

# 外源磷在三峡库区典型土壤中的活性演变及形态转化\*

冉小萌<sup>1</sup> 蒋珍茂<sup>1, 2, 3</sup> 何明靖<sup>1, 2, 3</sup> 魏世强<sup>1, 2, 3†</sup>

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

(2 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

(3 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716)

**摘 要** 三峡库区消落带土壤周期性淹水一出露对磷素迁移循环和水体负荷具有重要影响。以三峡库区消落带广泛分布的紫色潮土和灰棕紫泥土为对象, 通过室内模拟培养实验, 探讨不同饱和度和外源磷在两种土壤中的活性变化与形态转化特征。结果表明: (1) 外源磷进入土壤后, 表征土壤磷活性的有效磷 (Olsen-P) 含量及磷素释放能力呈指数型衰减, 可用指数方程  $C_t = ae^{-kt} + b$  拟合, 拟合度均在 94% 左右。(2) 外源磷在灰棕紫泥土中较在紫色潮土中能够保持更高的活性, 同时也具有更高的渗漏淋失与释放风险。50%  $Q_m$  (最大吸附量) 是两种土壤 Olsen-P 与磷素平衡解吸量的突变点, 当磷素吸持饱和度  $\geq 50\%$  时, 土壤磷活性与渗漏淋失风险将明显增大。(3) Olsen-P 与磷释放量在  $p < 0.01$  水平上呈显著正相关, 两者可用线性方程良好拟合, 因此可用 Olsen-P 含量表征土壤磷素释放潜势。(4) 外源磷进入土壤后, 主要转化为活性较高的  $Ca_2$ -P 和  $Ca_8$ -P, 约占施入量 50% ~ 60%; 其次是 Al-P 和 Fe-P, 约占施入量的 30% 左右, 闭蓄态磷 (O-P) 和  $Ca_{10}$ -P 变化不明显。(5)  $Ca_2$ -P 是决定 Olsen-P 和磷素解吸能力的主要形态, 对两者均起正向直接作用。

**关键词** 三峡库区消落带; 土壤无机磷形态; 有效磷; 释放; 临界值

**中图分类号** S153 **文献标识码** A

三峡水库是举世瞩目的特大型水库, 成库后的水环境安全是国内国际关注的重大环境问题, 水体富营养化对库区水环境安全构成主要威胁。磷素作为水体富营养化的主要限制因子<sup>[1]</sup>, 水体中磷浓度的升高直接增加了水体富营养化的风险。三峡库区消落带土壤具有周期性“淹水—落干”干湿交替的循环特性, 土壤干湿交替明显影响土壤磷活性及释放性能<sup>[2]</sup>。落干期间正是库区降雨集中期, 来自周边小流域的农业径流流经消落带, 所携带的颗粒态磷可沉积于消落带土壤、可溶态磷亦可被土壤所吸持, 同时消落带季节性利用也会增加消落带土壤磷素负荷; 在随后的淹水期间, 伴随消落带土壤淹

水后性质的急剧变化, 蓄积于土壤中的磷可释放进入上覆水体, 增加水体中磷的浓度, 使消落带土壤成为水体磷素的重要补给源<sup>[3-4]</sup>。

由于磷素在农业生产和水环境安全中的重要性, 土壤中磷的形态转化、迁移循环和有效性变化等长期以来受到国内外的广泛关注<sup>[5-8]</sup>, 以保护水环境为目标的研究侧重土壤磷的释放特征、影响因素及机理方面<sup>[9-11]</sup>。土壤 (沉积物) 向水体释放磷的潜势, 一方面与磷素负荷有关, 另外一方面也取决于土壤对磷的固持能力。外源磷进入土壤后能迅速被土壤有机、无机组分所吸持, 并最终形成不同形态赋存于土壤中, 表现出不同的移动性和生物活

\* 国家自然科学基金项目 (41171198) 和水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07104-003) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41171198) and the China Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2012ZX07104-003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: sqwei@swu.edu.cn

作者简介: 冉小萌 (1990—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学。E-mail: ranxiaomeng90@163.com

收稿日期: 2016-02-18; 收到修改稿日期: 2016-04-17; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-05-16

性<sup>[12]</sup>。不少学者采用一定土/液比条件下,水或稀盐溶液(如0.01 mol L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>或KCl等,用以模拟土壤溶液)提取的磷来表征土壤磷释放进入溶液的能力<sup>[13-15]</sup>,当土壤磷素负荷超过一定的临界点后,磷的释放能力将迅速增加<sup>[16]</sup>;Heckrath等<sup>[17-18]</sup>的研究提出土壤中磷的垂直迁移存在突变点(Change-Point),当表征土壤磷活性的有效磷(Olsen-P) < 57 mg kg<sup>-1</sup>时,几乎不发生磷的垂直迁移,而高于该突变点后迁移进入地下水中的总磷(TP)和钼酸盐反应磷(MBR)与Olsen-P呈线性相关。土壤对磷的固持能力常用最大或饱和吸附量来表征,理论上土壤中磷的吸附饱和度越低,磷的吸附固定能力越强,相应移动性与释放潜势越低,反之亦然。但土壤磷素释放潜势与吸附饱和度之间有着怎样的定量关系,是否存在突变点?不同饱和度下土壤中磷的赋存形态与活性之间有何联系?迄今还缺乏深入研究。由于三峡库区消落带土壤在调节水体磷素负荷中的特殊重要性,研究阐明上述问题具有十分重要的理论与实践意义。

本文以三峡库区消落带广泛分布的紫色潮土和

灰棕紫泥两种土壤为研究对象,通过室内模拟培养实验,探讨不同饱和度外源磷进入土壤后的活性变化、形态分配特征及两者之间的关系,揭示土壤磷素释放潜势与磷素负荷、形态及活性的关联特征。为进一步了解三峡库区消落带磷素迁移循环规律及水体富营养化的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤分别为紫色潮土、灰棕紫泥,为三峡库区消落带分布最为广泛的两种土壤,于2012年7月采自重庆市开县消落带、涪陵消落带。开县紫色潮土采自开县厚坝镇村委会街对面河边170 m高程的消落带区域(108°27'21" E, 31°11'26" N),植被为野生草本。涪陵灰棕紫泥采自涪陵区清溪镇双龙村长江干流160 m高程的消落带区域(107°31'37" E, 29°51'30" N),植被为野生草本。所有样品均按文献[19]规定的方法进行采集、处理、保存以及分析测定,土壤的基本理化性质见表1。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soils

土壤	有机质	阳离子交换量	全铁	全磷	有效磷	颗粒组成 Particle size distribution ( % )				
类型	pH	OM	CEC	TFe	TP	Olsen-P	2 ~ 0.05	0.05 ~ 0.02	0.02 ~ 0.002	<0.002
Soil type		( g kg <sup>-1</sup> )	( cmol kg <sup>-1</sup> )	( g kg <sup>-1</sup> )	( mg kg <sup>-1</sup> )	( mg kg <sup>-1</sup> )	mm	mm	mm	mm
紫色潮土	8.24	10.11	15.77	21.65	382.8	3.44	26	14	24	36
Purple alluvial soil										
灰棕紫泥	7.98	8.27	34.81	22.74	332.7	13.30	44	8	23	25
Grey-brown purple soil										

1.2 土壤培养与样品采集

土壤培养:分别称取1 kg过2 mm筛风干紫色潮土、灰棕紫泥各五份,置于密闭PVC小盆内,根据土壤的最大吸附量(Q<sub>m</sub>)设置五个不同饱和度外源磷添加量,即0% Q<sub>m</sub>(空白)、25% Q<sub>m</sub>、50% Q<sub>m</sub>、75% Q<sub>m</sub>、100% Q<sub>m</sub>。石艳<sup>[20]</sup>前期研究表明两种土壤的最大吸附量分别为1 000 mg kg<sup>-1</sup>、909 mg kg<sup>-1</sup>,因此,调节紫色潮土的添加KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>溶液水平为0、250、500、750、1 000 mg kg<sup>-1</sup>,编号记为Z1、Z2、Z3、Z4、Z5。灰棕紫泥添加

KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>溶液水平为0、227.3、454.5、681.8、909.1 mg kg<sup>-1</sup>,编号记为H1、H2、H3、H4、H5。溶液与土样充分混匀,置于(25 ± 1) °C,湿度为90%的恒温气候箱中培养30 d。培养期间,每盆每周称量两次,通过添加去离子水保持土壤含水量为20%。

样品采集:(1)分别于培养后1 d、3 d、7 d、15 d、30 d对不同磷饱和度处理下两种土壤进行采样,测定土壤中Olsen-P含量,以表征土壤中磷的活性变化,同时以0.01 mol L<sup>-1</sup> KCl模拟土壤溶液,测定土壤磷的解吸量,用以表征土壤磷的释放潜

势; (2) 培养1d、15d和30 d后采集新鲜土壤样品, 进行磷的形态分级测定, 了解不同饱和度外源磷的形态转化特征。

### 1.3 分析方法

试验中供分析的土壤样品均采用鲜样, 采样当天及时进行分析测定, 未用完样品保存于4℃冰箱中。

土壤pH采用PB-10 pH (德国Sartorius AG 公司) 计测定; 有机质采用重铬酸钾容量—外加热法测定; 全磷采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定; 阳离子交换量采用乙酸铵法; 机械组成采用甲种比重计法测定。具体步骤参见文献 [19]。

Olsen-P采用0.5 mol L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> (pH 8.5) 提取, 钼锑抗比色法测定滤液中磷的浓度。土壤无机磷形态分级采用蒋柏藩 [21] 提出的连续浸提法。该法分6步提取, 称取1.000 g土样于100 ml离心管中, 分别采用0.25 mol L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>、0.5 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>Ac、0.5 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>F+0.8 mol L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub>、0.1 mol L<sup>-1</sup> NaOH+0.05 mol L<sup>-1</sup> NaCO<sub>3</sub>、0.3 mol L<sup>-1</sup> 柠檬酸三钠+1g连二亚硫酸钠+0.5 mol L<sup>-1</sup> NaOH、0.25 mol L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>作为浸提剂, 进行连续浸提, 离心后采用钼锑抗比色法测量上清液中磷的含量。分别得到Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca<sub>10</sub>-P。

土壤磷素释放潜势: 称取1.000 g土壤于100 ml离心管中, 加入0.01 mol L<sup>-1</sup> KCl (pH=7.0±0.1) 溶液20 ml (液土比20:1), 每个样品加入氯仿3滴, 以抑制微生物活动, 25℃下振荡24 h, 离心 (4 000 r min<sup>-1</sup>) 10 min, 过0.45μm滤膜, 测定平衡液中磷的含量, 计算磷的释放量。上述分析测定均重复3次。

### 1.4 数据处理

土壤Olsen-P (P) 及磷素单次解吸量 (P) (mg kg<sup>-1</sup>) =C<sub>p</sub>×20。式中, C<sub>p</sub>为从校准曲线求得浸提液中P的浓度; 20为浸提时的液土比。

采用Origin 8.5软件绘制实验数据图, 采用Excel 2007、SPSS 19.0软件对数据进行统计和分析, 采用单因素方差分析 (One way-ANOVA) 对数据进行显著性检验, 采用Pearson法进行相关性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 外源磷在土壤中的活性 (Olsen-P) 变化动态

Olsen-P是土壤中磷活性的重要指标, 不仅能

够很好地反映土壤中磷对于植物的有效性, 同时也能很好地表征磷素的垂直迁移能力以及向水体迁移的能力 [22-23]。图1反映了紫色潮土和灰棕紫泥两种土壤中添加不同饱和度外源水溶性磷处理, 培养过程中Olsen-P随培养时间的动态变化。可见, 未添加外源磷对照处理 (Z1和H1) 的Olsen-P含量在培养始末变化不明显, 基本保持其本底水平3.44 mg kg<sup>-1</sup>和13.30 mg kg<sup>-1</sup>左右, 分别属于低磷水平与高磷水平。

外源水溶性磷进入土壤后, 由于土壤组分对磷的吸持固定, 其活性迅速降低, 以在培养后的15 d内Olsen-P下降幅度最大, 此后逐渐平稳并保持较高水平。土壤Olsen-P含量随培养时间的变化可用指数衰减模型很好地加以拟合, 决定系数R<sup>2</sup>在94%以上:

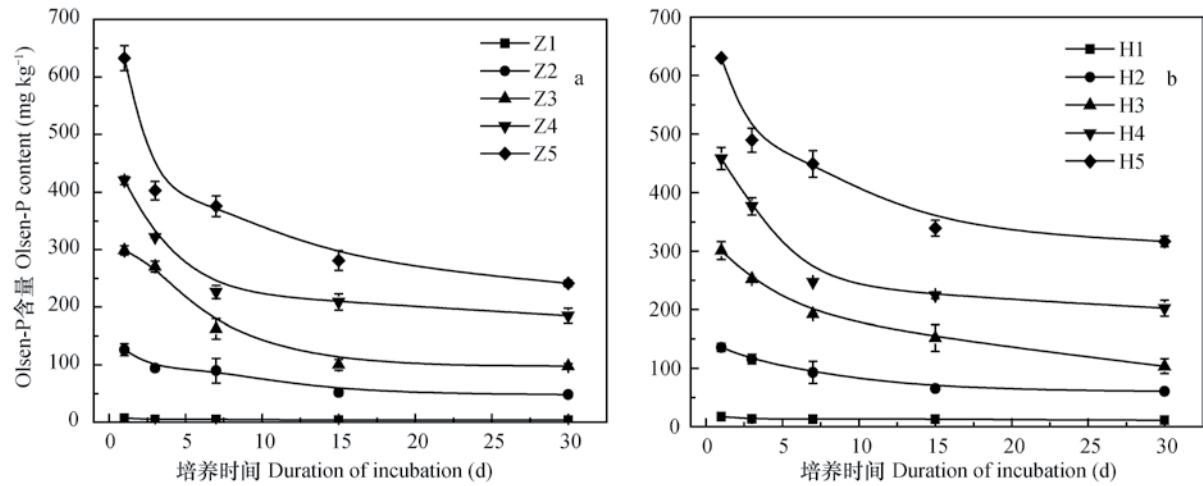
$$C_t = ae^{-kt} + b \quad (1)$$

式中, C<sub>t</sub>为培养t天后土壤Olsen-P含量, a, b和k为与土壤性质及磷素水平相关的参数。当t→∞时, C<sub>t</sub>=b, 因此b反映了外源磷转化平衡后土壤Olsen-P的含量; 而当t=0时, C<sub>0</sub>=a+b, 可见a事实上反映了外源磷在土壤中活性的最大衰减量或土壤对磷的最大固持量, 可定量表征土壤对磷的固定能力; 同时, 对式 (1) 求导可得:

$$\partial C_t / \partial t = -ake^{-kt} \quad (2)$$

式 (2) 可见, 磷素活性的衰减速率受速率常数k值及土壤固磷能力a的影响。不同外源磷添加土壤的Olsen-P动态变化拟合参数见表2。

表2表明, 同一土壤中a、b数值随着外源磷含量的增加而增加, 表明随着磷吸持饱和度的增加, 尽管土壤磷最大固持量 (a) 增加, 但最终活性磷平衡含量 (b) 亦增加, 意味着土壤磷素饱和度较高的条件下磷素被固定的比例减少, 外源磷以更高的比例保持活性状态, 这与表3计算结果一致。在相同磷素饱和度下, 不同土壤中外源磷活性的变化有明显差异, 灰棕紫泥中b的绝对值均高于紫色潮土而a值低于紫色潮土, 说明外源磷进入灰棕紫泥转化平衡后, 能够保持更高的活性; a×k乘积反映了磷活性的衰减速率, 表2结果说明外源磷在紫色潮土中活性衰减速率更高, 等量外源磷进入紫色潮土和灰棕紫泥之后, 单位时间内紫色潮土丧失更多活性, 灰棕紫泥在相同时期内能够保持更高的活性, 这可能是由于紫色潮土黏粒含量更高, 磷的固持能力更强所致 (表1)。



