

汪家权, 沈燕华, 马玉萍. 2010 巢湖流域岩源磷释放的动力学研究 [J]. 环境科学学报, 30(5): 979-984

Wang JQ, Shen YH, Ma YP. 2010. Release kinetics of rock phosphorus in the Chaohu Lake area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(5): 979-984

巢湖流域岩源磷释放的动力学研究

汪家权*, 沈燕华, 马玉萍

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

收稿日期: 2009-08-10 修回日期: 2009-12-08 录用日期: 2010-02-03

摘要: 为了研究巢湖流域富磷地质岩石中磷素(即岩源磷)的释放动力学特征, 用 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 连续提取法对岩样进行岩源磷释放的动力学实验, 并应用统计学原理建立化学动力学的非机理模型研究岩源磷的释放过程。同时, 选用零级方程、一级方程、二级方程、抛物线方程、Elovich 方程、权函数方程等 6 个动力学模型进行解析过程拟合, 分析岩源磷动力学释放的主要化学过程。结果显示, 随着反应时间的延长, 磷的释放量均不断增加, 释放速率随时间的延长而下降。选用的几种动力学模型中, 一级方程、Elovich 方程、权函数方程和抛物线方程对岩源磷的释放动力学过程均能很好地拟合, 其中以一级方程拟合度最佳。岩源磷的释放动力学过程是一个以扩散过程为主的反应过程。

关键词: 巢湖; 磷; 岩源磷; 释放动力学

文章编号: 0253-2468(2010)05-979-06 中图分类号: X171 文献标识码: A

Release kinetics of rock phosphorus in the Chaohu Lake area

WANG Jiaquan*, SHEN Yanhua, MA Yuping

School of Resources and Environmental Sciences, Hefei University of Technology, Hefei 230009

Received 10 August 2009; received in revised form 8 December 2009; accepted 3 February 2010

Abstract The release kinetics characteristics of phosphorus in rocks (rock P) of the Chaohu lake basin were investigated using continuous extraction with $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$. And the application of statistical principles established in the chemical kinetics model to study the mechanism of rock source phosphorus release process. As to the zero-order, first-order, second-order, simple Elovich, power function, and parabolic diffusion kinetics model were chose for analytical process then fitting them in chemical process of the release mechanism of rock phosphorus. The results show that the amount of the released phosphorus increased with the time, while the rate of phosphorus released declined with time. Several dynamic models including the first-order, simple Elovich, power function, and parabolic diffusion kinetics models were found to fit the data and described the rock P release kinetics well. The first-order model had the best fit. The data indicate that the release mechanism of rock phosphorus is a simple first-order kinetic reaction that mainly involves diffusion.

Keywords Chaohu Lake; phosphorus; rock phosphorus; release kinetics

1 引言 (Introduction)

巢湖位于安徽省中部、长江中下游, 是我国著名的五大淡水湖之一。但近 30 年来, 巢湖水资源污染日益加重, 水体严重富营养化, 其水污染治理及生态恢复受到政府和有关方面的高度重视 (屠清瑛等, 1990; Xu *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 2009)。关于巢湖富营养化问题的研究从“七五”就已开始进行, 结果表明, 湖泊富营养化的主要限制因子是磷 (Smith, 1982; 彭近新等, 1988; Sharpley *et al.*, 1994; David, 1998; Smith *et al.*, 1999)。但目前的研究多集中在湖

泊环境中磷素含量、分布与迁移转化及湖泊沉积物中工农业磷素污染等方面 (汪家权, 2002; 黄清辉等, 2003; 陈云峰等, 2006; 王绪伟等, 2007; 周慧平等, 2008), 鲜见有关巢湖流域富磷地层自然本底磷(简称岩源磷)的报道。

