巴丹吉林沙漠沙样中磷形态的分析研究

李北罡,张丽明,郭博书

(内蒙古师范大学化学与环境科学学院,内蒙古 呼和浩特 010022)

摘 要:采用7步连续浸提法对巴丹吉林沙漠西北部黑风口沙样中磷的各种形态进行了分析测定,并对沙样进行了分级形态研究。结果表明,在各种不同粒度的黑风口沙样中总磷(TP)含量范围为184.95~338.66 µg·g⁻¹,平均含量254.34 µg·g⁻¹,其主要组成为无机磷(IP),平均含量为246.60 µg·g⁻¹,平均占TP的96.96%;而有机磷(Or-P)含量范围为2.85~18.72 µg·g⁻¹,平均占TP的3.04%。在所有不同粒度的沙样中,自生钙结合磷(Ca-P)含量最高,平均含量为174.52 µg·g⁻¹,占TP含量的68.62%,其次是原生碎屑磷(De-P),占TP含量的23.25%,二者占TP含量的绝大部分;其他各形态磷含量的高低顺序依次为:有机磷(Or-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合磷(Al-P)、交换态磷(Ex-P)、闭蓄态磷(Obs-P)。在所取沙漠颗粒物样中TP、Ca-P、De-P、Fe-P、Obs-P各自含量都随沙样粒度的减小而增大,而Or-P的含量变化则相反;Ex-P、Al-P含量受颗粒物粒度变化的影响趋势不明显。

关键词:巴丹吉林沙漠;磷;形态;粒度

中图分类号:0613.62,0655.6 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2008)02-0643-05

Phosphorus Forms in Sand Samples from Badanjilin Desert

LI Bei-gang, ZHANG Li-ming, GUO Bo-shu

(College of Chemistry & Environment Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China)

Abstract: Phosphorus is a key element of all life and the limiting nutrient in many ecosystems of the world. Phosphorus in the ocean is transported from river and with the sand dust. Phosphorus circulation in northern waters of our country follows the way of the western region desert in Inner Mongolia–sandstorm–Yellow River–Yellow River mouth–Yellow Sea and constitutes a part of the world phosphorus circulation. The desert along the upper stream banks of Yellow River may be the source of phosphorus in the Yellow River, and solid particles of the Yellow River become a carrier of phosphorus's transport. To understand the cycling of phosphorus in the northern waters of China and its effect on paleo–productivity, it is important to study the phosphorus forms in sand of the desert that will be helpful to understand the environmental effect of phosphorus geochemical characteristics and the mechanism of phosphorus circule. Badanjilin Desert, located in the upper stream banks of Yellow River in the western region of Inner Mongolia, is one of the largest deserts in the world. Various phosphorus species in sand grains with different sizes from Badanjilin Desert ranged from 184.95 to 338.66 μ g·g⁻¹, with the average value 254.34 μ g·g⁻¹. Ca–P was found to be the major phosphorus form of the total phosphorus in sand grains with different particle sizes and Obs–P second, Or–P third (with the average value 12.72 μ g·g⁻¹). The other species, in turn, were Fe–P > Al–P > Ex–P > Obs–P. In the sand samples with different particle sizes, the contents of Ca–P, De–P, Fe–P, Obs–P and TP increased with sample particle size decreasing, but Or–P was contrary. No remarkable dependency relationship between content and sand particle size for Al–P and Ex–P species were found.

Keywords: Badanjilin Desert; phosphorus; chemical speciation; particle size

磷是生命活动所必须的元素,其不足或过量会直 接影响水生生态系统的初级生产力,如发生赤潮、水

作者简介:李北罡(1964—),女,副教授,硕士研究生,主要从事分析化 学与环境水化学方面的研究工作。E-mail:libg@imnu.edu.cn 体富营养化等,因此自20世纪70年代以来,已经引起了全世界的广泛关注,并成为了水质环境污染的监测指标之一,同时磷的地球化学形态分析研究也成为 天然水体调查及治理过程中必须进行的调查项目。因此,对有关湖泊、河流及海洋沉积物中磷的含量水平、 分布状况、存在形式及其地球化学行为的研究就有着 非常重要的意义^[1-3]。天然水体中的磷一般来源于沙尘