注：图中Z代表紫色潮土，H代表灰棕紫泥；数字1-5分别代表磷饱和度0，25%，50%，75%，100%，下同  
Note: Z stands for the purple soil, H for the grey-brown purple mud; numbers 1-5 for phosphorus saturation degree of 0, 25%, 50%, 75% and 100%, respectively, the same below

图1 紫色潮土和灰棕紫泥添加不同水平外源磷后土壤中Olsen-P变化动态

Fig. 1 Dynamics of Olsen-P in purple alluvial soil (a) and grey-brown purple soil (b) relative to application rate of extraneous phosphorus

表2 添加不同水平外源磷后土壤磷活性（Olsen-P）动态变化拟合参数

Table 2 Parameters for fitting of dynamics of soil P availability (Olsen-P) in the soils relative to level of extraneous phosphorus							
样品编号	磷吸附饱和度	$a$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$b$ (mg kg <sup>-1</sup> )	$k$	$R^2$	$a \times k$	
Sample code	P adsorption saturation degree (%)						
Z2	25	87.82	45.11	0.132	0.941	11.57	
Z3	50	262.4	87.57	0.163	0.975	42.84	
Z4	75	285.9	192.5	0.276	0.992	78.91	
Z5	100	485.2	273.9	0.344	0.929	166.7	
H2	25	90.08	57.89	0.145	0.996	13.09	
H3	50	218.5	102.0	0.116	0.990	25.41	
H4	75	335.2	201.3	0.245	0.991	82.02	
H5	100	351.9	317.7	0.175	0.963	61.41	

表3 外源磷在土壤中活性变化

Table 3 Changes in availability of extraneous phosphorus in the soils					
样品编号	培养1天 Culture time 1d		培养30天 Culture time 30 d		Olsen-P含量衰减速度
	Olsen-P增量 Olsen-P increment (mg kg <sup>-1</sup> )	占施入量 Account for exogenous phosphorus (%)	Olsen-P增量 Olsen-P increment (mg kg <sup>-1</sup> )	占施入量 Account for exogenous phosphorus (%)	
Sample code					Olsen-P content decay rate (mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
Z2	122.8 ± 10.4	49.12	45.01 ± 1.60	18.01	2.59
Z3	295.2 ± 8.1	59.04	94.47 ± 4.15	18.89	6.69
Z4	404.7 ± 7.0	53.95	181.5 ± 13.2	24.20	7.44
Z5	629.5 ± 21.8	62.95	238.0 ± 5.1	23.80	13.05
H2	122.4 ± 6.9	53.84	47.09 ± 2.45	20.72	2.51
H3	287.5 ± 15.5	63.26	90.22 ± 12.65	19.85	6.58
H4	444.7 ± 18.7	65.22	189.2 ± 13.7	27.75	8.52
H5	616.8 ± 2.6	67.84	303.1 ± 9.1	33.34	10.46

注：表中Olsen-P含量下降速度为30d内平均下降速度 Note: The decline rate of Olsen-P was the average of those in 30 days

上述结果表明,即使是在饱和吸附量( $100\%Q_m$ )范围内,进入土壤中的外源磷仍能保持较高的活性,当外源磷含量超过 $50\%Q_m$ 时,两种土壤Olsen-P含量即可达到 $87\text{ mg kg}^{-1}$ 以上,超过Heckrath等<sup>[17]</sup>提出的土壤中磷的垂直迁移突变点(Olsen-P $>57\text{ mg kg}^{-1}$ ),土壤磷存在较大的渗漏淋失风险。有研究提出紫色旱土中酸性、中性和钙质紫色土磷素淋失临界点的 Olsen-P含量分别为 $67.2$ 、 $85.8$ 和 $113.8\text{ mg kg}^{-1}$ <sup>[24]</sup>,水稻土的磷素流失风险突变点所对应的Olsen-P含量则为( $114.2$

$\pm 7.9$ )  $\text{mg kg}^{-1}$ <sup>[25]</sup>。可见针对不同类型土壤,其突变点有所差异,但从吸持饱和度来看,本实验中磷素淋失突变点均发生在饱和度 $>50\%$ 时,因此,吸持饱和度似乎能统一表征磷的释放风险。

## 2.2 外源磷在土壤中释放性能变化动态

如图2所示,未添加外源磷时,两种土壤释放在培养始末变化不明显。外源水溶性磷进入土壤后,由于土壤对磷的吸持固定,土壤磷素释放量逐渐降低,以培养15 d内降幅最为明显,此后逐渐平稳并保持在一定水平。

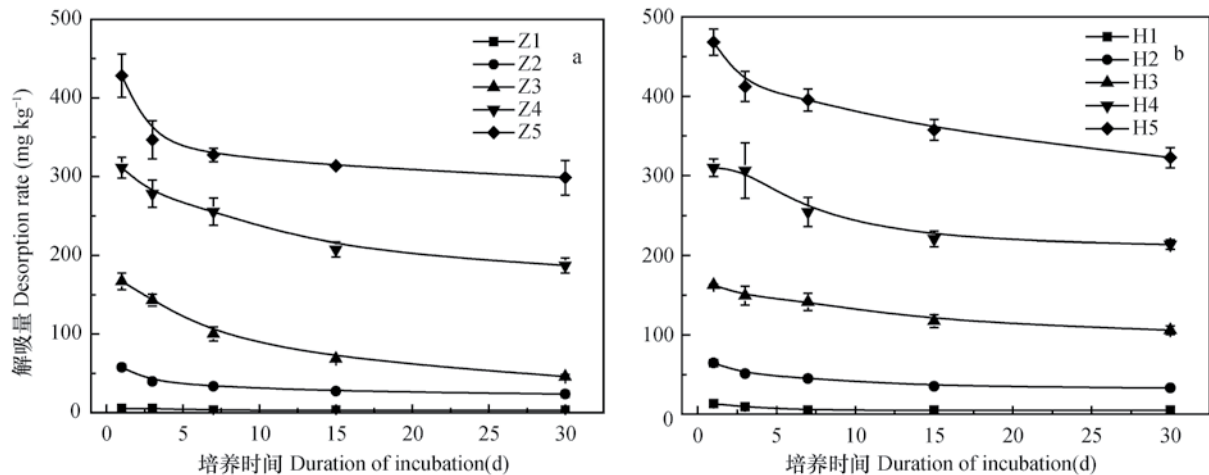


图2 紫色潮土 (a) 和灰棕紫泥 (b) 磷素释放能力变化动态

Fig. 2 Dynamics of phosphorus release capacity in purple alluvial soil (a) and grey-brown purple soil (b)

土壤磷素释放能力的变化趋势与表征土壤磷素活性的Olsen-P含量的变化特征类似,随着培养时间的增加,磷的释放量呈指数型下降,也可用式(1)进行拟合。此时, $C_t$ 代表培养 $t$ 天后土壤磷素释放量, $b$ 则反映了外源磷转化平衡后的土壤磷素释放能力; $a$ 为初始可解吸量与平衡解吸量之差,即不可解吸量或难解吸量; $k$ 仍然为与磷素失活速率相关的参数,拟合结果见表4。

