘是一个比较复杂的半人工生态系统, 其中发生着多种生物及生物化学过程, 为了系统认识稳定塘的一般运行规律, 本研究运用笔者建立的生态学模型对稳定塘的常规运行状态进行了模拟和分析。

一、生态学模型简介

笔者在系统实验基础上建立了生物稳定塘系统内碳、氮、磷转移规律的生态学模型, 并对模型进行了全面参数估值和估值的灵敏度分析。用实地塘数据对模型进行了检验。分析及检验结果表明, 模型结构合理, 参数适用, 解法成功。模型如方程(1)~(12)所示, 状态变量的意义及单位如表1所示, 方程中角标“i”表示进水中各状态变量的值。模型主要由涉及生物生长的 Monod 方程(参数 μ, K, Y) 和涉及其它生化反应过程如生物分解(参数 k_d)、自溶(k_L) 和沉淀(k_s) 等的一级反应方程两种子模型构成。

碳:

$$\frac{C_{li}}{\theta} - \frac{C_i}{\theta} + (1 - Y)\mu_{mBC} \frac{C_o}{K_{BC} + C_o} \cdot C_B / Y + k_{dBC} \cdot C_B + k_{dAC} \cdot C_A$$

$$- \mu_{mAC} \frac{C_i}{K_{AC} + C_i} \cdot C_A \cdot f(E) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{C_{Bi}}{\theta} - \frac{C_B}{\theta} + \mu_{mBC} \frac{C_o}{K_{BC} + C_o} \cdot C_B - k_{dBC} \cdot C_B = 0 \quad (2)$$

$$\frac{C_{oi}}{\theta} - \frac{C_o}{\theta} - \mu_{mBC} \frac{C_o}{K_{BC} + C_o} \cdot C_B / Y + k_{LC} \cdot C_A = 0 \quad (3)$$

$$\frac{C_{Ai}}{\theta} - \frac{C_A}{\theta} + \mu_{mAC} \frac{C_i}{K_{AC} + C_i} \cdot C_A \cdot f(E) - k_{dAC} \cdot C_A - k_{LC} \cdot C_A - k_{sC} \cdot C_A = 0 \quad (4)$$

氮:

$$\frac{N_{li}}{\theta} - \frac{N_i}{\theta} + \alpha_N \cdot N_o + k_{dBN} \cdot N_B + k_{dAN} \cdot N_A - \mu_{mBN} \frac{N_i}{K_{BN} + N_i} \cdot N_B - \mu_{mAN} \frac{N_i}{K_{AN} + N_i} \cdot N_A \cdot f(E) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{N_{Bi}}{\theta} - \frac{N_B}{\theta} - \mu_{mBN} \frac{N_I}{K_{BN} + N_I} \cdot N_B - k_{dBN} \cdot N_B = 0 \quad (6)$$

$$\frac{N_{Oi}}{\theta} - \frac{N_O}{\theta} - \alpha_N \cdot N_O + k_{LN} \cdot N_A = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ai}}{\theta} - \frac{N_A}{\theta} + \mu_{mAN} \frac{N_I}{K_{AN} + N_I} \cdot N_A \cdot f(E) \\ - k_{dAN} \cdot N_A - k_{LN} \cdot N_A \\ - k_{SN} \cdot N_A = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

磷:

$$\begin{aligned} \frac{P_{Ti}}{\theta} - \frac{P_T}{\theta} + k_{dBP} \cdot P_B + k_{dAP} \cdot P_A \\ - \mu_{mBP} \frac{P_T}{K_{BP} + P_T} \cdot P_B \\ - \mu_{mAP} \frac{P_T}{K_{AP} + P_T} \cdot P_A \cdot f(E) \\ + k_{LP} \cdot P_A = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{P_{Bi}}{\theta} - \frac{P_B}{\theta} - \mu_{mBP} \frac{P_T}{K_{BP} + P_T} \cdot P_B - k_{dBP} \cdot P_B = 0 \quad (10)$$

$$\frac{P_{Ai}}{\theta} - \frac{P_A}{\theta} + \mu_{mAP} \frac{P_T}{K_{AP} + P_T} \cdot P_A \cdot f(E)$$

$$\begin{aligned} - k_{dAP} \cdot P_A - k_{LP} \cdot P_A - k_{SP} \\ \cdot P_A = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