收稿日期:2007-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(20467002);内蒙古自治区自然科 学基金项目(200711020214)

和土壤,这些天然固体颗粒物在水体中吸附和解析磷 并发生迁移,对河流和海洋生物生存状态及全球环境 都有很重要的影响。中国北部海域磷可通过内蒙古西 部沙漠-沙尘暴-黄河-黄河三角洲-黄海-太平洋迁 移,但有关沙漠沙尘中磷形态的分析研究及沙尘进入 水体后的作用机理、对整个水陆系统磷循环的影响报 道较少。

巴丹吉林沙漠位于黄河上游,形成沙尘暴进入水体,这些颗粒物有可能是磷的源[4.5],也有可能沉降大量的磷,即汇[6.7]。颗粒物究竟对磷是源或汇至今是国际上研究的热点问题。本文采用连续提取法对采集于内蒙古西部黄河上游的巴丹吉林沙漠颗粒物样中磷的化学赋存形态进行了分析测定及分级形态研究。由于水体中磷的"活性"取决于它存在的化学形态,因此查明巴丹吉林沙漠颗粒物中磷的赋存形态及它在颗粒物中的分布规律,对了解和掌握磷由沙尘迁移至黄河水体中的地球化学行为非常重要,同时也为防止黄河流域磷污染、科学管理提供理论依据和参考。

1 研究区自然地理概况

巴丹吉林沙漠位于内蒙古高原的西南边缘,阿拉 善盟阿拉善右旗西部和额济纳旗东部的巨型盆地之 中,东西跨度约 270 km,南北宽约 220 km,面积约 4.43万 km²,是我国第三大沙漠,世界第四大沙漠,同 时也是世界惟一高大沙山分布密集的沙漠,一般海拔 高度在 1 200~1 500 m 之间,沙山最高可达 500 多 m,因此还是世界最高大沙丘所在地,并以流动沙丘 为主,约占沙漠总面积的83%。由于巴丹吉林沙漠属 于温带干旱和极干旱气候区,干燥度 7~12,是阿拉善 地区最干旱的沙漠,年均气温 7~8℃,年均降水量 50~ 60 mm,沙面最高温度可达 70~80 ℃。由于降水稀少、 光照强烈,故沙丘上植被稀少、灌木稀疏。在巴丹吉林 沙漠西北部居延海一带形成了一条 6、7 km 宽的风沙 通道, 其地表物质有 70% 是小于 0.063 mm 的粉尘, 遇到五级风即可产生沙尘暴,尤其是近年来随着沙漠 化面积的不断扩大,沙尘暴频发,故当地群众称这里 为"黑风口"。由于受周边气候的影响,每年春天90% 的风向为西风或西北风,西北风挟着沙扬扑向东南, 其沙尘影响范围涉及西北、华北乃至华东地区,达 200 km²⁸。故相关专家认同黑风口沙漠是中路沙尘暴 来源,且位于黄河上游,成为向黄河上游输沙量最大 的沙漠之一,每年借风力约有上亿吨沙刮入河中,这 些颗粒物进入水中既可能成为黄河的磷源,也会成为 磷输送的载体,作为河流和海洋的生源物质扮演着极为重要的角色。

2 样品采集和分析方法

2.1 样品采集与前处理

沙漠沙样采样时间为 2006 年 10 月,采样点位于 内蒙古巴丹吉林沙漠西北部黑风口岸,利用全球卫星 定位系统(GPS)定位:海拔高度 914.8 m、北纬 42°01.834′、东经 101°18.007′。沙样取自于较大的流 动沙丘地表面 3 cm 以下的位置,沙丘表面没有任何 植被覆盖,周围全是黄黄的沙丘链,附近很少有人类 活动出现,所以采样点基本上无人为干扰情况。此地 附近共设了 7 个采样点,所取样品具有一定的代表 性。将沙漠颗粒物样品分别过 0.149 mm (100 目)、 0.090 mm(160 目)、0.074 mm(200 目)、0.061 mm(250 目)筛,获得不同粒度的样品均储存于冰箱中备用。