表4与表5表明,随着外源磷饱和度的增加,紫色潮土和灰棕紫泥释放潜势增大,释放率逐渐增大; $a$ 、 $b$ 的绝对值均增加, $k$ 值总体随着外源磷的增多逐渐减小。一方面,表5中30 d释放量与 $b$ 值呈极显著相关( $p < 0.01$ ),因此可将30 d释放近似看作平衡解吸量,从 $b$ 值和30 d时释放量可见外源磷进入土壤转化平衡之后,灰棕紫泥释放潜势更大,渗漏淋失风险更高。另一方面,对比 $a$ 值发现,紫色潮土 $a$ 值大于灰棕紫泥,可见,同一磷饱和度和土壤中,紫色潮土中更多的外源磷转化为难解

吸磷。最后,表4中紫色潮土 $a \times k$ 乘积总体高于灰棕紫泥,表5中紫色潮土磷素释放潜势衰减速度大于灰棕紫泥,可见外源磷进入土壤后,在紫色潮土中释放潜势衰减更快,单位时间内更多的外源磷能够转化为难解吸磷。综合 $a$ 值与 $a \times k$ 值分析可得,等量外源磷进入两种土壤后,紫色潮土磷素释放潜势衰减更快,难解吸磷含量更高,渗漏淋失风险较灰棕紫泥低,这可能是由于紫色潮土黏粒含量更高,磷的固持能力更强所致(表1)。

土壤对磷的吸持能力与吸持饱和度有关。外源磷进入土壤后,优先被强吸持位点所吸持,随着吸持饱和度的增加,强吸持位点被占据并逐步饱和,磷的吸持能力降低,移动性和释放风险增加<sup>[26-27]</sup>。为了定量分析吸持饱和度与解吸能力以及Olsen-P的关系,将转化平衡后的Olsen-P含量、土壤磷素解吸量对吸持饱和度作图,见图3。

由图3可见,两者与吸持饱和度之间的关系呈两段式线性关系。当外源磷添加量由 $25\%Q_m$ 增加

表4 土壤磷素释放潜势变化方程拟合参数

Table 4 Parameter of the equation fitting change in soil phosphorus release potential						
样品编号 Sample code	磷饱和度 P adsorption saturation degree ( % )	平衡解吸量 ( <i>b</i> ) Equilibrium desorption amount ( mg kg <sup>-1</sup> )	难解吸量 ( <i>a</i> ) Hard desorption amount ( mg kg <sup>-1</sup> )	<i>k</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>a</i> × <i>k</i>
Z2	25	25.90	42.45	0.321	0.935	13.63
Z3	50	43.07	140.7	0.121	0.995	17.05
Z4	75	180.0	142.4	0.103	0.981	14.70
Z5	100	310.5	198.2	0.528	0.939	104.7
H2	25	33.22	36.32	0.189	0.962	6.875
H3	50	98.89	67.99	0.079	0.973	5.400
H4	75	207.4	125.6	0.129	0.928	16.14
H5	100	321.6	151.6	0.110	0.914	16.77

表5 土壤磷素解吸动态变化

Table 5 Dynamic change in one-time soil phosphorus desorption					
样品 编号 Sample code	培养1d Culture time 1 d		培养30 d Culture time 30 d		磷素释放潜势 衰减速度The decay rate of phosphorus release potential ( mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
	磷素单次解吸量 Phosphorus desorption ( mg kg <sup>-1</sup> )	解吸率 Desorption rate ( % )	磷素单次解吸量Phosphorus desorption ( mg kg <sup>-1</sup> )	解吸率 Desorption rate ( % )	
Z2	57.62 ± 3.84	23.05	23.52 ± 3.83	9.41	1.14
Z3	166.9 ± 10.59	33.39	45.89 ± 2.60	9.18	4.03
Z4	311.2 ± 13.42	41.50	187.2 ± 9.63	24.96	4.13
Z5	428.3 ± 27.51	42.84	298.6 ± 21.99	29.86	4.32
H2	64.45 ± 4.26	28.36	33.00 ± 2.49	14.52	1.05
H3	162.8 ± 1.02	35.81	105.8 ± 5.45	23.27	1.90
H4	310.0 ± 22.05	45.47	213.6 ± 5.94	31.33	3.21
H5	468.3 ± 16.52	51.51	322.8 ± 12.77	35.51	4.85

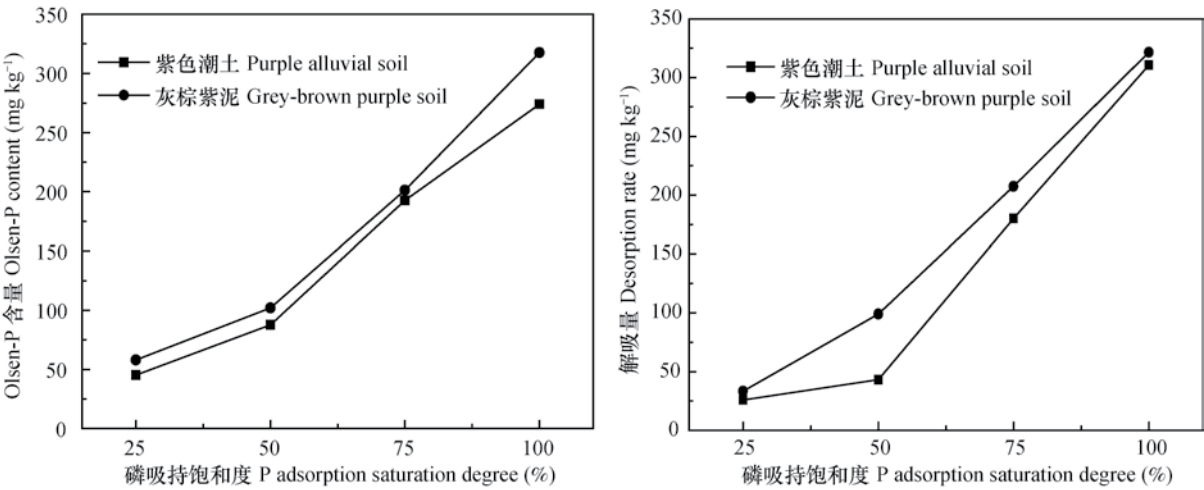


图3 土壤磷素平衡Olsen-P含量/平衡解吸量与土壤磷素吸持饱和度关系

Fig.3 Relationships of soil P adsorption saturation degree with content of Olsen-P and soil P equilibrium desorption rate



至50%  $Q_m$ 时, 土壤Olsen-P含量及磷素平衡解吸量增加幅度较低; 而当外源磷添加量 $\geq 50\%$   $Q_m$ 时, 土壤Olsen-P含量以及土壤磷素平衡解吸量均急剧增多, 在50%  $Q_m$ 处出现较明显拐点, 可见50%吸持饱和度是紫色潮土与灰棕紫泥磷素渗漏淋失风险的突变点; 当外源磷施加量 $\geq 50\%$   $Q_m$ 时, 即紫色潮土与灰棕紫泥施加量分别超过500 mg kg<sup>-1</sup>和454.6 mg kg<sup>-1</sup>时, 土壤活性将大大提高, 同时磷素渗漏淋失风险将大大提升, 严重威胁水体环境。转化平衡后, 表征土壤磷活性的Olsen-P含量与磷素解吸能力之间呈极显著线性关系, 回归方程见表6。因此, 可以通过外源磷在土壤中转化平衡后的平衡浓度, 预测其释放能力。

2.3 外源磷在土壤中的转化

2.3.1 外源磷的转化动态 未添加外源磷的对

表6 Olsen-P平衡含量 (x) 与磷素平衡解吸量 (y) 之间的回归方程

Table 6 Regression equation between equilibrium content of Olsen-P (x) and P equilibrium desorption (y)

