

三峡库区消落区土壤磷释放的环境影响因子

马利民^{1,2}, 唐燕萍¹, 滕衍行¹, 赵建夫^{1,2}

1. 同济大学 环境科学与工程学院 污染控制与资源化国家重点实验室, 上海 200092
2. 重庆三峡研究院, 重庆 404020

Ma Limin^{1,2}, Tang Yanping¹, Teng Yanhang¹, Zhao Jianfu^{1,2}

1. State Key Laboratory of Pollution Control & Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. Chongqing Institute of Three Gorges, Chongqing 404020, China

Ma Limin, Tang Yanping, Teng Yanhang, et al. The effective factor of phosphorous release from soil in Water-Fluctuation-Zone of the Three Gorges Reservoir. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 235-241

Abstract: According to the Water-Fluctuation-Zone (WFZ)'s alternately waterlogged and drained environment, we have carried out the experiment for controlling phosphorous release at both laboratory and in-situ flooding conditions at Wanzhou with purple alluvial soil of the WFZ at the Three Gorges Reservoir. This study focused on the environmental effective factor of phosphorous release from soil in the WFZ in periodic inundating-draining environment. Results showed that there was evident change between each phosphorous fraction in concentration during first 5-10 days, and then the trend became stable. TP of soil decreased, and there was phosphorous release from soil. After several inundating-draining processes, the Olsen-P of soil decreased after each inundating process and increased after each draining process. There was 16.7% lower of Olsen-P at last draining process than that at the beginning. Olsen-P of the soil increased from 20.53 mg · kg⁻¹ to 43.23 mg · kg⁻¹, with a 110.6% increase, when the inundating depth increased to 40 m. Phosphorous concentration of overlying water exerted an influence on phosphorous release. Time required to reach adsorption equilibrium was much shorter when phosphorous concentration in overlying water was low (<2 mg/L) than that when phosphorous concentration in overlying water was high (>2 mg/L). It took six weeks to get balance when phosphorous concentration in overlying water was low (<2 mg/L). After adding HgCl₂, Phosphorous concentration in overlying water was not changed in first 10 days, and then there was an evident decrease compared to that not adding HgCl₂, with 0.048 mg/L lower. In addition, the content of Olsen-P of soil with plants was higher than that of soil without plant-for soils with *Cynodon dactylon* and *Ficus tikoua* by 21.5% and 12.7%.

Key words: Three Gorges Reservoir; Water-Fluctuation-Zone; phosphorous release; effective factor

摘要:以三峡库区消落区万州段为试验基地,选取释磷能力较强的紫色冲积土,根据三峡水库消落带的“干湿交替”空间和时间特征,进行万州断面土壤磷释放的影响因子的实验室模拟试验和万州江面淹没的对照试验。研究发现,随着淹水时间的变化,各种形态的磷在前5~10 d各形态磷变化有相当的差异,随后变化趋势趋于稳定。TP有降低的趋势,土壤磷有一定的释放。野外研究表明 Olsen-P 在淹水 10 周左右到达最大值,

收稿日期:2008-05-30;修回日期:2008-06-25

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAJ08B01);科学技术部中俄科技合作计划项目(2007DFR90050);上海市科委项目(07da12007)

作者简介:马利民(1968—),男,博士,副教授,从事生物地球化学、污染环境生物修复领域的研究。E-mail:lmma@mail.tongji.edu.cn

以后缓慢降低。淹水时土壤 Olsen-P 增加,干燥后降低。多次淹水时每次淹水后土壤的有效磷水平都略有增加,干燥后相较于上次干燥后有效磷水平降低,最后一次淹水后相较于初始时 Olsen-P 水平低 16.7%。随着淹水深度增加,土壤的 Olsen-P 水平在淹水时由淹水前 20.53 mg/kg 提高到 43.23 mg/kg,增加 110.6%。当上覆水磷浓度较低时(<2 mg/L),磷吸附到达平衡的时间较短,约需要 6 周。当上覆水磷浓度较高(>2 mg/L)时,磷吸附到达平衡的时间较长。微生物活动对淹水土壤的磷释放有一定影响,有微生物时磷的释放高于无微生物者 0.048 mg/L。种植植物的土壤在淹水后 Olsen-P 含量大于土壤直接淹没时的释放量,种植狗牙根 (*Cynodon dactylon*)和野地瓜藤 (*Ficus tikoua*)的土壤中 Olsen-P 分别较未种植物土壤释放量高出 21.5%和 12.7%。