2.2 沙漠颗粒物样中磷的连续提取与分析

到目前为止,有关磷形态的化学连续提取法有多 种,本文通过查阅大量文献,借鉴了李阅等提出的七 步连续提取法并加以改进分析了巴丹吉林沙漠北部 颗粒物样中磷的化学赋存形态^[9],同时认为:第一,该 方法更适合碳酸盐沙质沉积物的分析^[10],因巴丹吉林 沙漠土壤以灰棕漠土和风沙土为主^[11];第二,该提取 法将提取的各种形态磷的区分更为明确,提取结果也 具有更为清晰的环境地球化学意义,但该法应用研究 少见报道。与该法相比,本实验方法的改进之处有以 下两点:一是每一级提取后减少一次漂洗;二是每一 步离心液都通过 0.45 μm 滤膜抽滤,以防止离心不完 全等引入固体颗粒和胶体等。

采用的各形态磷的七步连续提取法的具体步骤 见表 1。为保证各步的提取效率,每一步用饱和 NaCl 溶液和去离子水各洗涤一次;每次提取后以 4 000 r· min⁻¹离心分离 20 min,离心液用钼-锑-抗比色法测 定其中磷含量^[12],残渣进入下一步提取。每个样品平 行测定 4 次,数据用其测定的平均结果表示。

3 结果与讨论

3.1 沙漠颗粒物样中磷的形态分析及相互关系

分别选择了不同粒度的巴丹吉林沙漠黑风口颗 粒物样采用七步连续提取法进行了磷的形态分析及 总磷(TP)的测定,分析结果见表 2 和图 1。

从表2的分析结果可知,所有不同粒度的巴丹吉 林沙漠黑风口沙样中总磷(TP)含量在184.95~

表1 沙漠颗粒物样中磷的连续提取及总磷测定

Table 1 Sequential extraction method of phosphorus and the determination of TP in sand particle samples

磷形态	代 码	步骤	提 取 方 法
吸附态磷	Ex-P	1	样品 0.5 g + 1.0 mol • L ⁻¹ MgCl ₂ (pH=8) 50 mL,振荡 2 h,离心。提取液测定磷含量。
铝结合态磷	Al-P	2	第1步残渣 +50 mL 0.5 mol • L ⁻¹ NH ₄ F (pH=8.0),振荡1h,离心,取上清液25 mL 于塑料瓶中 +25 mL 饱和 H ₃ BO ₃ ,过夜,测定磷含量。
铁结合态磷	Fe-P	3	第2步残渣 + 0.1 mol·L ⁻¹ NaOH 和 0.5 mol·L ⁻¹ Na ₂ CO ₃ 混合提取液 50 mL,振荡 4 h,离心,提取液测定 Fe-P。
闭蓄态磷	Obs-P	4	第3步残渣 +20 mL 0.3 mol • L ⁻¹ 柠檬酸钠-2.5 mL 1.0 mol • L ⁻¹ NaHCO ₃ + 0.5 g Na ₂ S ₂ O ₄ 混合提取剂(pH=7.6),搅拌 15 min, +3 mL 0.5 mol • L ⁻¹ NaOH,振荡 8 h,离心,浸提液测定闭蓄态磷。
自生钙结合磷	Ca-P	5	第4步残渣 + 25 mL 1.0 mol • L ⁻¹ HAc-NaAc(pH=4)缓冲液,振荡 8 h,离心,提取液测磷。
碎屑磷	De-P	6	第5步残渣 + 25 mL 1.0 mol·L ⁻¹ HCl,振荡 16 h,离心,提取液测 De-P。
有机磷	Or-P	7	第 6 步残渣 → 磁坩埚 → 烘干 → 灼烧 2 h(550 °C), 冷却 + 25 mL 1.0 mol・L ⁻¹ HCl, 振荡 16 h, 离心, 浸提 液测 Or-P。
总 磷	TP	8	准称各粒度沙样 0.3 g 于 150 mL 锥型瓶中,加少量水润湿,加 3 mL 浓硫酸, 15 滴 HClO4,摇匀,再在瓶口上放一弯颈小漏斗,置于电热板上加热,瓶中溶液开始转白或灰白时继续消煮 15~20 min。在样品消煮的同时,做一空白实验,同样消煮得空白消煮液。用蒸馏水稀释冷却后的消煮液转入 50 mL 容量瓶中,定容摇匀。取一定体积上层清液于 25 mL 比色管中,钼一锑一抗分光光度法测定。

表 2 沙漠样品中各形态磷的分析结果(µg・g-1)