土壤类型 Soil type	方程 Equation	决定系数 Determination coefficient	相关系数 Correlation coefficient
紫色潮土 Purple alluvial soil	$y=1.27x-50.93$	0.980	0.990**
灰棕紫泥 Grey-brown purple soil	$y=1.09x-20.32$	0.995	0.997**

注: \*\*在0.01水平 (双侧) 上显著相关 Note: \*\*show that at the 0.01 level (bilateral) were significantly correlated

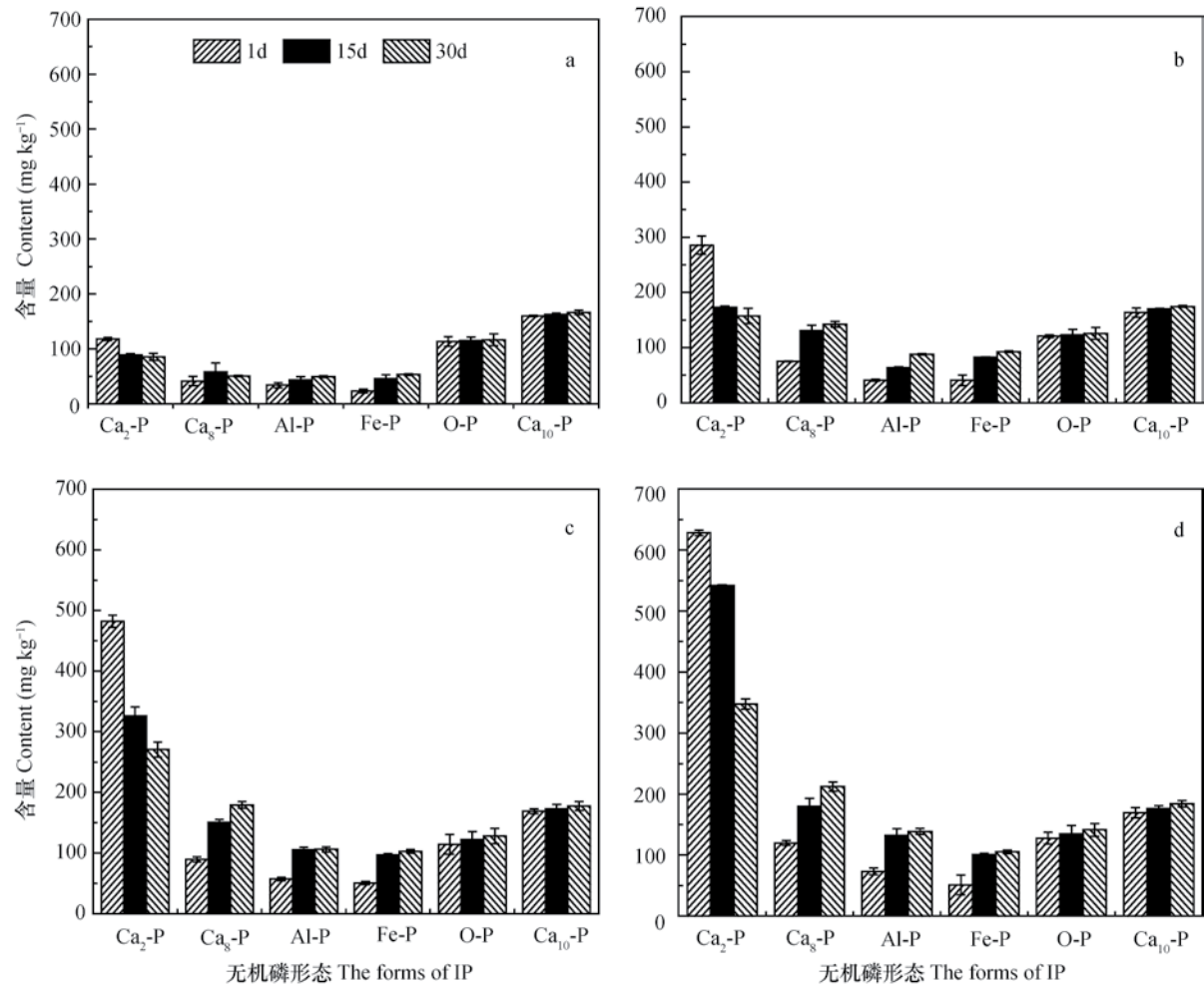


图4 紫色潮土不同磷饱和度处理 (a. 25%, b. 50%, c. 75%, d. 100%) 无机磷形态变化  
Fig. 4 Changes in form of inorganic phosphorus (IP) in purple alluvial soil relative to phosphorus saturation degree (a. 25%, b. 50%, c. 75%, d. 100%)

照土壤中,各形态无机磷含量在培养期间无明显变化,不同饱和度的外源磷处理土壤中,无机磷形态随培养时间的变化在两种土壤上具有相似性,为简明起见,以紫色潮土为例进行分析(图4)。

由图4可见,不同磷素饱和度处理的土壤中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量随培养时间的延长而逐步降低,原因主要是由于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 作为土壤中活性较高的形态,在土壤中极易向其他形态转化和分配。其余无机磷形态在转化过程中累积不断增长<sup>[28]</sup>,但增长速率却随着时间推移有所降低。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与 $\text{Al-P}$ 含量随时间推移逐渐增加,当饱和度 $\geq 50\%$ 时,二者含量急剧增多; $\text{Fe-P}$ 含量随着磷饱和度的增加逐渐增加,当磷吸持饱和度超过50%时, $\text{Fe-P}$ 含量逐渐趋于稳定,不会再随着外源磷的增多而增多,且两种土壤 $\text{Fe-P}$ 含量较为接近,可能是由于两种土壤中总铁含量有限且较为接近(见表1)。当磷饱和度较低时,外源磷可快速转变为 $\text{O-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ ,且随着培养时间的推移含量变化不明显,当饱和度 $\geq 50\%$ 时,二者含量仍有缓慢增加,且该饱和度下 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是磷的主要存在形态,其含量超过 $\text{O-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。表明外源磷施入量 $\geq 50\%$ 时,磷素在相当长的时

间内,仍然能够维持较高比例的高活性形态,这与前述50%  $Q_m$ 为土壤Olsen-P含量与磷素解吸量的突变点的结果一致。

**2.3.2 转化平衡后的形态分配** 由图5和表7可知,磷素转化稳定后, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 随着磷素饱和度的增加变化最大,占施入量的30.4%~34.8%(紫色潮土)和32.8%~40.0%(灰棕紫泥)。其次,增幅相对较大的是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ ,分别占施入量的18.6%~27.6%和21.3%~27.1%,当磷吸持饱和度 $\geq 50\%$ 时, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量出现明显拐点,可见土壤活性突增时, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 相对含量却减少。此外,两种土壤 $\text{Al-P}$ 含量随磷吸持饱和度的增加呈线性增加,紫色潮土和灰棕紫泥 $\text{Al-P}$ 增量所占比例分别为12.9%~16.3%和20.6%~17.3%。 $\text{Fe-P}$ 增量分别占施入量的9.6%~17.5%和7.6%~14.8%。 $\text{Fe-P}$ 增量所占比例不同,但当吸持饱和度 $\geq 50\%$ 时,两种土壤 $\text{Fe-P}$ 总量较为接近,主要与土壤总铁有关。 $\text{O-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量随着磷素吸持饱和度的增加变化不明显,主要是由于短期内活性较高的无机磷仅有部分转化为性质相对较为稳定的 $\text{O-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ ,因此,短时间内两者含量变化较为不明显。