研究指出, 巢湖地处富磷地质区, 由于特殊的地质构造, 天然的磷背景值很高, 如流域北岸的肥东县和巢湖市的居巢区一带, 广泛分布着古老的含磷变质岩系, 总面积达 500 km^2 以上, 周围几乎全部被磷矿包围 (韩德刚, 1987)。巢湖地区属于江淮低山丘陵区, 地貌以低山丘陵和波状平原为主, 在成

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技专项 (No. 2008ZX07103-003)

Supported by the National Scientific Special of Water Contamination Control and Remediation (No. 2008ZX07103-003)

作者简介: 汪家权 (1957-), 男, 教授 (博士); * 通讯作者 (责任作者), E-mail: jiaquan.wang@163.com

Biography: WANG Jiaquan (1957-), male, professor (Ph.D.); * Corresponding author. E-mail: jiaquan.wang@163.com

土母质方面,相对低平的波状平原上覆盖着深厚的下蜀黄土母质,发育土体深厚、质地粘重的黄褐土;而低山丘陵中上部的母质是花岗片麻岩、片麻岩等岩石的风化残积坡积物,发育土体浅薄、砂性大、偏酸性的粗骨土;低山丘陵中下部的母质是花岗片麻岩、片麻岩等岩石的风化坡积物,发育土体较厚、偏酸性的黄棕壤。矿区主要矿石类型为磷灰岩,直接覆盖于磷矿上部的土壤多为普通黄棕壤。区域内的农业利用时间较久,除了少数山体中上部生长森林和草木以外,其它地区基本都开垦成农田(韩德刚, 1987; 胡宏详, 2008)。北部肥东群的产磷层位是目前主要的露采区和群众开采矿点,从磷矿区发源的水系大部分汇入巢湖,而这些河流补给又来源于含磷层位出露区的地表径流,富磷地层的自然风化以及人为开采所导致的磷流失必然最终汇入巢湖。因此,对于巢湖来说,流域磷的高背景值无疑对其富营养化问题具有十分重要的影响,地层中的含磷层位对磷污染不容忽视。

化学动力学是研究化学工程进行的速度及其影响因素,从而揭示化学过程机制的一个分支科学(韩德刚, 1987)。富磷岩层是一个开放体系,其中,磷素的流失包括多种化学过程,用化学动力学的思想和方法研究其中的化学变化,将有助于了解岩源磷释放的真实状况,可为进一步调查富磷岩层由于风化、运移导致的磷流失及其对巢湖污染的贡献提供理论依据,对于巢湖磷素污染控制具有重要的实

际意义。磷释放动力学研究的目的在于阐明磷释放过程机理,在动力学方法上,长期间歇法是常用方法。因此,本文利用有效磷的连续提取法研究岩源磷释放动力学特征,并应用统计学原理建立化学动力学的非机理模型研究岩源磷的释放过程。同时,选用抛物线方程、Elovich方程、权函数方程等6个动力学模型进行解析过程拟合,根据拟合度分析岩源磷动力学释放的主要化学过程,以期为进一步结合动力学反应过程前后岩源磷的赋存形态变化,建立岩源磷环境系统非机理模型,对其进行模拟与仿真提供理论依据。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 样品的采集与分析

样品采自安徽省巢湖北岸东部龟山,岩体 SO_2 含量在 70% 左右,岩石吸收品质因子 Q 值为 30 左右,属查氏二类三科或四科,为 SO_2 过饱和的过碱性及中碱性岩石。所有采样点均使用全球卫星定位系统进行定位(表 1),共采集了 12 个岩样,所采样品均粉碎过 100 目筛备用。

用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定岩样中总磷 (TP) 的含量(金相灿等, 1990),并用 $0.5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 法和钼锑抗比色法测定其中有效磷 (Olsen P) 含量(鲁如坤, 2000),测试结果如表 1 所示。