光强函数:

$$f(E) = \frac{E_{0.5y}}{E_m} \exp\left(1 - \frac{E_{0.5y}}{E_m}\right) \quad (12)$$

表 1 模型中的变量 (mg/L)

状态变量	符 号
无机碳浓度	C_i
菌体含碳浓度	C_B
溶解性有机碳浓度	C_O
藻体含碳浓度	C_A
无机氮浓度	N_i
菌体含氮浓度	N_B
溶解性有机氮浓度	N_O
藻体含氮浓度	N_A
溶解性总磷浓度	P_T
菌体含磷浓度	P_B
藻体含磷浓度	P_A

二、常规运行状态的模拟条件

模拟了一个三级塘的五种运行状态,其进水水质如表 2 所示,停留时间为第一塘 5 日,第二塘 2.5 日,第三塘 2.5 日。

表 2 模拟进水水质 (mg/L)

状态编号	1	2	3	4	5
C_{Oi}	24.00	48.00	72.00	96.00	120.00
TN_i	14.20	19.00	23.80	28.60	33.40
N_{Ii}	2.13	2.85	3.57	4.29	5.01
N_{Oi}	12.00	16.15	20.23	24.31	28.39
P_{Ti}	1.47	1.97	2.46	2.96	3.46

三、模拟结果与分析

将表 2 所列的 5 种模拟状态的进水水质分别代入方程 (1)~(2), 求解后得到如下结果。

1. 状态变量随进水水质的变化

碳、氮、磷模型的求解结果见图 1~3。从图中可清楚地看到各状态变量的变化规律, 以下是对三种元素转移规律的分析, 对于深入认

识塘的工作机理有重要意义。

(1) 碳元素 图 1 是碳元素第一塘的模拟结果, 第二、三塘的模拟结果与第一塘有类似的形式。三级塘各塘中无机碳 C_i 的浓度均随进水有机碳 C_{oi} 浓度的升高而增大, 但变化幅度相对不大, 说明三塘中 C_i 对进水有机碳 C_{oi} 浓度变化的响应规律一致。 C_i 浓度略有增大的主要原因是随进水有机碳浓度的增加, 细菌分

解有机碳产生无机碳的量也加大，而藻又不能利用这么多无机碳所致。说明藻的生长会受自身或其它环境因素的制约，并不只取决于塘内无机碳量的多少。

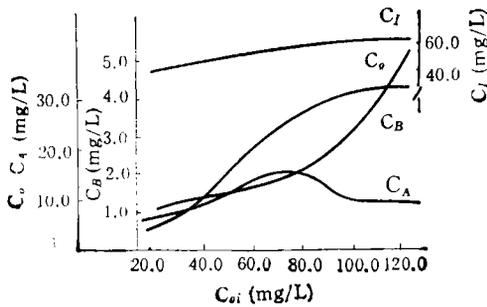


图 1 碳元素第一塘模拟结果

三级塘各塘中菌含碳 C_B 的浓度均先进水有机碳 C_{oi} 浓度的升高而明显增大，其后增长速度变得平缓，这种变化与 Monod 规律非常一致，说明当进水有机碳浓度超过某一值后，细菌的增殖速度将逐渐减小，其对有机物的分解速率也不可能相应增加，因此，为保证塘系统的出水水质应慎重选择塘的进水有机物浓度。

三级塘各塘中有机碳 C_o 的浓度均随进水有机碳 C_{oi} 浓度的升高而增大，三塘中有机碳浓度对进水有机碳浓度变化的响应规律一致，说明尽管多级塘系统可提高塘系统运转的稳定性，但生物稳定塘系统处理有机物的能力是有限的，进水浓度的升高必将使出水有机物浓度升高，不能因为采用了多级塘系统而盲目增大进水浓度。