关键词:三峡库区;消落区;磷释放;影响因子

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2008)05-0235-07

三峡水库属特大型年调节水库,建成后将在水库周围形成垂直距离为 30 m、面积 440 km² 的消落区^[1-2]。消落区为水生生态系统和陆地生态系统的衔接过渡地带,存在着一个复杂的季节性水淹环境中的土壤-植物系统。系统中存在着季节性干湿交替,其中伴随着土壤的物理化学性质、氧化-还原状态、厌氧-好氧状态、植物生长状态、微生物生态环境^[3-5]等一系列复杂情况变化。特别是消落区曾受到强烈人类干扰的土壤,磷释放所造成的水体富营养化的威胁将是不可避免的^[6],成为国内外专家和学者关心的热点问题之一。

影响土壤磷释放的环境因素主要有水中溶解氧、pH 值、氧化还原电位(Eh)、温度、土壤类型、上覆水体状况、生物活动及水动力条件等方面。研究表明不同土壤对磷的固定机制不同^[7-8],会影响磷的释放。沉积物中磷的结合态及形态之间的相互转化是控制沉积物-水界面间磷循环的重要因子^[9]。水土界面的氧化还原电位(Eh),溶解氧等和土壤中磷的释放关系也十分密切^[10]。pH 值对沉积物磷的释放的有很大影响,沉积物中在 pH 值高时,使磷酸盐中的磷释放出来;而在 pH 值低时,沉积物中的 Ca-P 朝着解吸方向进行,从而促使磷的释放^[11-13]。温度^[10]、生物活动^[14]、水动力^[15]等对磷的释放影响最大可增加数倍。土壤中的金属化合物^[16]、上覆水中磷的浓度^[17]也与磷的释放关系密切。

由于三峡库区消落区环境独特,了解消落区土壤中磷释放的影响因子及规律,对水体营养状况的研究和控制是非常重要的。本文以三峡库区消落区典型江段——万州断面为试验基地,选取释磷能力较强的紫色冲积土,根据三峡水库消落区的水位空间和时间特征,围绕“干湿交替”的特征进行土壤磷释放的实验室模拟试验和万州江面淹没的对照试验,研究周期性“淹水—落干”干湿交替环境对土壤

磷释放的影响因子,讨论了消落区土壤磷释放的规律。对进一步了解三峡库区土壤环境质量演变过程、消落区生态环境的恢复、分析库区富营养化趋势及研究控制措施提供基础资料和理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点

研究按照三峡水库水位调度运行特征(图 1),来模拟水位变化的情况。实验地点为重庆三峡研究院万州消落带研究基地。研究基地位于三峡腹地的重庆市万州区五桥新田乡(N 30°43′41.0″,E 108°25′42.0″),占地 12 hm²,濒临长江,土地较平整,坡度 20~25°。

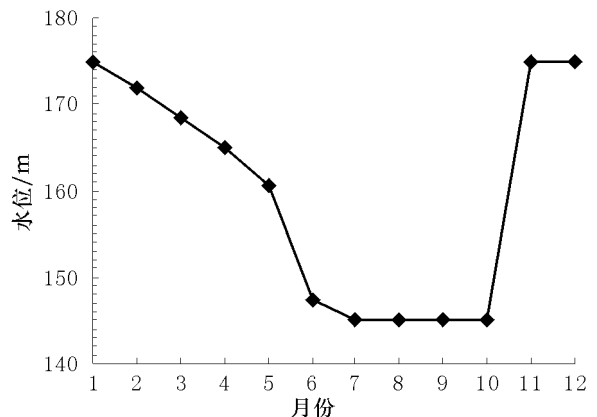


图 1 三峡库区成库后水位调度示意图

Fig. 1 Water level of the Three Gorges Reservoir

1.2 研究材料

土壤样品取自万州新田镇野外试验基地三峡水库初期蓄水前河岸,取地表 0~20 cm 淤积土充分混合,土壤类型为紫色土。紫色土矿质养分含量高,粘粒较少,土壤肥力高于黄壤^[18-19]。其理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil for test

pH 值	$w_b/(mg \cdot kg^{-1})$							有机质含量 /%	DPS(磷吸持 饱和度)/%
	CaCO ₃	TN	TP	Olsen-P	Mehlich-III P	Feox	Alox		
7.78	57.15	848.5	741	20.45	54.37	968.2	643.7	2.12	18.12