表 1 样品分布位置和基本理化指标
Table 1 Location and main properties of the samples

样品种类	样品序号	纬度 (N)	经度 (E)	TP / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Olsen P / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	岩性
岩样	1	31° 38' 19.4"	117° 49' 27.2"	85	2.6	红色粗砂岩
岩样	2	31° 38' 18.5"	117° 49' 21.8"	86	0.57	红色粗砂岩
岩样	3	31° 38' 18.8"	117° 49' 27.2"	73	2.49	红色粗砂岩
岩样	4	31° 38' 18.2"	117° 49' 27.9"	99	2.87	红色粗砂岩
岩样	5	31° 38' 17.6"	117° 49' 27.9"	81	0.56	红色粗砂岩
岩样	6	31° 38' 17.5"	117° 49' 23.1"	91	2.59	红色粗砂岩
岩样	7	31° 38' 17.3"	117° 49' 27.9"	91	1.15	石英砂岩
岩样	8	31° 38' 03.3"	117° 49' 47.6"	113	1.53	灰色石灰岩
岩样	9	31° 38' 17.9"	117° 49' 30.1"	60	1.06	红色粗砂岩
岩样	10	31° 38' 18.1"	117° 49' 29.4"	80	1.21	红色粗砂岩
岩样	11	31° 38' 17.7"	117° 49' 27.8"	60	1.92	红色粗砂岩
岩样	12	31° 38' 17.7"	117° 49' 27.8"	73	1.24	红色粗砂岩

2.3 磷释放动力学实验

对岩样进行岩源磷释放的动力学实验。在 100mL 离

心管中加入 0.25g 岩样和 50mL $0.5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

用 $0.5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 ($\text{pH} = 8.5$) 连续提取法

NaHCO₃ (pH = 8.5) 溶液, 即固液比 1:20 在 200 r min⁻¹、25℃的恒温水浴振荡器下连续振荡 1h; 然后将离心管放至于 25℃恒温培养箱, 23h后, 取出离心管, 4500 r min⁻¹转速下离心 15 min, 分离固、液相. 取上清液, 过 0.45μm 滤膜后, 用钼锑抗分光光度法测定提取液中磷的浓度 (C_i). 在离心管残渣中加入 50mL 0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃ (pH = 8.5) 溶液, 保持水土比不变, 进入下一个提取环节, 步骤如上, 并分别在浸提不同时间 (72、144、240、360、480、648、888h) 测定提取液中磷的浓度. 按式 (1) 计算岩源磷的累积释放量 Q (mg L⁻¹).

$$Q = \left[\sum_{i=1}^n C_i V_i - \sum_{i=2}^n C_{i-1} (V_i - V_{i-1}) \right] / V_i \quad (1)$$

式中, V_i 为第 i 次采样时离心管中溶液的体积 (L), C_i 为第 i 次采样时上清液的磷浓度 (mg L⁻¹), V_{i-1} 为第 (i-1) 次采样后添加的 NaHCO₃ 溶液体积 (L), C_{i-1} 为第 (i-1) 次采样时上清液的磷浓度 (mg L⁻¹).

2.4 磷释放动力学拟合模型和评价系数

磷释放动力学用零级方程、一级方程、二级方程、Elovich 方程、权函数方程和抛物线方程 6 种描述化学反应动力学的常见模型进行拟合, 几种方程的具体表达式见表 2.

表 2 描述 P 释放的动力学模型

Table 2 Kinetic models used to describe P release

模型	方程	常数
零级方程	$P_0 - P_t = a - k_0 t$	a, k ₀
一级方程	$\ln(P_0 - P_t) = d - k_1 t$	d, k ₁
二级方程	$1/P_t = 1/P_0 + k_2 t$	k ₂
Elovich 方程	$P_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + (1/\beta) \ln t$	α, 1/β
权函数方程	$\ln P_t = \ln a + b \ln t$	a, b
抛物线方程	$P_t/P_0 = c + r t^2$	c, r

注: P₀ 为平衡时 P 释放的累积量 (mg kg⁻¹); P_t 为经过时间 t (h) P 释放的累积量 (mg kg⁻¹).