三级塘各塘的藻含碳均在状态 3 条件下出现一最大值，说明状态 3 的进水营养物浓度最适合藻的生长。进水浓度过低使藻生长的营养不足，而浓度过高又会由于细菌的大量繁殖等因素形成对藻生长的限制。

(2) 氮元素 图 2 是氮元素第一塘的模拟结果。三级塘各塘中的无机氮浓度均随进水有机氮 N_{oi} 浓度的增加而增加。这是因为随进水有机氮浓度的增加，氨化所产生的无机氮随之增加，而藻对营养物质的吸收能力有限。三塘中无机氮对进水中氮变化的响应规律是一致

的。

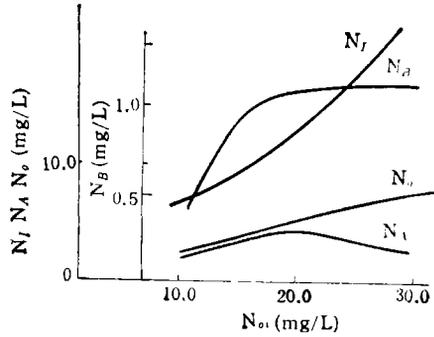


图 2 氮元素第一塘模拟结果

三级塘各塘中有机氮 N_o 浓度随进水有机氮 N_{oi} 浓度的增加而增加，三塘的响应规律一致。塘内有机氮浓度比无机氮浓度低很多，说明塘内有机氮的氨化过程进行得比较好，而产生大量的无机氮没能被藻类及时吸收，形成了较高的无机氮浓度。无机氮是造成接纳水体营养化的因素，因而有机氮的去除情况尚不能说明除氮效果的好坏，必须同时考虑无机氮的情况。

三级塘各塘中菌含氮浓度 N_B 及藻含氮浓度 N_A 随进水有机氮 N_{oi} 浓度变化的规律与菌及藻含碳随进水有机碳的变化规律相同。

(3) 磷元素 磷元素第一塘的模拟结果见图 3。

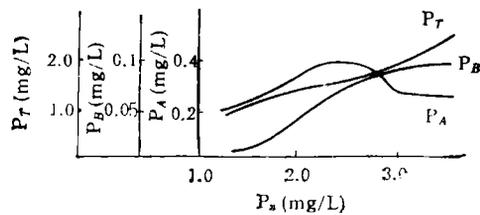


图 3 磷元素第一塘模拟结果

三级塘各塘中总磷 P_T 的浓度随进水总磷 P_{oi} 浓度的增加而增加，三塘的响应规律一致。说明采用多级塘系统时亦不宜选用过高的进水总磷浓度，因为这对后级塘也要产生一定的影响。

三级塘各塘中菌含磷 P_B 及藻含磷 P_A 浓

度随进水总磷 P_{Ti} 变化的规律与菌及藻含碳随进水有机碳浓度变化而变化的规律相同。

2. 状态变量随停留时间(即沿程)的变化

状态 1、3、5 (见表 2) 三个条件下各状态变量沿程变化的模拟结果见图 4—9。图中括号内的数字表示模拟状态, 以下是对模拟结果进行的分析。

(1) 碳元素 从图中可以看到有机碳在第一塘(前五日)内迅速减少, 之后减少速度变慢。进水浓度高时, 曲线前段的斜率大, 也即高浓度时降解速率比低浓度时大, 但剩余的有机碳量也多, 这与一般规律相符。