Table 2 Determination results of the various forms P and TP in the sand of the Heifengkou from Badanjilin Desert(µg • g⁻¹)

沙样粒径/mm	Ex-P	Al-P	Fe-P	Obs-P	Ca-P	De-P	Or-P	ΣIP	ΣTP
0.149~0.090	1.10	1.79	3.22	0.13	136.62	23.37	18.72	166.23	184.95
$0.090 \sim 0.074$	0.92	1.59	3.71	0.34	151.42	58.43	12.85	216.41	229.26
$0.074 \sim 0.061$	0.93	1.50	3.67	0.38	176.12	69.73	12.20	252.23	264.53
< 0.061	1.70	1.74	8.31	0.90	233.90	84.98	7.13	331.53	338.66

338.66 μg·g⁻¹之间,平均含量为 254.34 μg·g⁻¹;无机 磷(IP,除 Or-P 以外的其他各种形态 P 的总和)的含 量范围为 166.23 ~ 331.53 μg·g⁻¹,平均含量为 246.60 μg·g⁻¹,是沙样中磷的主要成分;有机磷含量相对较 低,在 7.13 ~ 18.72 μg·g⁻¹之间,平均含量为 12.72 μg·g⁻¹;Ca-P 平均含量为 174.52 μg·g⁻¹,占无机磷含 量的绝大部分;其次是 De-P,平均含量为 59.13 μg· g⁻¹,说明无机磷中以 Ca-P、De-P 为主。各种形态磷含 量的高低顺序依次为:Ca-P、De-P、Or-P、Al-P、Ex-P、Fe-P、Obs-P。

为了验证上述分步提取法的可靠性,分别对粒度 为 0.149 mm(100 目) ~ 0.090 mm(160 目) 0.090 mm (160 目) ~ 0.074 mm(200 目)、0.074 mm(200 目) ~ 0.061 mm(250 目)、小于 0.061 mm(250 目)的沙样采 用 HClO₄-H₂SO₄ 消化法(见表 1 中步骤 8)测定 TP,与 分步提取法所得 Σ TP 相比较,结果见表 3。由表 3 中 的数据可知:(1)分步提取法所得 Σ TP 与 TP 的相对 误差在 -8.9% ~ -17.3% 之间,说明该法比较可靠; (2)总磷测定法所得 TP 值都比分步提取法所得 Σ TP 值高,这可能是因为分步提取各形态磷都有所损失或 提取率达不到 100%所至。

表 3 分步浸提法和总磷测定法的分析结果比较

Table 3 Comparison of sequential extraction method

and TP determination method

沙样粒径 / mm	ΣTP / μ g • g $^{-1}$	TP / μ g • g ⁻¹	RE / %
$0.149 \sim 0.090$	184.95	203.26	-9.0
$0.090\sim 0.074$	229.26	263.43	-13.0
$0.074\sim 0.061$	264.53	290.52	-8.9
< 0.061	338.66	403.59	-17.3

3.2 同一形态磷在不同粒度颗粒物中的含量变化

本法将自生磷和碎屑磷进行了分离,由图1可清 楚看到,在所有不同粒度的沙样中,自生钙结合磷 (Ca-P)和原生碎屑磷(De-P)的含量都相当高,平均 各占TP的68.62%和23.25%,二者统称为钙结合的 磷,这说明将二者分别进行提取是有实际意义的,由 此可判断Ca结合态P的性质和来源,判断其不同的 成因和相应的地球化学行为,从而使环境地球化学 研究的意义更明确。Ca结合态P在TP中占绝对优 势,这与巴丹吉林沙漠土壤结构中碳酸钙含量高相 一致^[11]。

这里用酸提取的有机磷(Or-P)主要以磷酸酯、 磷酯、核酸、磷蛋白和磷酸糖类为主^[13]。在所有不同粒 度的沙样中,Or-P含量相对较低,平均占TP含量的 5.00%。产生这一结果的原因可能为,一是因为巴丹 吉林沙漠植被稀少,覆盖度低,植物的地上生物量累 积极少,地下生物性累积也十分微弱,同时在强烈干 燥的气候因素下,土壤中有限的有机物质迅速被矿化 分解,所以土壤中腐殖质累积少,生物作用极其微 弱^[11];二是酸提取的有机磷多为易分解的生物大分 子,稳定性差,易于发生形态转化,故酸提取 Or-P 在 沙样中含量低。