用可决系数 R² 和标准估计误差 SE 对拟合岩源磷释放的动力学方程进行评价, SE 的计算公式如下所示:

$$SE = \left[\frac{\sum (P_m - P_c)^2}{n - 2} \right]^{0.5}$$

式中, P_m 和 P_c 分别为 t 时刻 P 释放的测定值和计算值 (mg kg⁻¹), n 代表测试的次数.

3 结果 (Results)

3.1 时间对岩源磷释放量与释放速率的影响

岩源磷释放量与时间的关系如图 1 所示. 由图 1 可以看出, 12 种供试岩源磷释放动力学曲线具有

非常相似的形状, 随着时间的延长, 岩源磷释放量不断增加. 曲线上上升趋势反映了释放速率的大小, 最初磷的释放速率较快, 接近释放与吸收量平衡时, 释放速率减缓. 这一点与文献报道的研究结果相似 (Barrow, 1979; Griffin et al., 1974; Lookman et al., 1995; Sildique et al., 2004; Toor et al., 1999), 最初较快速率释放的大部分是不稳定的磷, 如交换态磷或铁磷等, 后期较慢速率释放的磷则代表了少部分稳定态磷的转化, 如原生态磷和闭蓄态磷.

对于岩石样长期间歇实验而言, 在前 480h 内, 磷的释放速率较快, 约占总释放量 80% 的磷通过溶解和扩散释放出来; 在 640h 左右, 磷的释放量达到了 90% 以上, 释放速率变慢; 随着反应时间的延长, 磷的释放速率进一步减缓. 因此, 40~50d 的长期间歇实验反应时间基本上可反映出磷从岩石中释放的动力学过程. 岩样浸提 1224h 后, 12 种岩样的磷释放量为 5.14~15.75 mg kg⁻¹, 平均释放了 10.9 mg kg⁻¹, 其中, 1# 岩样的磷累积释放最多, 高达 15.75 mg kg⁻¹ (图 1).

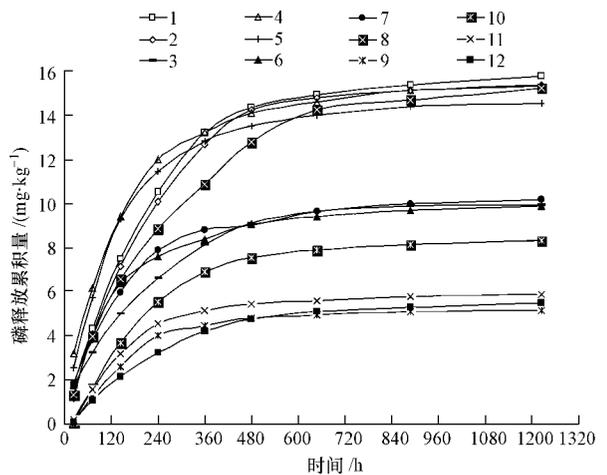


图 1 供试岩样中磷的累积释放

Fig. 1 The cumulative release of phosphorus from the rock samples

3.2 磷释放的动力学过程

分别用零级方程、一级方程、二级方程、Elovich 方程、权函数方程和抛物线方程 6 种动力学方程对磷释放数据进行拟合, 采用非线性化拟合所得的可决系数 (R²) 和标准估计误差 (SE) 作为评价拟合效果的好坏的指标, 拟合结果和参数取值如表 3 和表 4 所示. 从表 4 可以看出, 供试样品的释放性能与其中 4 种动力学模型吻合, 可决系数 (R²) 都达到了显著水平. 其中, 一级方程和 Elovich 方程对岩源磷的

释放拟合效果最佳,长期间歇实验的可决系数 R^2 分别为 0.99 和 0.97, 权函数方程和抛物线拟合次之, R^2 分别为 0.82 和 0.85, 说明这 4 个方程可用来描述供试岩样中磷的释放. 而零级方程和二级方程拟合后的可决系数 R^2 均小于 0.5, 不能很好地描述岩源磷的释放动力学规律.