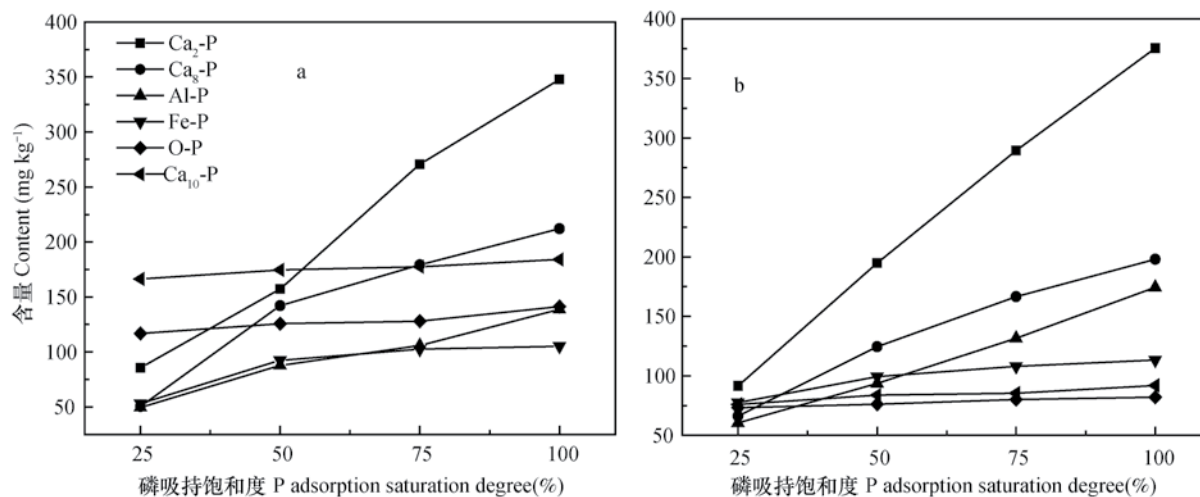


图5 转化平衡后紫色潮土(a)和灰棕紫泥(b)中各形态无机磷与磷吸持饱和度的关系

Fig. 5 Relationships of different forms of inorganic phosphorus with P adsorption saturation degree after transformation equilibrium in purple alluvial soil (a) and grey-brown purple soil (b)

$\text{Ca}_2\text{-P}$ 是土壤的高效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 和 $\text{Fe-P}$ 是土壤的缓效磷源,而 $\text{O-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 被认为是土壤中非活性磷的赋存形态<sup>[29]</sup>,不同形态磷相对含量的高低决定了土壤磷素的整体活性,灰棕紫泥中前四者之和占施入量比例明显高于紫色潮土。且随着磷饱和度的增加,活性比( $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、

$\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 四者含量之和与 $\text{O-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比值)不断增加,且灰棕紫泥活性较明显高于紫色潮土。可见,当外源磷饱和度较高情况下,土壤中磷更多地以活性较高的形态存在,相应其活性及移动性也更高,同等施加水平下,灰棕紫泥中高活性形态磷所占比例明显高于紫色潮土。



表7 各形态无机磷所占施入量比例与活性比

Table 7 Proportions of different forms of inorganic phosphorus to extraneous P applied and their ratio in availability							
样品编号 Sample code	各形态无机磷增量所占施入量比例 Proportion of different forms of inorganic phosphorus ( % )						活性比 Activity ratio
	钙二磷	钙八磷	铝磷	铁磷	闭蓄态磷	钙十磷	
	Ca <sub>2</sub> -P	Ca <sub>8</sub> -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca <sub>10</sub> -P	
Z2	30.4	18.6	16.3	17.5	7.8	6.3	0.845
Z3	29.5	27.6	15.8	16.6	5.7	4.8	1.60
Z4	34.8	23.3	12.9	12.4	4.1	3.6	2.15
Z5	33.8	20.8	13.0	9.6	4.4	3.4	2.48
H2	32.8	27.1	20.6	14.8	1.5	3.5	1.98
H3	39.1	26.4	17.7	12.2	1.4	3.5	3.20
H4	40.0	23.8	17.3	9.4	1.5	2.6	4.20
H5	39.4	21.3	17.7	7.6	1.3	2.6	4.95

注：表中活性比为（Ca<sub>2</sub>-P+Ca<sub>8</sub>-P+Al-P+Fe-P）/（O-P+Ca<sub>10</sub>-P）的比值 Note: Availability ratio was the ratio of（Ca<sub>2</sub>-P+Ca<sub>8</sub>-P+Al-P+Fe-P）/（O-P+Ca<sub>10</sub>-P）

表8 Olsen-P与各无机磷形态相关性

Table 8 Correlation between Olsen-P and forms of inorganic phosphorus						
土壤类型 Soil type	钙二磷 Ca <sub>2</sub> -P	钙八磷 Ca <sub>8</sub> -P	铝磷 Al-P	铁磷 Fe-P	闭蓄态磷 O-P	钙十磷 Ca <sub>10</sub> -P
紫色潮土 Purple alluvial soil	0.998**	0.966**	0.973**	0.896*	0.925*	0.910*
灰棕紫泥Grey-brown purple soil	0.975**	0.944*	0.979**	0.861	0.895*	0.908*

注：\*\*在0.01水平（双侧）上显著相关，\*在0.05水平（双侧）上显著相关，下同 Note: \*\* significance at the 0. 01 level (bilateral) , \* significance at the 0. 05 level (bilateral) . The same below

对比Ca<sub>2</sub>-P与Olsen-P以及磷解吸量的变化趋势以及含量发现，三者变化趋势以及含量极为接近，说明Ca<sub>2</sub>-P变化对Olsen-P和磷素释放潜势变化具有一定的驱动作用。

2.4 转化平衡后无机磷形态与Olsen-P、磷素解吸量的关系

2.4.1 Olsen-P与无机磷形态的相关性 根据紫色潮土与灰棕紫泥不同磷吸持饱和度处理的Olsen-P含量与无机磷形态含量，以Olsen-P为目标变量，采用相关分析及通径分析，探讨无机磷形态与活性的关系（表8）。

如表8所示，紫色潮土Olsen-P与无机磷各形态间均达到极显著相关水平，在灰棕紫泥中，除Fe-P外，Olsen-P均与其他形态在不同水平达到显著正相关。为了进一步研究土壤Olsen-P与无机磷

各形态之间的关系，引入通径分析。通径分析是将某一因子对于目标变量的作用，分为直接作用与间接作用，间接作用是为该因子通过其他因子对目标变量的作用，两者系数之和便是目标变量的相关系数。结果表明：紫色潮土中对Olsen-P直接正向贡献最大的是Ca<sub>2</sub>-P，直接通径系数为1.155，而Ca<sub>10</sub>-P的直接通径系数为-0.168，为负向影响。表明土壤活性主要通过Ca<sub>2</sub>-P体现，同时也验证了Ca<sub>2</sub>-P是土壤的高效磷源。

灰棕紫泥中，Al-P对土壤Olsen-P的直接正向贡献最大，直接作用通径系数为1.584，Fe-P对土壤Olsen-P为负向贡献，直接作用通径系数为-0.640。表明在灰棕紫泥中，土壤Olsen-P主要受Al-P影响。综上所述，外源磷进入土壤后，土壤活性主要通过Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P和Fe-P体

表9 土壤磷解吸量与各无机磷形态相关性

Table 9 Correlations between soil phosphorus desorption rate and forms of inorganic phosphorus

土壤类型 Soil type	钙二磷 Ca <sub>2</sub> -P	钙八磷 Ca <sub>8</sub> -P	铝磷 Al-P	铁磷 Fe-P	闭蓄态磷 O-P	钙十磷 Ca <sub>10</sub> -P
紫色潮土 Purple alluvial soil	0.955*	0.879*	0.899*	0.761	0.835	0.797
灰棕紫泥Grey- brown purple soil	0.979**	0.947*	0.975**	0.861	0.886*	0.904*