铁结合态磷(Fe-P)来自与铁的氧化物或氢氧化物发生共沉淀的磷酸盐,其平均含量为4.73 μg·g⁻¹, 占 TP 的 1.86%。Fe-P 虽然含量低,但当沙样进入水体后它是最易解析的部分。Fe 氧化物表面对痕量金属、P、Si 等有强的亲和力,Fe 氧化物与磷的吸附对海洋沉积物中 P 的循环有重要的影响,间隙水中 PO4³⁻ 主要来自有机质降解和铁氧化物释放,从而直接影响 沉积物-水界面交换。Fe-P 含量低可能是由于钙磷含量高所至,这由沉积环境所决定。

以上钙磷和铁磷的测定结果与文献[3]和[14]中 黄河沉积物的分析结果相一致,这可能与沙尘刮入黄 河对黄河沉积物各形态磷的贡献有关。

铝结合态磷(Al-P)的平均含量为 1.66 μg·g⁻¹,占 总磷的 0.65%。Al-P 在沙样中的含量及其分布受许 多因素影响,例如:沙样的粒度、矿物成分、沙漠化时 间以及成因等。

可交换磷(Ex-P)也称吸附态磷 Ads-P,即生物有效磷,主要来自于碳酸钙、活性铁矿物及黏土矿物等固体矿物颗粒物表面吸附的磷酸盐 (CaHPO₄ 是其重要组分)。Ex-P 在各粒度沙样中的平均含量为1.16 µg·g⁻¹,占总磷的 0.46%,其含量很低,这可能因为巴丹吉林沙漠土壤为灰棕漠土,极干旱造成物理风化强烈,化学风化微弱,母质粗骨性强,矿质含量主要以SiO₂为主,壤质、粘质土极少,故吸附态磷就很低,但若沙样进入水体释放磷酸时,这部分磷首先被释放,水体溶解磷浓度易受 Ex-P 的制约, Ex-P 能很好地表征水体中磷盐含量。

闭蓄态磷(Obs-P)主要指水合铁氧化物膜覆盖 结合态磷和自然岩石状态磷,平均含量为0.44 μg·g⁻¹, 占TP含量的0.17%。Obs-P的形成与沙漠物理风化 和化学风化呈显著相关,并且在非强烈还原条件下很 难被农作物吸收利用。

由表 2 和图 1 可知,不同形态磷在不同粒度沙样中的含量分布各不相同。沙样颗粒物越细,Ca-P、De-P、Fe-P、Obs-P的含量越大,而 Or-P 含量则随沙样粒度的减小而减小; Al-P、Ex-P 含量随粒度的变化增大或减小的趋势不很显著,可能因其含量非常少,导致各粒度中含量变化不大。

3.3 同一粒度沙样中不同形态磷含量的分布

从表 2 及图 1 中可看出,在同一粒度的沙样中, 各形态磷的含量分布各不相同。在所有粒度的沙样中,Ca-P 都是无机磷的主要部分,含量最高;其次是 De-P;第三是 Or-P。在 100~160 目、160~200 目、200~ 250 目、> 250 目不同粒径沙样中,各形态磷含量由高 到低顺序排列都服从:Ca-P > De-P > Or-P > Fe-P > Al-P > Ex-P > Obs-P。

3.4 各形态磷之间相关系数分析

通过计算各形态磷之间的相关系数 (结果见表

Table 4 Correlation coefficient matrix between different phosphorus forms									
	Ex-P	Al-P	Fe-P	Obs-P	Ca-P	De-P	Or-P		
Ex-P	1.000 0								
Al-P	0.601 5	1.000 0							
Fe-P	0.713 4	0.225 4	1.000 0						
Obs-P	0.729 5	0.211 2	0.956 2**	1.000 0					
Ca-P	0.204 7	0.701 2	0.969 2**	0.927 5**	1.000 0				
De-P	0.674 1	0.113 1	0.932 1**	0.902 0*	0.956 8**	1.000 0			
Or-P	-0.200 5	0.385 2	-0.878 7	-0.902 8	-0.933 2	-0.958 3	1.000 0		