标准估计误差 (SE) 可用来表示模型拟合的优

劣程度. 从理论方程计算出经过时间 t 磷的理论释放量 (P_c) 与试验所得的实际释放量 (P_m) 的差别来判断, 一级动力学直线方程的 P_c 和 P_m 十分接近, 标准估计误差 $SE = 0.49 \text{ mg kg}^{-1}$ ($\leq 0.5 \text{ mg kg}^{-1}$). 而根据 Elovich 方程、权函数方程和抛物线方程计算出的 P_c 均小于 P_m , 标准估计误差分别为 0.72、2.82、2.14 (mg kg^{-1}).

表 3 几种方程对岩源磷释放动力学拟合的可决系数 R^2 和标准估计误差 SE

Table 3 Determination coefficients (R^2) and standard errors of estimates (SE) for fitted kinetics equations of the rock P release

样品	一级方程		Elovich 方程		权函数方程		抛物线方程	
	R^2	SE / (mg kg^{-1})	R^2	SE / (mg kg^{-1})	R^2	SE / (mg kg^{-1})	R^2	SE / (mg kg^{-1})
1	0.99	0.587	0.98	1.006	0.93	2.820	0.87	2.025
2	0.99	0.343	0.97	1.018	0.91	3.354	0.86	2.069
3	0.99	0.624	0.97	0.576	0.95	1.245	0.86	1.117
4	0.99	0.667	0.97	1.518	0.92	1.965	0.83	10.170
5	0.99	0.754	0.96	0.909	0.89	5.733	0.82	2.556
6	0.99	0.646	0.97	0.480	0.90	1.355	0.83	1.231
7	0.98	0.588	0.97	0.538	0.92	1.395	0.84	1.265
8	0.99	0.321	0.98	0.761	0.94	2.358	0.93	1.452
9	0.99	0.289	0.95	0.437	0.79	2.285	0.80	0.877
10	0.99	0.426	0.97	0.608	0.78	4.700	0.85	1.251
11	0.98	0.539	0.95	0.471	0.81	2.102	0.84	0.979
12	0.99	0.100	0.97	0.346	0.90	4.480	0.90	0.679
平均值	0.99	0.490	0.97	0.722	0.82	2.816	0.85	2.139

表 4 拟合的岩源磷释放动力学参数

Table 4 Parameters of kinetic model fits for phosphorus released from rocks

样品	一级方程		Elovich 方程		权函数方程		抛物线方程	
	k_1	d	$1/\beta$	α	b	a	r	c
1	0.0043	2.6703	4.0284	0.2217854	0.5739	0.3643283	0.0309	0.0987
2	0.0049	2.7479	4.0793	0.1997340	0.6479	0.2243159	0.0320	0.0722
3	0.0055	2.3980	2.3866	0.1680231	0.4707	0.4420201	0.0293	0.1468
4	0.0046	2.4755	3.5551	0.4541459	0.4025	1.0913331	0.0529	0.2528
5	0.0049	2.4408	3.2844	0.3396480	0.4346	1.1674245	0.0264	0.1548
6	0.0042	1.9735	2.1607	0.2382452	0.4168	0.6432640	0.0258	0.2512
7	0.0042	2.0568	2.2930	0.2210354	0.4324	0.5936888	0.0267	0.2222
8	0.0039	2.7398	3.9033	0.1801372	0.6200	0.2489757	0.0318	0.0378
9	0.0053	1.6331	1.4283	0.0658353	0.9286	0.0135971	0.0326	0.0761
10	0.0044	2.1158	2.3626	0.0903889	0.9470	0.0054073	0.0341	0.0109
11	0.0046	1.6240	1.5758	0.0812308	0.7960	0.0355434	0.0314	0.1062
12	0.0041	1.7496	1.5292	0.0558132	0.9277	0.0132600	0.0343	0.0162

