

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022042701

赵宽, 万昕, 赵文瑞, 等. 低分子量有机酸对湖泊湿地湖滨带土壤磷释放的影响[J]. 环境化学, 2022, 41(12): 4145-4153.

ZHAO Kuan, WAN Xin, ZHAO Wenrui, et al. Effect of low molecular weight organic acids on soil phosphorus release of inner lakeside belt in lake wetlands[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (12): 4145-4153.

低分子量有机酸对湖泊湿地湖滨带土壤磷释放的影响*

赵宽** 万昕 赵文瑞 胡睿鑫 汪瑜 周葆华

(安庆师范大学资源环境学院, 皖江流域水环境保护与污染控制安徽省教育厅重点实验室, 安庆, 246133)

摘要 本文采集安庆沿江菜子湖、破罡湖、武昌湖湖滨带的表层土壤, 测定了不同浓度酒石酸和苹果酸影响下的3个湖泊土壤磷释放量. 结果表明, 酒石酸和苹果酸都能对湖滨带土壤磷提取率, 产生随有机酸浓度变化的Hormesis效应, 苹果酸对磷的提取能力比酒石酸强. 酒石酸和苹果酸对破罡湖湖滨带土壤磷最大提取率(Y_{\max})分别为1817.57%和2166.63%, 显著高于菜子湖和武昌湖. 两种有机酸对破罡湖湖滨带土壤磷的应对胁迫潜能(R)也分别高于菜子湖和武昌湖. 研究结果可为利用低分子量有机酸改善土壤中磷素养分提供理论依据, 同时为磷素流失的环境风险控制提供技术支持.

关键词 Hormesis效应, 低分子量有机酸, 有效磷, 湖泊湿地.

Effect of low molecular weight organic acids on soil phosphorus release of inner lakeside belt in lake wetlands

ZHAO Kuan** WAN Xin ZHAO Wenrui HU Ruixin WANG Yu ZHOU Baohua

(School of Resource and Environment, Key Laboratory of Aqueous Environment Protection and Pollution Control of Yangtze River in Anhui of Anhui Provincial Education Department, Anqing Normal University, Anqing, 246133, China)

Abstract In this study, the surface soils of inner lakeside belt in Caizi Lake, Pogang Lake and Wuchang Lake along Yangtze River of Anqing were collected, and the soil phosphorus release contents for three lakes affected by different concentrations of tartaric acid and malic acid were measured. The results showed that both tartaric acid and malic acid induced concentration-dependent hormesis effects on the extraction ratio of soil phosphorus in inner lakeside belt, and the malic acid had a stronger capacity of extract phosphorus than tartaric acid. The maximum extraction rate (Y_{\max}) of soil phosphorus in inner lakeside belt of Pogang lake by tartaric acid and malic acid were 1817.57% and 2166.63%, respectively, which were significantly higher than those in Caizi Lake and Wuchang Lake. The potential for response stress (R) of the two organic acids to soil phosphorus in Pogang lake were higher than that in Caizi Lake and Wuchang Lake. The results can provide a theoretical basis for the use of low molecular weight organic acids to improve soil phosphorus nutrients, and provide technical support for the control of environmental risk of phosphorus loss.

Keywords Hormesis effect, low molecular weight organic acids, available phosphorus, lake wetland.

2022年4月27日收稿(Received: April 27, 2022).

* 安徽省自然科学基金(1908085QD149), 安徽省科技重大专项项目(17030701057)和安徽省高校优秀人才支持计划项目(gxyq2021193)资助.

Supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province (1908085QD149), the Key Science and Technology Program of Anhui Province (17030701057), and the Excellent Talents Support Program of Anhui Universities (gxyq2021193).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: zhaokuan@aqnu.edu.cn

磷是植物生长发育所必需的大量元素之一,土壤中的磷形态直接影响植物磷吸收的水平^[1-2].土壤中能被植物直接吸收利用的磷素形式是无机磷,大部分磷容易以铁磷、钙磷等难溶态磷滞留在土壤中,这主要受土壤类型、质地和理化特征等因素影响^[3].我国土壤普遍存在磷素缺乏的现象,施用的磷肥只有 10%—25% 能被植物吸收,大部分磷肥在土壤中累积,容易造成磷资源浪费,或者随着地表径流和水土流失造成水体富营养化现象^[4].因此,如何提升难溶态磷转化为有效磷是减少磷肥施用量、提升磷素利用率的重要途径.

低分子量有机酸活化土壤磷,提高植物吸收无机磷含量,是植物应对低磷逆境的重要机制^[5-8].低分子量有机酸是土壤-植物-根际生态系统最活跃的碳形态,低浓度低分子量有机酸能促进土壤有效磷释放,其 Hormesis 效应-剂量关系已经受到了广泛的关注. Hormesis 效应是指机体受外源化学物质胁迫产生的胁迫效应,表现为低浓度时产生刺激兴奋效应,而高浓度时表现为抑制作用的现象^[9].在土壤生态系统中, Hormesis 效应-剂量关系主要关注重金属、有机污染物(如多环芳烃、多氯联苯等)、农药及抗生素等外源有毒物质对植物生长发育、土壤微生物活性、土壤酶活性等因素的影响^[10-12].