菌含碳在第一塘达到最大值, 之后逐渐减少, 进水浓度高时菌浓度也高。

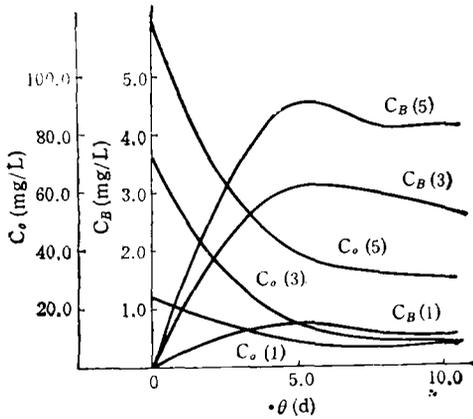


图 4 C_B, C_O 沿程变化

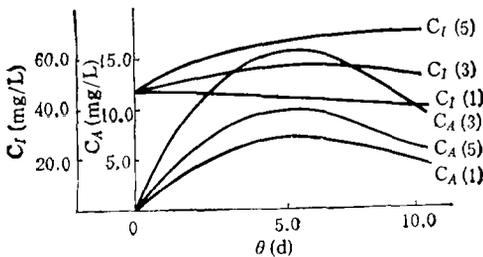


图 5 C_I, C_A 沿程变化

状态 3、5 的无机碳浓度由于进水浓度高, 沿程略有增加。说明此时菌分解有机碳产生的无机碳量大于菌利用的无机碳量, 使无机碳略有储蓄。而状态 1 进水浓度较低, 无机碳沿程减少。说明此时细菌分解有机碳所产生的无机碳量不足以满足藻生命活动的需要, 碳酸盐系

统发挥自动调节作用为藻类生长提供了部分无机碳源。

藻含碳在第一塘内达到最大值, 之后逐渐减少。这是因为在第一塘内物质转移活跃, 运动中的营养物质大。比较图 4 和图 5 可见菌、藻含碳量达到最大值的时间是一致的, 这也说明了二者的依存共生关系。

(2) 氮元素 有机氮的沿程变化情况见图 6。有机氮 N_o 在第一塘内大量减少, 第二塘后减少速率显著降低。说明第一塘内氨化速率很高, 第二、三塘内有机氮浓度已比较低, 氨化速率自然减慢。第三塘内有机氮浓度略有增加主要是微生物自溶产生的有机氮造成的。

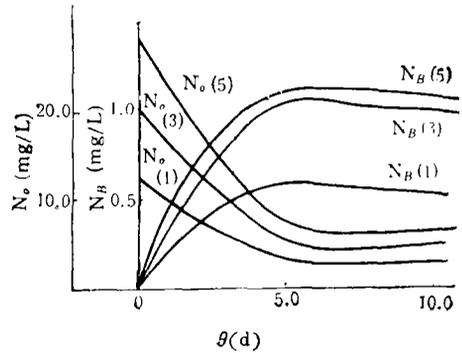


图 6 N_o, N_B 沿程变化

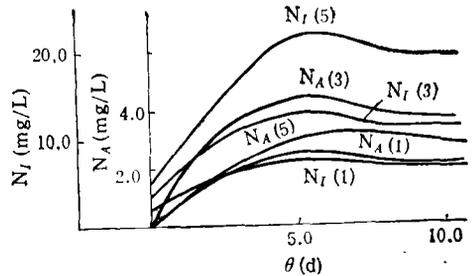


图 7 N_I, N_A 沿程变化

从图 6 及图 7 中可见菌含氮及藻含氮的沿程变化规律与菌及藻含碳的沿程变化规律一致。

无机氮浓度在第一塘内达最大点, 之后逐渐减少。这是因为有机氮向无机氮的转化主要在第一塘内完成, 之后由于藻对无机氮的利用而沿程减少。

(3) 磷元素 溶解性总磷 P_T 的变化情况见图 8。从图中可以看出溶解性总磷沿程逐渐减少,但减少速率不象碳、氮那样明显。因为溶解性磷的去除主要靠微生物的同化作用完成,而微生物体内含磷比例较小。