4 讨论 (Discussion)

一级方程动力学模型主要用于描述扩散机制控制的动力学过程 (涂从, 1994), 说明岩源磷的释放过程是由固相扩散到自然界水体, 这一过程涉及

的主要机制较单一, 能量变化不大. Elovich 方程、权函数方程和抛物线方程也都是经验公式, 实际应用表明, 它们均适用于反应过程较复杂的动力学过程 (涂从, 1994). 如 Elovich 方程, 它能够描述包含一系列反应机制的过程, 其中, 不仅包括溶质在主体

或界面处的扩散,还包括表面的活化与去活化作用等,它对于反应机制单一的过程不适合,却非常适用于反应过程中活化能变化较大的过程(如沉积物等表面上的过程)。从表3可以看出,供试样品的释放性能能很好地用一级方程、Elovich方程、权函数方程和抛物线方程4种动力学模型描述($R^2 \geq 0.80$),可决系数(R^2)都达到了显著水平,但根据磷的理论释放量(P_c)与实际释放量(P_m)可知,一级方程拟合标准估计误差 $SE = 0.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而Elovich方程、权函数方程和抛物线方程的标准估计误差(SE)均大于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此可知,一级方程对试验中磷释放数据的拟合效果最好($R^2 = 0.99$, $SE = 0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这表明岩源磷的释放动力学反应过程以扩散过程为主。研究表明,一级方程能有效地拟合某些土壤中磷的释放过程(Ekhatib *et al.*, 1988; Pavlatou *et al.*, 1988; Lookman *et al.*, 1995; Shariyatadari *et al.*, 2006),这也表明一级方程对磷的释放过程具有通用性,不管是在土壤中,还是在岩样或是沉积物体系中,磷素的释放都可能存在着同样的化学机制。

在一级方程动力学模型中,速率常数 k_1 反映磷释放作用进行的快慢程度。 P_0 为岩源磷中通过扩散机制可释放的磷总量, k_1 为岩源磷释放速率常数,反映了一定范围内动力学过程的平均速率。当 $k_1 > 0$ 时,表明动力学过程是一个释放过程; $k_1 < 0$ 时则表示该过程是一个吸收或吸附过程; $k_1 = 0$ 时则意味着该过程处于一种平衡状态。从表4可以看出,一级方程中的 k_1 均大于0,说明该过程属于释放反应过程。通过 k_1 值的比较还可以发现,在释放过程中,各个岩样磷的释放速率差异较小, k_1 均在0.0045左右,比较稳定,表明该系数可望成为能够较好地表征岩源磷有效性的指标。

一级方程对岩源磷释放数据的拟合效果最好,但Elovich方程、权函数方程和抛物线方程也能在一定程度上反映岩源磷的释放过程,特别是Elovich方程,它的拟合参数能够反映释放速率大小以及释放速率随释放率增加而下降的程度。磷释放的最初速率(DR_{in})和最终速率(DR_f)都能利用Elovich方程在 $t = 24 \text{ h}$ 和 $t = 1224 \text{ h}$ 分别计算得到。研究表明,Elovich方程能有效地拟合某些土壤中磷的释放过程(Chien *et al.*, 1980; Gee *et al.*, 1986; Toor *et al.*, 2000),说明Elovich方程对某些磷的释放过程也具有通用性。