土壤样品处理步骤:将鲜样清除砂石,植物残体后在室内混匀风干,过 200 目筛备用。

模拟试验用水以蒸馏水为主,部分对比试验水采用万州江段新田镇断面的江水,试验用江水中 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 浓度分别为 0.697、0.435、0.241、0.079、0.152、0.118、2.197 mmol/L。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤样品的分析方法

(1)总磷(TP):硫酸-高氯酸消化法,过滤后钼锑抗比色法测定。

(2)Olsen-P:用 0.5 mol/L NaHCO₃ (pH 值 8.5),土液比 1:20,在(25±1)°C下震荡 30 min,过滤后钼锑抗比色法测定溶液中磷的浓度为 Olsen-P。

(3)无机磷形态的分级:无机磷的分级采用顾益初和蒋柏蕃提出的连续浸提法^[20],该法将无机磷分为 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P。

1.3.2 实验室周期性“淹水-落干”试验

模拟淹水条件下,取供试土壤进行连续“淹水—落干”的干湿交替实验。取风干土样 0.5 kg 分别放入直径为 13.6 cm、体积为 5 L 的玻璃试剂瓶中做淹水释放试验,土层深度约为 3 cm,加入 2.5 L 蒸馏水浸泡。释放试验所用 PVC 容器外面覆厚度 4 mm 的纸以避光。每次淹水 4 周,然后排干上覆水并风干 4 周,如此反复三次。分别测定第一次淹水期间第 1、2、5、7、14、21、28 天土壤鲜样的磷形态,以及 3 次淹水和风干后土壤鲜样和风干样的有效磷。

1.3.3 长期淹水对比试验

分为野外试验、实验室江水淹没对照试验和实验室蒸馏水淹没对照试验。

野外试验:将供试土壤充分混合,每份样品 9 kg,共计 14 份,放于 PVC 圆柱形容器中,沉于水下 100~150 cm 处,用铁丝固定在木筏上,木筏固定于江岸。

实验室对照试验(江水淹没/蒸馏水淹没对):将供试土壤充分混合,每份样品 200 g,共计 7 份,放于 PVC 圆柱形容器中,各加入供试江水/蒸馏水 20 L。各试验淹没日期为 2004 年 11 月 4 日,从 12 月

15 日(第 6 周)起每 4 周提出 2 盆,直至第 26 周。野外试验取各容器表层 0~10 cm 土壤分别风干并充分混合;实验室对照试验取各容器土壤风干并充分混合。分别测定各样品的有效磷。

1.3.4 不同水位深度淹水试验

取供试土壤每份样品 9 kg,共计 14 份,放于 PVC 圆柱形容器中,每两份装于一镂空塑料箱中,用铁丝固定;在船上用浮标及尼龙绳标定水位深度,在 30、25、20、15、10、5、0 m 处用尼龙绳将塑料箱沉到江底,绳子固定在江岸。淹没日期为 2004 年 11 月 4 日,出露期为 5 月 15 日,共计淹没 26 周。取各容器表层 0~10 cm 土壤,一半湿样冷藏用于直接分析,另一半湿样风干并充分混合。测定各样品的有效磷。

1.3.5 不同磷浓度上覆水淹水过程中磷吸持动态模拟试验

在 2.5 L 的锥形瓶中,每瓶加入过 2 mm 筛的风干土样 200 g,分别添加含 P 0、0.5、1、2、5 mg/L 的蒸馏水溶液 2 L,蔽光静置,在 25 °C 左右进行磷吸附模拟实验。