现，因此，外源磷在土壤中的形态转变直接影响土壤的活性。

2.4.2 土壤磷素释放潜势与无机磷形态的相关性

紫色潮土和灰棕紫泥磷释放量与无机磷形态之间的相关分析见表9。如表9所示，紫色潮土和灰棕紫泥磷素单次解吸量与Ca<sub>2</sub>-P显著相关，说明磷素释放潜势变化与Ca<sub>2</sub>-P含量变化具有同步性。

通过对磷素单次解吸量与无机磷形态含量的通径分析可知，紫色潮土中，对磷释放直接正向贡献最大的是Ca<sub>2</sub>-P，直接通径系数为1.499；其次，Ca<sub>8</sub>-P和O-P对磷素释放也有一定直接正向作用，直接通径系数分别为0.252和0.009，负向直接影响为Fe-P，通径系数为-0.869。表明紫色潮土在淹水环境下，磷素释放量主要受Ca<sub>2</sub>-P和Fe-P影响。灰棕紫泥中，对土壤磷素释放直接正向贡献最大的是Ca<sub>2</sub>-P，直接作用通径系数为2.667，直接负向贡献最大的是Ca<sub>8</sub>-P，直接通径系数为-1.700，表明灰棕紫泥在淹水环境中，Ca<sub>2</sub>-P活性最强，Ca<sub>8</sub>-P对磷释放的负向影响最大。而Ca<sub>2</sub>-P通过Ca<sub>8</sub>-P对磷释放的间接作用通径系数为0.940，Ca<sub>8</sub>-P通过Ca<sub>2</sub>-P对磷释放的间接作用系数为0.972，Ca<sub>8</sub>-P对于紫色潮土磷释放的间接影响更大。

综上所述，对于紫色潮土和灰棕紫泥磷素释放能力，Ca<sub>2</sub>-P均起正向直接作用，说明Ca<sub>2</sub>-P是决定土壤磷素活性与释放能力的关键形态，通过土壤磷形态的分级测定能很好地阐释外源磷在土壤中活性的演变机制。

3 结 论

本文探讨了三峡库区消落带两种典型土壤添加不同饱和度外源磷后，土壤Olsen-P含量和磷素释放潜势演变与形态转化特征。结果表明，添加0~100%吸持饱和度（0~100%Q<sub>m</sub>）的外源磷后，

表征土壤磷活性的Olsen-P含量和释放能力均呈指数型衰减，可用方程 $C_t = ae^{-kt} + b$ 进行拟合，拟合度均在94%左右；其中，Olsen-P含量和磷素释放量变化均以培养15 d内降幅最大，此后逐步趋于平缓并保持稳定。受土壤类型影响，Olsen-P在紫色潮土中衰减速率较大，相同磷饱和度处理的紫色潮土Olsen-P含量低于灰棕紫泥，灰棕紫泥磷素释放能力更高。当磷吸持饱和度≥50%时，紫色潮土和灰棕紫泥Olsen-P含量和释放量（0.01mol L<sup>-1</sup> KCl-P）出现跃迁式增加现象，50% Q<sub>m</sub>添加量是紫色潮土和灰棕紫泥活性与渗漏淋失风险的突变点；土壤Olsen-P含量与释放量呈极显著线性关系（ $y=a+bx$ ， $p<0.01$ ），可用Olsen-P平衡含量预测土壤磷素淋失风险。外源磷进入土壤后，大部分外源磷转化成Ca<sub>2</sub>-P和Ca<sub>8</sub>-P形态，其次为Fe-P、Al-P形态，O-P（闭蓄态磷）和Ca<sub>10</sub>-P变化不明显，短时间内无法大量形成。Ca<sub>2</sub>-P和Ca<sub>8</sub>-P形态含量之和分别占外源磷施加量的50%（紫色潮土）和60%（灰棕紫泥）左右，Al-P和Fe-P含量之和分别占外源磷施加量的22.6%~33.8%（紫色潮土）和25.3%~35.4%（灰棕紫泥）。回归分析与通径分析表明，紫色潮土和灰棕紫泥Olsen-P含量分别由Ca<sub>2</sub>-P和Al-P起正向直接作用，Ca<sub>10</sub>-P和Fe-P起负向直接作用。紫色潮土磷素释放潜势主要由Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P起正向直接作用，Fe-P起负向直接作用，灰棕紫泥由Ca<sub>2</sub>-P起正向直接作用，Ca<sub>8</sub>-P起负向直接作用。

参 考 文 献

[ 1 ] 夏运生，李阳红，史静，等. 滇池宝象河流域土壤磷的累积及吸附特征研究. 土壤学报，2010，47（2）：325—333  
Xia Y S, Li Y H, Shi J, et al. Accumulation and sorption characteristic of soil phosphorus in the Baoxiang

- River watershed in Dianchi Lake (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (2): 325—333
- [ 2 ] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响. *环境科学*, 2008, 29 (4): 1035—1039
- Ma L M, Zhang M, Teng Y X, et al. Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir (In Chinese). *Environmental Science*, 2008, 29 (4): 1035—1039
- [ 3 ] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 等. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究. *环境科学学报*, 2012, 32 (3): 713—720
- Zhang B, Fang F, Chen Y P, et al. Phosphorus speciation and physical-chemical characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central district of Three Gorges Reservoir area (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32 (3): 713—720
- [ 4 ] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 391—399
- [ 5 ] Giles C D, Cade-Menun B J, Liu C W, et al. The short-term transport and transformation of phosphorus species in a saturated soil following poultry manure amendment and leaching. *Geoderma*, 2015, 257/258: 134—141
- [ 6 ] Somayeh M, Mohsen J. Phosphorus leaching from a sandy soil in the presence of modified and un-modified adsorbents. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186: 6565—6576
- [ 7 ] Islas-Espinoza M, Solís-Mejía L, Esteller M V. Phosphorus release kinetics in a soil amended with biosolids and vermicompost. *Environmental Earth Science*, 2014, 71: 1441—1451
- [ 8 ] 朱强, 安然, 胡红青, 等. 三峡库区消落带土壤对磷的吸附和淹水下磷的形态变化. *土壤学报*, 2012, 49 (6): 1128—1135
- Zhu Q, An R, Hu H Q, et al. Adsorption and transformation of phosphorus in soils of the tidal zone of the Three Gorges Reservoir region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1128—1135
- [ 9 ] 杜振宇, 王清华, 周健民, 等. 磷在潮土肥力微域中的迁移和转化. *土壤学报*, 2012, 49 (4): 725—730
- Du Z Y, Wang Q H, Zhou J M, et al. Movement and transformation of phosphorus in fertilizer microsites in a fluvo-aquic soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (4): 725—730
- [ 10 ] 姬红利, 颜蓉, 李运东, 等. 施用土壤改良剂对磷素流失的影响研究. *土壤*, 2011, 43 (2): 203—209
- Ji H L, Yan R, Li Y D, et al. Effects of soil ameliorants on phosphorus loss (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (2): 203—209
- [ 11 ] 邵兴华, 张建忠, 毛勇, 等. 氧化还原条件下红壤磷吸附与解吸特性及需磷量探讨. *土壤*, 2010, 42 (2): 213—218
- Shao X H, Zhang J Z, Mao Y, et al. Study on adsorption and desorption characteristics of soils and phosphorus requirement under oxidized and reduced conditions (In Chinese). *Soils*, 2010, 42 (2): 213—218
- [ 12 ] 郑顺安, 郑向群, 张铁亮, 等. 石灰性紫色土上磷肥老化过程中土壤 Olsen-P 的变化特征及其模拟. *环境化学*, 2012, 31 (9): 1454—1455
- Zheng S A, Zheng X Q, Zhang T L, et al. Changes of soil Olsen-P and its simulation in the process of the aging of calcareous purple soil (In Chinese). *Environmental Chemistry*, 2012, 31 (9): 1454—1455
- [ 13 ] Sharpley A N, Ahuja L R, Menzel R G. The release of soil phosphorus to runoff in relation to the kinetics of desorption. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10: 386—391
- [ 14 ] Gao L, Zhang L H, Shao H B. Phosphorus bioavailability and release potential risk of the sediments in the coastal wetland: A case study of Rongcheng Swan Lake, Shandong, China. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, 42 (7): 963—972
- [ 15 ] Sun J N, Xu G, Shao H B, et al. Potential retention and release capacity of phosphorus in the newly formed wetland soils from the Yellow River Delta, China. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2012, 40 (10): 1131—1136
- [ 16 ] McDowell R W, Sharpley A N, Brookes P C, et al. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. *Soil Science*, 2001, 166: 137—149
- [ 17 ] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24: 904—910
- [ 18 ] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 105—110
- [ 19 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版