此外,权函数方程中的参数 a 也被视为初始瞬时速率, a 值高,说明吸附或释放瞬间速率高;而参数 b 类同于一级方程的 k_1 ,在一定程度上也反映了一定浓度范围内动力学过程的平均速率, b 值高,则表明在该浓度范围内,岩源磷的释放速率较低。通过 b 值的比较可以发现,在岩源磷释放过程中,各个岩样的磷释放速率变化不大。事实上, b 值的意义远非如此。当 $b > 1$ 时,说明释放速率随时间的延长而增大,且 b 值越大,反应进行的越快;当 $0 < b < 1$ 时,释放速率随时间的延长而下降,且 b 值越小,反应进行的越慢;如果 b 趋近于1,则权函数方程接近于零级方程,此时吸附或释放的速率约为一常数(晏维金等, 2000)。表4中的 b 值基本上都在0~1之间,表明磷释放的速率随时间的延长而下降,这与试验结果相吻合。

本研究表明,岩源磷的释放动力学过程是一个以扩散为主的反应过程。富磷岩层是一个开放体系,对这些反应动力学模型拟合效果的研究可为下一步进行环境系统模拟与仿真,深入调查富磷岩层由于风化、运移而导致的磷流失及其对巢湖磷素污染的贡献提供理论依据,且对巢湖磷素污染控制及富营养化问题研究具有重要的指导意义。

5 结论 (Conclusions)

1) 随着反应时间的延长,12个巢湖岩样的磷释放量均不断增加,最初磷的释放速率较快,接近平衡时,释放速率减缓,释放速率随时间的延长而下降。

2) 选用的几种动力学模型中,一级方程、Elovich方程、权函数方程和抛物线方程均能够很好地拟合岩源磷的释放动力学过程,其中,一级方程的拟合效果最佳,表明岩源磷的释放动力学过程是一个以扩散为主的反应过程,速率常数 k_1 可望成为表征岩源磷有效性的理想指标。

责任作者简介:汪家权(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:环境系统仿真与污染控制、水资源利用与环境保护。E-mail: jiaquan.wang@163.com

参考文献 (References):

- Barrow N J. 1979. The description of desorption of phosphate from soil [J]. *Soil Sci* 30: 259—270
- 陈云峰,殷福才,陆根法. 2006. 水华爆发的突变模型——以巢湖为例 [J]. *生态学报*, 26(3): 878—883