淹水期间第 1、2、4、6、8、10、12 周测定上覆水磷浓度。

1.3.6 微生物试验

在 2.5 L 的锥形瓶中,每瓶加入过 2 mm 筛的风干土样 200 g,添加蒸馏水 2 L,然后分别采取添加添加 HgCl₂ 杀死底泥中的微生物和不添加 HgCl₂ 的处理。

淹水期间第 1、2、5、10、15、20、25、30 天测定上覆水磷浓度。

1.3.7 植物试验

于 2004 年 9 月 28 日将地瓜藤和狗牙根用供试土壤 9 kg 种植于 PVC 圆柱形容器中,经过 1 个月的培养,两种植物在容器中生长良好。于 2004 年 11 月 4 日将土壤和植物一同沉于水下 5 m 处,用铁丝固定在木筏上,木筏固定于万州新田镇江岸,出露期为 2005 年 5 月 15 日,共计淹没 26 周,取各容器表层 0~10 cm 土壤风干并充分混合。测定各样品鲜样的有效磷。

以上实验均做三个平行处理,取平均值做数据处理。

2 结果和讨论

2.1 淹水时间对土壤对磷释放的影响

2.1.1 28 d 淹水期间土壤磷形态变化

在 28 d 淹水时间内持续观察土壤各形态磷的变化(图 2),发现各形态磷变化有相当的差异。 Ca_2 -P 活性最高,在淹水第一天由 14 mg/L 降至 4mg/L,但在 10 d 左右略有上升并维持稳定。 Ca_8 -P 略有减少,但并不显著。

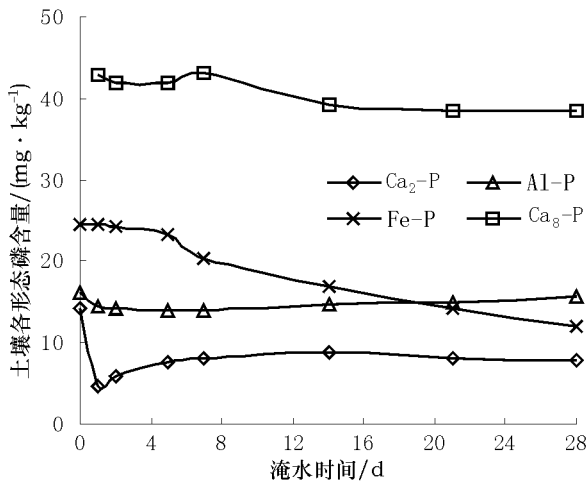


图 2 各形态磷随淹水时间变化

Fig. 2 Variation in contents of different forms of phosphorus with inundating time

Fe-P 是磷释放的主要动力,在开始 5 d 内下降较少,但在 1 周左右开始持续减少。Fe-P 的释放是由于土壤溶解氧逐渐耗尽致使 Eh 较低,使其还原释放。Al-P 开始时略有下降,10 d 后开始缓慢上升。

湖泊沉积物在相当长时间内,Al-P 和 Fe-P 存在一个转化过程,沉积物中的 Al-P 将逐渐转化成 Fe-P。我们在持续淹水条件下发现 Al-P 在开始时下降,但又有所上升,可能是由于其他形态的磷转化为 Al-P 造成的(如还原状态下 Fe-P 的溶解)。O-P、 Ca_{10} -P 性质稳定,几乎没有变化。

随着淹水时间的变化,各种形态的磷在前 5~10 d 各形态磷变化有相当的差异,随后变化趋势趋于稳定;TP 有降低的趋势,土壤磷有一定的释放。

2.1.2 长期淹水土壤 Olsen-P 变化

Olsen-P 在淹水 10 周左右到达最大值(图 3),

以后缓慢降低,土壤在野外淹没时土壤 Olsen-P 变化较大,而实验室淹没时在江水淹没和蒸馏水淹没时变化接近。这可能是由于在野外较大的环境变化引起的,如在野外时温度变化波动较大,又如在野外可能形成与实验室条件下不同的微生物群落,这些都对土壤的释磷特征产生影响。