表 4 各形态磷之间相关系数矩阵

注:* 表示显著性水平 α=0.05;** 表示显著性水平 α=0.01。

4),可清楚看出:Fe-P、Ca-P、De-P和Obs-P之间有 非常显著的正相关关系;而Or-P则与Fe-P、Ca-P、 De-P和Obs-P之间有非常显著的负相关关系;Ex-P 与其他形态磷有一定的正相关性(除Or-P外);Al-P 与其他形态磷相关性不显著。

3.5 不同粒度沙样中总磷含量的比较

不同粒度沙样中无机磷和总磷含量随沙样粒径 变化的关系见图 2。从图中可以看出,无机磷和总磷 含量随着颗粒物粒度的减小而增大。



4 结论

(1)巴丹吉林沙漠黑风口沙样中不同粒度颗粒物 总磷平均含量为 254.34 μg·g⁻¹,其中 Ca-P、De-P 含 量分别占 TP 的 68.62% 和 23.25%,是 TP 的主要组 成部分;所有各形态磷含量的高低顺序依次为:Ca-P > De-P > Or-P > Fe-P > Al-P > Ex-P > Obs-P。

(2)Ca-P、De-P、Fe-P、Obs-P含量都随沙样粒 度的减小而增大; Or-P含量则随沙样粒度的减小而 降低; Al-P、Ex-P含量随粒度的变化趋势不太明显; TP含量随颗粒物粒度的减小而增大。

本文采用改进后的七步连续浸提法,将多种形态 磷分步提取,尤其将自生钙结合磷和原生碎屑磷分开 提取,通过其含量的变化分析可获得沉积环境的有关 信息,了解物质成岩过程及磷的循环机制,结合河流、 海洋沉积物、悬浮物中磷的形态分析,即可了解从沙 尘、河流至海洋不同阶段磷的迁移、形态转化分布规 律,进一步探讨磷在海洋中的来源、途径及移除机制。

参考文献:

- [1] 王雨春,马 梅, 万国江.贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历 史[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1):21-27.
- [2] 陈红军,黄怀曾,冯 流,等.永定河沉积物中磷的存在形态及起指 示意义[J].岩矿测试,2005,24(3):176-180.
- [3] 李北罡, 么瑞银, 郭博书. 黄河中游表层沉积物中无机磷的化学形态 研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1607-1610.
- [4] Fox L E, Sager S L, Wafsy S C. The Chemical control of soluble phosphorus in the amazon estuary[J]. *Ceochim Cosmochim Acta*, 1986, 50(5): 783–794.
- [5] Froelich P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries- a primer on the phosphate buffer mechanism [J].*Limnol O-ceanogr*, 1988, 33(4): 649–668.
- [6] Lebo M E, Sharp J H. Modeling phosphorus cycling in a well-mixed coastal-plain estuary[J].*Est Coastal shelf Sci*, 1992, 35(3): 235–252.
- [7] Rendell A R, Horrobin T M, Jickells T D, et al. Nutrient cycling in the great ouse estuary and its impact on nutrient fluxes to the wash, England [J].*Est Coastal shelf Sci*, 1997,45(5): 653–668.
- [6] Lajtha K, Schlesinger WH. The biochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence[J].*Ecology*, 1988,69:24–39.
- [8] 国家林业局宣传办公室.防沙治沙基本知识问答[M].北京:中国林业 出版社.2001.41-45.
- [9]李 阅,乌大年,薛永先.沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其 环境地球化学意义[J].海洋环境科学,1998,17(1):15-20.
- [10] 刘素美,张 经.沉积物中磷的化学提取分析方法[J].海洋科学, 2001, 25(1): 21-25.
- [11] 马世威,马玉明,姚洪林,等.沙漠学[M].呼和浩特:内蒙古人民出版 社, 1998.239-240, 333-334.
- [12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法 [M](第4版).北京:中国环境科学出版社,1990.246-248.
- [13] Ingall E D, Schroeder P A, Berner R A. The nature of organic phosphorus in marine sediments: new insights from ³¹P-NMR[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1990, 54: 2617–2620.
- [14] 林荣根,吴景阳.黄河口沉积物中无机磷酸盐的存在形态[J]. 海洋 与湖沼, 1992, 23(4): 387-395.