- 社, 2002
- Bao S D. Soil agriculture-chemical analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2002
- [20] 石艳. 三峡库区消落带土壤磷素形态转化及水环境渗漏淋失风险研究. 重庆: 西南大学, 2015
- Shi Y. Research on characteristics of exogenous phosphorus transformation and release risk in soils of environmental of the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir areas (In Chinese). Chongqing: Southwest University, 2015
- [21] 蒋柏藩. 磷肥在土壤中的形态转化及其有效性. 土壤学进展, 1981 (2): 1—11
- Jiang B F. Transformation and its effectiveness of P fertilizer in soil (In Chinese). Advances in Soil Science, 1981 (2): 1—11
- [22] 高兆平, 胡俊, 朱磊, 等. 三峡水库新政小流域土壤无机磷的有效性及其流失风险研究. 三峡环境与生态, 2013, 35 (z1): 7—10, 30
- Gao Z P, Hu J, Zhu L, et al. Assessment for soil inorganic phosphorus effectiveness and phosphorus loss risks in Xinzhen Water in Three Gorges Reservoir Area (In Chinese). Environment and Ecology in the Three Gorges, 2013, 35 (z1): 7—10, 30
- [23] 李大鹏, 黄勇, 范成新. 不同扰动方式对底泥/水系统中生物有效磷的影响. 安全与环境学报, 2011, 11 (2): 24—28
- Li D P, Huang Y, Fan C X. Influence of different disturbance on bio-available phosphorus in sediment / water system (In Chinese). Journal of Safety and Environment, 2011, 11 (2): 24—28
- [24] 李学平, 石孝均, 刘萍, 等. 紫色土磷素流失的环境风险评估—土壤磷的“临界值”. 土壤通报, 2011, 42 (5): 1153—1158
- Li X P, Shi X J, Liu P, et al. Environmental risk assessment about purple soil phosphorus loss-Its phosphorus “change-point” (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42 (5): 1153—1158
- [25] 梁圆, 王兴祥, 张桃林. 基于水环境风险的红壤性水稻土 Olsen-P 突变点研究. 土壤, 2008, 40 (5): 770—776
- Liang Y, Wang X X, Zhang T L. Study on olsen-P change-point in paddy soil derived from red soil based on risk of water environment (In Chinese). Soils, 2008, 40 (5): 770—776
- [26] 王振华, 朱波, 何敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附—解吸动力学特征. 农业环境科学学报, 2011, 30 (1): 154—160
- Wang Z H, Zhu B, He M, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption kinetics of sediments from purple soils (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30 (1): 154—160
- [27] McDowell R W, Sharpley A N. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. Geoderma, 2003, 112: 143—154
- [28] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响. 土壤学报, 2012, 49 (6): 1136—1146
- Qi R S, Dang T H, Yang S Q, et al. Forms of soil phosphorus and P adsorption in soils under long-term crop rotation and fertilization systems (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (6): 1136—1146
- [29] 李中阳, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征. 土壤通报, 2010, 41 (6): 1434—1439
- Li Z Y, Li J M, Xu M G, et al. Changes of Inorganic Phosphorus in typical soils of China under long-term combined application of chemical and organic fertilizer (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41 (6): 1434—1439

## Variation of Extraneous Phosphorus in Activity and Morphology in Soils Typical of the Three Gorges Reservoir Area

RAN Xiaomeng<sup>1</sup> JIANG Zhenmao<sup>1, 2, 3</sup> HE Mingjing<sup>1, 2, 3</sup> WEI Shiqiang<sup>1, 2, 3†</sup>

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

(2 Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

(3 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400716, China)

**Abstract** 【Objective】Eutrophication of the water body is the main environmental problem the operation of the Three Gorge Reservoir (TGR) has to face. Phosphorus in the water body is considered to

be the key restrictive factor of eutrophication. During the operation of TGR, the water level in the reservoir rises and falls periodically, thus causing the formation of a hydro-fluctuation zone, where the soil gets inundated and exposed to air periodically, too. The periodical alternation of exposure and inundation of the soil significantly affects the circulation and migration of phosphorus in the soil, as well as the P loading of the water body. Parts of the hydro-fluctuation zone are used for agricultural production during the low water level period, resulting in an excess accumulation of phosphorus adsorbed in the soil, which becomes a source of phosphorus loading into the overlying water during the flooding period, thus enhancing eutrophication of the water body. 【Method】 Therefore, an in-lab incubation experiment was carried out of the purple alluvial soil and grey-brown purple soil, which are widely distributed in the Three Gorges Reservoir area to explore characteristics of the variation of extraneous phosphorous in activity and morphology in the two soils as affected by saturation degree of the nutrient. 【Result】 Results show as follows: (1) Once extraneous phosphorous entered the soils, the content of Olsen-P, which characterizes soil P availability, and soil P releasing ability declined exponentially, which may be described with the equation of  $C_t = ae^{-kt} + b$ , with fitting degree being as high as about 94% for both soils, and the drop was the sharpest during the first 15 days of incubation, and then leveled off; (2) Extraneous phosphorous in different soils differed in decline of availability, equilibrium concentration and release potential. It remained quite higher in the gray-brown purple soil than in the purple alluvial soil in availability and consequently in risk of leaching loss and releasing; (3) The release potential of soil phosphorus was governed by saturation degree of phosphorus in absorption. Fifty percent of  $Q_m$  (the maximum adsorption capacity) was the turning-point of Olsen-P and phosphorus equilibrium desorption in both of the soils. When the phosphorus sorption saturation degree reached over the point, availability and leaching risk of the soil phosphorus increased rapidly; (4) A significantly positive relationship was observed between Olsen-P and phosphorus release at the  $p < 0.01$  level, and could be well fitted with a linear equation. It is, therefore, feasible to characterize the potential of soil phosphorus release with Olsen-P content; (5) Once extraneous phosphorus entered the soil, about 50% ~ 60% of it transformed into  $Ca_2$ -P and  $Ca_8$ -P, which were higher in availability, while about 30% turned into Al-P and Fe-P, and O-P (Occluded phosphorus) and  $Ca_{10}$ -P did not change much in content; and (6)  $Ca_2$ -P was the main form of IP that determined Olsen-P content and soil phosphorus desorption capacity, and the effects on the two were positive and direct. 【Conclusion】 Fifty percent of  $Q_m$  (the maximum adsorption capacity) was the turning-point of Olsen-P and phosphorus equilibrium desorption in the purple alluvial soil and grey-brown purple soil, The release ability of phosphorus can be predicted by Olsen-P content.

**Key words** The Hydro-Fluctuation Zone of the TGR; Available phosphorus; Release; Turning-point; Forms of IP

(责任编辑: 檀满枝)