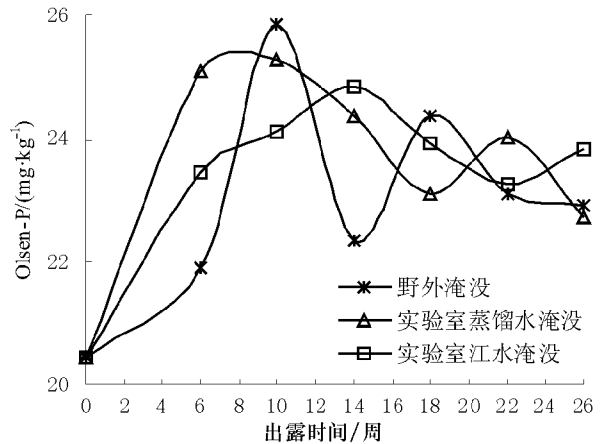


图 3 Olsen-P 沿时间梯度变化规律

Fig. 3 Contents of Olsen-P varied with inundating time

2.2 周期性“淹水—落干”淹水次数对磷释放的影响

图 4 为 Olsen-P 在干湿交替下变化情况。第一次淹水时土壤 Olsen-P 由 20.3 mg/kg 上升到淹水时 29.8 mg/kg,增加了 46.8%,干燥后降至 22.0 mg/kg,土壤有效磷水平在淹水时增加,干燥后降低。通过研究发现每次淹水时土壤的有效磷水平都略有增加,3次淹水时Olsen-P水平分别为29.8、

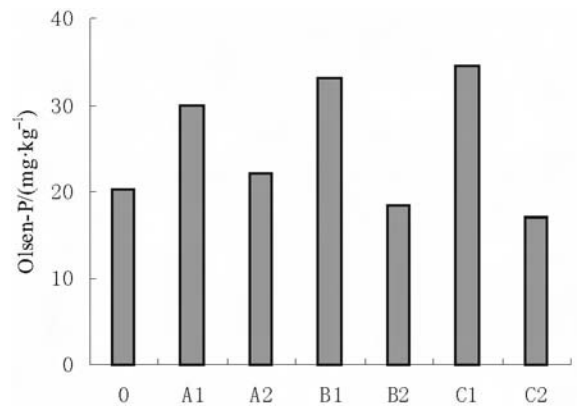


图 4 Olsen-P 在干湿交替下变化

Fig. 4 Variation in contents of Olsen-P in alternately waterlogged and drained condition

图中横坐标中 0 表示初始,A1、B1 分别表示第一次淹水、落干,A2、B2 分别表示第二次淹水、落干,A3、B3 分别表示第三次淹水、落干

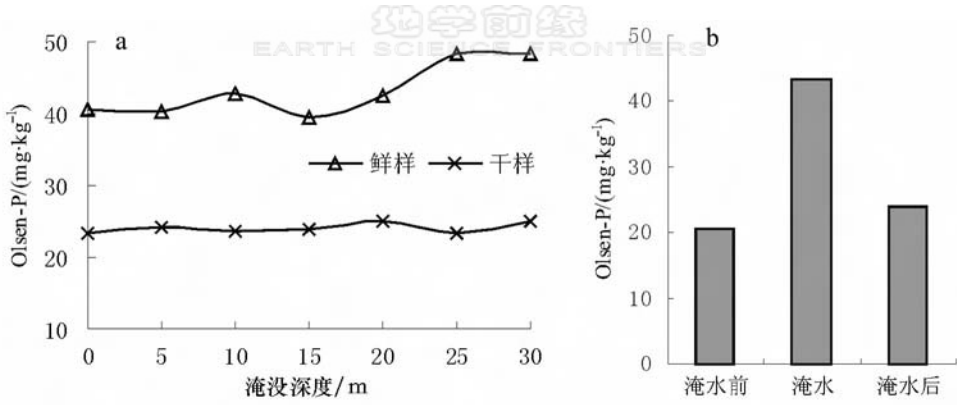


图5 Olsen-P沿水位梯度变化规律
Fig. 5 Variation in contents of Olsen-P with inundating water level
a—沿水位梯度变化; b—平均值比较

33.1、34.6 mg/kg,但每次落干时相较于上次落干时有效磷水平降低,3次淹水干燥后有效磷水平分别为22.0、18.4、16.9 mg/kg,最后一次淹水后与初始时Olsen-P比较水平低16.7%。