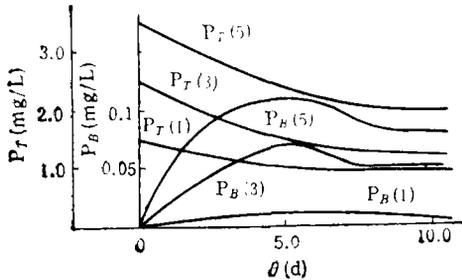


图 8 P_T 、 P_B 沿程变化

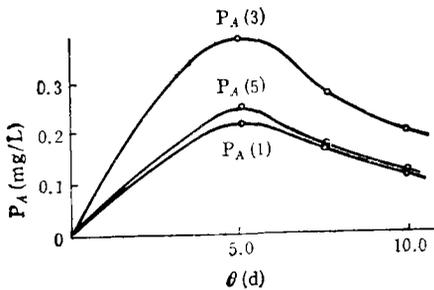


图 9 P_A 沿程变化

菌含磷及藻含磷的沿程变化规律与藻含碳及菌含碳的沿程变化规律一致。

四、结 论

通过上述模拟计算与分析得到以下几点主要结论:

1. 多级塘各塘中的有机碳浓度均随进水有

(上接第 65 页)

(六) 建立长期定位观测监测台站

对大型水利工程的环境影响研究,需要长期跟踪监测,长期资料累积。建立定位监测台站,形成网络,是必要的。台站的设置和布局既要考虑环境影响的空间、时间,又要考虑影响的因素。一般来说,要按照库区、中下游、河口等不同区域特点和水生生态,水环境、陆生生态、环境地质、物种、景观等不同类型要求,建立专业或综合定位观测台站。

机碳浓度的升高而增大,各塘的响应规律一致。因此,不能因为采用了多级塘系统而盲目增大进水浓度,以免影响出水水质。对无机氮及溶解性总磷的分析表明它们的情况与有机碳相同。

2. 对有机氮及无机氮的分析表明生物稳定塘系统有较高的去除有机氮的能力,但去除总氮的能力有限,出水中无机氮浓度较高。

3. 菌含碳、氮、磷对进水浓度变化的响应规律一致。菌浓度随进水营养物浓度增加而变化的规律服从 Monod 方程。

4. 藻类含碳、氮、磷对进水浓度变化的响应规律一致。存在一个使藻类生长最佳的营养物质浓度。在本研究中该进水浓度为 $C_{oi} = 72.00\text{mg/L}$, $TN_i = 23.80\text{mg/L}$, $TP_i = 2.46\text{mg/L}$ 。藻浓度的提高有利于溶解性营养物质的去除。

5. 菌及藻含碳、氮、磷的沿程变化规律一致。菌及藻均在第一塘内达到最大值,之后逐渐减少。

6. 溶解性有机碳及溶解性有机氮均在第一塘内大大减少。无机碳浓度在进水浓度高时沿程逐渐增加,进水浓度低时沿程逐渐减少。溶解性总磷沿程逐渐减少。

参 考 文 献

- 1 Buhr H O & Miller S B. *Water Res.* 1983, 17(1): 29
- 2 Fritz J J. *JWPCF*. 1979, 51(11): 2724
- 3 Ferrara R A & Harleman D R F. *J. Environ Eng. Div.* 1982, 106 (EE1): 37

参 考 文 献

- 1 中山大学环境科学研究所等. 龙滩水电工程对珠江三角洲生态和环境的影响研究. 广州: 中山大学出版社, 1989: 3-42
- 2 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组. 长江三峡工程对生态与环境的影响及对策研究. 北京: 科学出版社, 1988: 279-336
- 3 曲格平等编. 发展中国家环境影响评价论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 1985: 1-13

Simulation and Analysis of Biological Stabilization Pond System. Wen Xinghua (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Academia Sinica, Beijing), Qian Yi, Gu Xiasheng (Department of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(3), 1992, pp. 2—6

An ecological model was established by the authors to simulate the general operation characteristics of the biological stabilization pond system. It was concluded that the concentrations of organic carbon as well as nitrogen and phosphorus in each stage of a multi-stage pond increase with the increase of influent concentrations and therefore it is not proper to run a multi-stage pond at too high influent concentrations; the removal rate of the pond for organic nitrogen is rather high but not for total nitrogen for the pond system has a limited ability to remove inorganic nitrogen; the responses of carbon, nitrogen and phosphorus contents in bacteria cells to the influent concentrations follow the Monod formula; the responses of carbon, nitrogen and phosphorus content in algae cells are similar. There exists an optimum nutrient concentration for algae growth. In this study the concentration is:

$C_{0i} = 72\text{Mg/L}$, $TN_i = 23.80\text{Mg/L}$, and $TP_i = 2.46\text{Mg/L}$. The elevation of algae concentration is beneficial to the removal of dissolved nutrients.