- Chen Y F, Yin F C, Lu G F. 2006. The catastrophic model of water bloom: A case study on Lake Chaohu [J]. *Acta Ecologica Sinica* 26 (3): 878—883 (in Chinese)
- Chien SH, Clayton W R. 1980. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils [J]. *Soil Sci Soc Am J* 44: 265—268
- Correll D L. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review [J]. *Environ Qual* 27: 261—266
- Elkhatib E A, Hem J L. 1988. Kinetics of phosphorus desorption from Appalachian soils [J]. *Soil Sci* 145: 222—229
- Gee G W, Bauder J W. 1986. Particle Size Analysis//Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis* [M]. Madison: ASA, SSSA. 383—411
- Griffin R A, Jurinak J J. 1974. Kinetics of phosphate interaction with calcite [J]. *Soil Sci Soc Am Proc* 38: 75—79
- 胡宏详. 2008. 巢湖北岸中东部水土迁移过程及规律研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学. 18—22
- Hu H X. 2008. A study on transportation process and regularity of soil and water in middle-eastern section of the north shore of Lake Chaohu [D]. Hefei Hefei University of Technology. 18—22 (in Chinese)
- 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 2003. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系 [J]. *中国环境学*, 23(6): 583—586
- Huang Q H, Wang D H, Wang C X, *et al* 2003. Relation between phosphorus forms in the sediments and lake eutrophication [J]. *China Environmental Science* 23(6): 583—586 (in Chinese)
- 韩德刚. 1987. 化学动力学基础 [M]. 北京: 北京大学出版社. 1—8
- Han D G. 1987. *Chemical Kinetics Foundation* [M]. Beijing: Peking University Press 1—8 (in Chinese)
- 金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 21—33
- Jin X C, Tu Q Y. 1990. *Investigation Standard of Lake Eutrophication* [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 21—33 (in Chinese)
- Lookan R, Freese D, Merckx R, *et al* 1995. Long-term kinetics of phosphate release from soil [J]. *Environ Sci Technol* 29: 1569—1575
- Pavlatou A, Polyzopoulos N A. 1988. The role of diffusion in the kinetics of phosphate desorption: the relevance of the Elovich equation [J]. *J Soil Sci* 36: 425—436
- 彭近新, 陈慧君. 1988. 水质富营养化与防治 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 45—62
- Peng J X, Chen H J. 1988. *Water Eutrophication and Control* [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 45—62 (in Chinese)
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社. 166—185
- Lu R K. 2000. *Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 166—185 (in Chinese)
- Shariyatadiri H, Shirvani M, Jafari A. 2006. Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid toposequences [J]. *Geoderma* 132: 261—272
- Shapley A N, Chapra S C, Wedeohl R, *et al* 1994. Managing agriculture phosphorus for protection of surface waters: issues and options [J]. *Environ Qual* 23: 437—451
- Siddique M T, Robinson J S. 2004. Differences in phosphorus retention and release in soils amended with animal manures and sewage sludge [J]. *Soil Sci Soc Am J* 68: 1421—1428
- Smith V H. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis [J]. *Limnol Oceanogr* 27: 101—111
- Smith V H, Tilman G D, Nekola J C, *et al* 1999. Phication impacts of excess nutrient inputs on freshwater: Marine and terrestrial ecosystems [J]. *Environmental Pollution* 100: 169—179
- Toor G S, Bahl G S. 1999. Kinetics of phosphate desorption from different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean [J]. *Biores Tech* 69: 117—121
- 涂从. 1994. 土壤体系中的化学动力学方程及其应用 [J]. *土壤与环境*, 3(3): 175—182
- Tu C. 1994. Equations of chemical kinetics and their application to soil system [J]. *Soil and Environmental Sciences* 3(3): 175—182 (in Chinese)
- 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清, 等. 1990. 巢湖富营养化研究 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1—6
- Tu Q Y, Gu D X, Yin C Q, *et al* 1990. *Chaohu Lake Eutrophication Research* [M]. Hefei University of Science and Technology of China Press. 1—6 (in Chinese)
- 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 2002. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究 [J]. *环境科学学报*, 22(6): 738—742
- Wang J Q, Sun Y M, Qian J Z, *et al* 2002. Simulated study on phosphorus release of Chao Lake sediment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 22(6): 738—742 (in Chinese)
- 王绪伟, 王心源, 封毅, 等. 2007. 巢湖沉积物总磷含量及无机磷形态的研究 [J]. *水土保持学报*, 21(4): 57—59
- Wang X W, Wang X Y, Feng Y, *et al* 2007. Study on content of total phosphorus and forms of inorganic phosphorus in sediments of Chaohu Lake [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 21(4): 57—59 (in Chinese)
- Wu M, Zhang W, Wang X J. 2009. Application of MODIS satellite data in monitoring water quality parameters of Chaohu Lake in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* 148(1-4): 255—264
- Xu F L, Tao S, Xu Z R. 1999. The restoration of riparian wetlands and Macrophytes in Lake Chao: an eutrophic Chinese lake: possibilities and effects [J]. *Hydrobiologica* 405: 169—178
- 晏维金, 亢宇, 章申, 等. 2000. 磷在土壤中的解吸动力学 [J]. *中国环境科学*, 20(2): 97—101
- Yan W J, Kang Y, Zhang S, *et al* 2000. The desorption kinetics of phosphorus from calcareous soil in China [J]. *China Environmental Science*, 20(2): 97—101 (in Chinese)
- 周慧平, 高超. 2008. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别 [J]. *环境科学*, 29(10): 2696—2702
- Zhou H P, Gao C. 2008. Identifying critical source areas for non-point phosphorus loss in Chaohu Watershed [J]. *Environmental Science* 29(10): 2696—2702 (in Chinese)