2.3 不同水位梯度变化对磷释放的影响

随着淹水深度增加,土壤的Olsen-P水平(图5)在淹水时由淹水前20.53 mg/kg提高到43.23 mg/kg,增加110.6%。风干后速效磷为24.03 mg/kg,高于淹水前17%。土壤鲜样速效磷水平在各个较大的水位梯度(>20 m)其速效磷水平略大于较低的水位梯度时有效磷水平,在水位梯度25、30时分别为48.43 mg/kg和48.33 mg/kg,而水位梯度为0~20 m时Olsen-P均维持在39.53~42.93 mg/kg,比低水位梯度下高17.6%,这可能是因为在较低的水位梯度时缺氧,造成磷的活化。

2.4 上覆水磷浓度对土壤磷释放的影响

本实验与磷的等温吸附解吸实验有很大差别,等温磷吸附是在微生物生长受到强烈抑制状态下进行的,而本实验在有微生物活动的条件下进行。土壤在不同初始浓度的磷溶液中,上覆水磷浓度随时间变化如图6。

当上覆水磷浓度较低时(<2 mg/L),磷吸附到达平衡的时间较短,约需要6周。当上覆水磷浓度较高(>2 mg/L)时,磷吸附到达平衡的时间较长,上覆水浓度为5 mg/L时到12周试验结束时仍未达到吸附平衡。

2.5 微生物对淹水还原条件下土壤磷释放的影响

图7为微生物对淹水条件下土壤磷释放的影响。研究发现添加杀菌剂HgCl₂抑制微生物后,培养的前期(10 d内)上覆水中的磷浓度与未添加杀

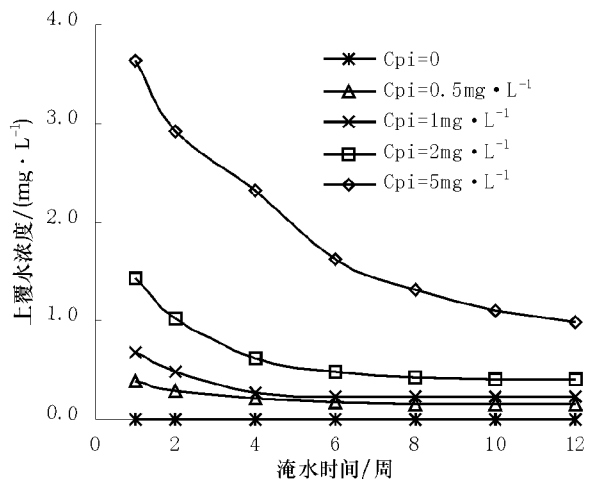


图6 上覆水磷浓度对土壤磷释放的影响
Fig. 6 Influence of phosphorous contents of covered water on phosphorous release from soil
Cpi表示上覆水中磷浓度

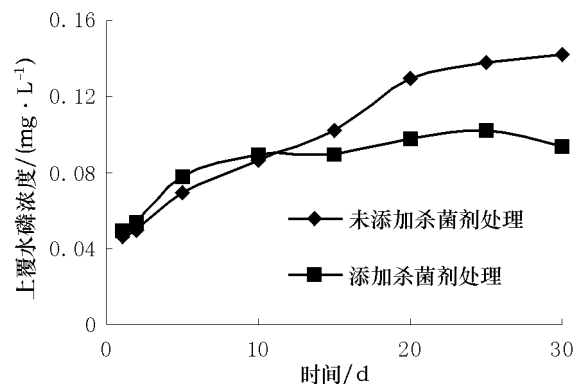


图7 微生物对淹水条件下土壤磷释放的影响
Fig. 7 Influence of microorganism on phosphorous release from soil