Key words: ecological model, simulation, biological stabilization pond, waste water treatment, organic carbon in waste water, nitrogen in waste water, phosphorus in waste water.

Effect of pH and Temperature on Cr(VI) Removal from Soil Solution. Chen Yingxu, Zhu Yinmei, Yuan Keneng and Zhu Zuxiang (Zhejiang Agricultural University, Hangzhou): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(3), 1992, pp. 7—10

The process of Cr(VI) removal from soil solution could be divided into two steps. The first step is a fast reaction depending mainly on the rate of Cr(VI) adsorption. The second step is a slow reaction depending mainly on the rate of Cr(VI) reduction. As the pH of soil solution increased, the rate constants, K_1 and K_2 of Cr(VI) removal by soils decreased obviously. The influence of temperature on the kinetics of Cr(VI) removal varied with various soils and was found to be quite complicated. The influence of temperature on the removal of Cr(VI) are mainly associated with Cr(VI) adsorption and reduction.

Key words: Chromium, adsorption, reduction, chromium in soil.

Preliminary Studies of the Buffering Effect of Tree Grows and Leaf Litter on Simulated Acid Rain. Deng shijian, Chen Chuying, Zhang Jiawu, Wang Silong (Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(3), 1992, pp. 10—17

The studies of the buffering effect of crown, leaf litter and live leaves on acid rain were carried out with simulation methodology. The results show that buffering ability of broadleaf trees was greater than that of conifers, that tree species with higher leaf juice pH values are more capable of buffering acid rain than those with lower leaf juice pH values, and that the ability of broadleaf tree species is directly proportional to the area of leaves. As to conifers, however, the ability of tree species with larger leaf areas tends to be smaller. The order of buffering ability of different materials at pH2.00 and 3.00 was found to be: leaf litter > live leaves > crown, while at pH4.50 the order is leaf litter > crown > live leaves.

Key words: simulated acid rain, throughfall, leaf litter, leaf juices, buffering.

Study on Biodegradability of Terephthalic Acid. He Xinghai, Zhang Zhongxiang, Ma Shihao (Beijing Municipal Research Institute of Environment Protection): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(3), 1992, pp 18—25

A study on the biodegradability of terephthalic acid (TA) aiming at clarifying its biodegradation characteristics, biodegradation rate and metabolic pathways, by activated sludge was carried out. The results show that terephthalic acid can be biodegraded rapidly by microorganisms. The relationship between biodegradation rate and the concentration of TA can be fitted into Michaelis-Menten model. The biodegraded products from terephthalic acid by activated sludge were identified as m-hydroxybenzoic acid and protocatechuic acid and a metabolic pathway of terephthalic acid was accordingly proposed.

Key Words: Biodegradation of terephthalic acid, activated sludge, metabolism of terephthalic acid.

Phosphorus Release from Sediments and Its Effects on the Eutrophication of the West Lake. Han Weiming (Hangzhou Institute of Environmental Protection, Hangzhou): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(3), 1992, pp. 25—29

The sediments of the West Lake in Hangzhou, a small and shallow lake, are characterized by high organic carbon content (average 16.70%) and pretty high nitrogen content (average 0.98%). Simulation studies in the laboratory and in the field were conducted to determine the effects of various environmental parameters including pH, temperature, dissolved oxygen concentration, redox potential and the type of overlying water on phosphorus release rate and release capacity from the sediments. The lowest release capacity was observed in a pH range of 6.5—7.0 of the overlying water. At higher or lower pH values, the release could be redoubled. Raising the temperature or decreasing oxygen concentration in the overlying water also led to the increase of phosphorus release. The highest release capacity was found to be 0.368 $\mu\text{g/g}$ in the laboratory. The average release rate measured in the