菌剂HgCl₂无明显差异,但10 d后明显低于无杀菌剂HgCl₂处理磷浓度。土壤在30 d左右达到释放

平衡,无微生物时上覆水磷浓度大于有微生物,平衡时有微生物时磷的释放高于无微生物 0.048 mg/L。

大多数研究者^[21]认为,在有微生物作用下的底泥,其内源磷的释放量明显高于没有微生物作用底泥内源磷的释放,说明在微生物作用下可把底泥中有机态磷转化为无机态磷,从而增加底泥中磷的释放量。此外,微生物还可将不溶性磷化物转化为可溶性磷,将进一步促进底泥内源磷的释放。1998年,吴根福等人^[22]对杭州西湖底泥释磷的初步研究中发现,微生物培养的初期,上覆水 TP 和磷酸根均有所下降,随着培养时间的延长,磷的释放逐渐加强,这一方面说明了微生物对磷释放的影响,另一方面表明微生物对不同理化性质的底泥磷的释放外部表现形式的不同。

2.6 种植植物对土壤 Olsen-P 的影响

图 8 为淹水情况下不同植物对土壤 Olsen-P 的释放情况。从图中可看出,种植狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 和野地瓜藤 (*Ficus tikoua*) 的土壤中 Olsen-P 分别为 52.5 mg/kg 和 48.7 mg/kg,较未种植物土壤释放量高出 21.5% 和 12.7%。由于植物残体在分解时释放了有机酸,使根际土壤的 pH 值下降,这也不同程度的促进难溶磷的活化,即增加了土壤的活性磷水平。

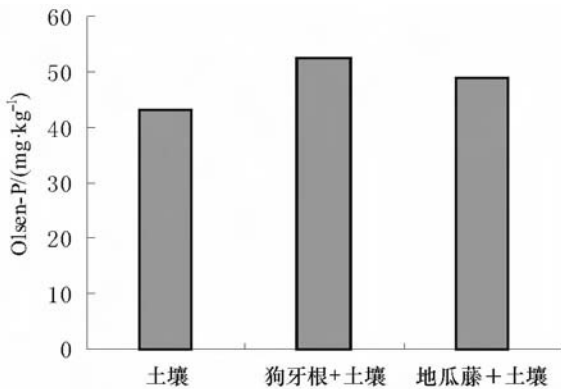


图 8 淹水植物土壤 Olsen-P 的比较

Fig. 8 Contents of Olsen-P varied with different plants grew in soil

3 结论

(1)随着淹水时间的增加土壤中 TP 有降低的趋势,会增加土壤磷有一定的释放。多次淹水时每次淹水后土壤的有效磷水平都略有增加,落干后相较上次落干后有效磷水平降低,最后一次淹水后相

较与初始时 Olsen-P 水平低 16.7%。随着淹水深度增加,土壤的 Olsen-P 水平在淹水时由淹水前 20.53 mg/kg 提高到 43.23 mg/kg,增加 110.6%。

(2)当上覆水磷浓度较低时 (<2 mg/L),磷吸附到达平衡的时间较短,约需要 6 周。当上覆水磷浓度较高 (>2 mg/L) 时,磷吸附到达平衡的时间较长。

(3)添加 HgCl₂ 抑制微生物后,培养的前期 (10 d 内) 上覆水中的磷浓度与未添加 HgCl₂ 无明显差异,但 10 d 后明显低于无 HgCl₂ 处理磷浓度。平衡时有微生物时磷的释放高于无微生物 0.048 mg/L。

(4)种植植物的土壤在淹水后 Olsen-P 含量大于土壤直接淹没时的释放量,种植狗牙根和野地瓜藤的土壤中 Olsen-P 分别较未种植物土壤释放量高出 21.5% 和 12.7%。

References:

- [1] Niu Z M, Xie M S. Thoughts on development and utilization of water and soil resources in the reservoir Changing Region in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Science & Technology Review, 1998, 4: 61-62 (in Chinese).
- [2] Xiao W F, Li J W, Yu C Q, et al. Ecology of terrestrial animal and plant in Three Gorges reservoir district[M]. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 2000: 1-88 (in Chinese).
- [3] Nichol T D. Rhizosphere microbial populations in contaminated soils[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1997, 95 (14): 165-176.
- [4] Ryan K, Miya, Mary K F. Phenanthrene-Degrader community dynamics in rhizosphere soil from a common annual grass [J]. J Environ Qual, 2000, 29: 584-592.
- [5] Reilley A, Banks M K, Schwab A E. Dissipation of PAHs in the rhizosphere[J]. J Environ Qual, 1996, 25: 212-219.
- [6] David L C. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving water: a review[J]. J Environ Qual, 1998, 27: 261-266.
- [7] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions [J]. J Environ Qual, 2001, 30: 1474-1480.
- [8] Li S T, Zhou J M, Wang H Y. Characteristics of fixation and release of Phosphorus in three soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (6): 908-914 (in Chinese).
- [9] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, et al. Relationship between phosphorous in three ultisols and phosphorous concentration in runoff [J]. J Environ Qual, 1999, 28: 170-175.
- [10] Czyk T G, Casper P, Koschel R. Variations of phosphorus release from sediments in stratified lakes [J]. Water Air Soil

Pollut, 1997, 99(1/4):427-434.

- [11] Wang X R, Hua Z Z, Xu L, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in Lake Sediments [J]. Environmental Chemistry, 1996, 15 (1): 15-19 (in Chinese).
- [12] Murphy T, Lawson A, Kumagai M, et al. Release of phosphorus from sediments in Lake Biwa[J]. Limnology, 2001, 2:119-128.
- [13] Fu C P, Zhong C H. Relationship between pH value of the water and release silt bottom of Nitrogen & Phosphate in the Three Gorges[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27 (10):125-127(in Chinese).
- [14] Burley K L, Prepas E E, Chambers P A. Phosphorus release from sediments in hardwater eutrophic lakes; the effects of redox-sensitive and-insensitive chemical treatments [J]. Freshwater Biology, 2001, 46(8):1061-1074.
- [15] Sondergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind exposed Lake Arreso, Denmark[J]. Hydrobiologia, 1992, 228:91-99.
- [16] Jellsen H S, Kristensen P, Jeppesen E, et al. Iron:phosphorous ratio in surface sediment—an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 1992, 235/236:731-743.
- [17] Chen Y J. A study of phosphorus forms in Guangzhou reach of the Pearl river[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1990, 9(4):73-78(in Chinese).
- [18] Zhu B, Luo X M, Xu P, et al. Profile differentiation of soil nutrients and fertility potential of purple sh soils[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2000, 13(4):50-56(in Chinese).
- [19] Soil Survey Staff Office of China. Chinese soil [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998(in Chinese).
- [20] Gu Y C, Jiang B F. A determination method of inorganic phosphorus fractionation in calcareous soils[J]. Soils, 1990, 22 (2):101-102(in Chinese).
- [21] Yin D Q, Qin Q R. Effect of environmental factors on release of phosphorus from sediments in Wuli Lake [J]. Journal of Lake Science, 1994, 6(3):240-244(in Chinese).
- [22] Wu G F, Wu X C, Jin C T, et al. Preliminary studies on release of phosphorus from the sediment of West Lake, Hangzhou [J]. China Environmental Science, 1998, 18(2):107-110 (in Chinese).

参考文献:

- [1] 牛志明,解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J]. 科技导报, 1998, 4:61-62.
- [2] 肖文发,李建文,于长青,等. 长江三峡库区陆生动植物生态 [M]. 重庆:西南师范大学出版社, 2000:1-88.
- [8] 李寿田,周健民,王火焰. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(6):908-914.
- [11] 王晓蓉,华兆哲,徐菱,等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1):15-19.
- [13] 付春平,钟成华. pH 与三峡库区底泥氮磷释放关系的试验 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27(10):125-127.
- [17] 陈玉娟. 珠江广州河段中磷的形态研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 1990, 9(4):73-78.
- [18] 朱波,罗晓梅,徐佩,等. 紫色土肥力要素的剖面分异与肥力潜力[J]. 西南农业大学学报, 2000, 13(4):50-56.
- [19] 全国土壤普查办公室. 中国土壤 [M]. 北京:中国农业出版社, 1998.
- [20] 顾益初,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2):101-102.
- [21] 尹大强,覃秋荣. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 1994, 6(3):240-244.
- [22] 吴根福,吴雪昌,金承涛,等. 杭州西湖底泥释磷的初步研究 [J]. 中国环境科学, 1998, 18(2):107-110.