一定浓度范围内的低分子量有机酸对土壤磷的释放表现为剂量-效应关系,低分子量有机酸种类、浓度、浸提时间和浸提次数对土壤磷含量的释放有重要影响^[13-15].陆文龙等^[16]研究表明柠檬酸、苹果酸、酒石酸、草酸等对土壤中磷的活化与提取时间、提取浓度和土壤有效磷含量显著呈显著正相关.庄正等^[17]研究表明当浓度在 0—8 mmol·L⁻¹ 时,草酸、柠檬酸、苹果酸和丙二酸对土壤磷的释放量都随着有机酸浓度的提高而增加.介晓磊等^[18]研究表明当草酸、柠檬酸、苹果酸和酒石酸在 0—5 mmol·L⁻¹ 时,随着有机酸浓度的提高,石灰性土壤磷素释放量越大,增强的幅度为草酸 > 柠檬酸 > 酒石酸 > 苹果酸.总体来说,土壤 pH 和其它理化性质的改变、试验方法和培养时间的不同和低分子量有机酸种类和浓度都会显著影响土壤磷的释放^[19].宋金凤等^[20]以不同浓度的草酸和柠檬酸模拟凋落物对森林土壤磷释放的影响,结果表明有机酸的浸提时间、浸提次数对磷的持续释放及其动力学特征有显著影响,两种有机酸的最佳浸提时间为 12 h, 2.0 mmol·L⁻¹ 柠檬酸处理下磷释放的累加效应大于草酸. Zhao 等^[21]研究表明 0—10 mmol·L⁻¹ 浓度的草酸和柠檬酸能显著提高构树和桑树根际土壤的磷释放量,其土壤磷释放量与有机酸浓度之间表现为线性关系. Ström 等^[22]研究表明在 pH<3.5 的酸性土壤和 pH=7.5 的碱性土壤中, 0—100 mmol·L⁻¹ 浓度的草酸、柠檬酸和苹果酸都能增加土壤磷的释放量,但在高 pH 作用下有机酸对磷的提取作用更有效.因此,有机酸与其提取的有效磷之间的剂量-效应关系的变化及其原因等值得重点关注的问题.

湖滨带是水陆系统的交错带,该区域生产力和生物多样性较高,在湖泊生态系统中发挥着重要的生态功能,对污染物的滞留和水体净化、生物群落多样性的维护等具有重要影响^[23-25].因此,本文在安庆沿江区域的菜子湖、破罡湖、武昌湖湿地湖滨带采集了表层土壤,选择了两种土壤中常见的低分子量有机酸:苹果酸和酒石酸,研究添加不同浓度的苹果酸和酒石酸对 3 个湖泊湿地湖滨带土壤有效磷释放的影响,分析两种有机酸影响下土壤磷的剂量-效应关系曲线,探讨苹果酸和酒石酸对不同湖泊湿地有效磷释放的差异性,为低分子量有机酸改善土壤中磷素养分提供技术支撑,同时为磷素流失的环境风险防控和富磷水体的富营养化治理提供理论依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 供试土壤的采集与处理

采集安庆菜子湖(CZH)、破罡湖(PGH)和武昌湖(WCH)典型湖滨带表层土壤(0—20 cm)样品,每个湖泊选取湖滨带典型植物区域进行采样,同时考虑污染源排放口、水文地质等因素,每个湖泊确定 3 个土壤采样区(表 1),每个采样区设置 5 个采样点(5 m×5 m),将 5 个采样点土壤均匀混合后作为 1 个采样区的混合土样,将风干过筛后的 3 个采样区的土壤混合作为一个湖泊湖滨带的土壤,去除土壤中的石块、残留植物根系等杂质,按四分法取样后,自然风干,研磨过 100 目土壤筛后密封装入塑料袋备用.土壤 pH、有机质含量、阳离子交换量、总磷、有效磷含量等土壤基本理化特征根据鲍士旦的方法进行分析^[26].每组试验重复 3 次,分析计算采用 3 次试验数据的平均值.

表 1 各湖泊湖滨带基本特征及采样点位置

Table 1 Basic characteristics and the location of sampling points in inner lakeside belt of three lakes

湖泊名称 Lake name	湖滨带优势物种 Dominant species of lakeside belt	湖泊面积/km ² Lake area	采样区位置 Sampling area location
CZH	细叶薹草、长刺酸模、芦苇	146.3	E117°5'6.08", N30°45'19.84"
			E117°4'43.25", N30°42'42.64"
			E117°6'52.56", N30°43'1.23"
PGH	芦苇、光头稗、一年蓬	22.7	E117°8'6.88", N30°39'29.98"
			E117°8'58.32", N30°39'16.16"
			E117°9'55.10", N30°36'38.80"
WCH	野菰、莲子草、秋角菱	107.5	E116°41'45.72", N30°14'51.66"
			E116°45'7.52", N30°17'21.54"
			E116°46'10.39", N30°17'40.00"

1.2 供试有机酸

供试低分子量有机酸是苹果酸、酒石酸,均购自国药试剂公司,纯度均为分析纯(99%)以上,具体信息见表 2。

表 2 供试低分子量有机酸的基本性质

Table 2 Basic properties of low molecular weight organic acids

有机酸类型 Organic acid type	英文名称 English name	化学式 Chemical formula	解离常数 Dissociation constant	CAS号 CAS Number
苹果酸	Malic acid	HOOC-CH(OH)-CH ₂ -COOH	$K_1=4.0 \times 10^{-4}$ $K_2=8.9 \times 10^{-6}$	133-37-9
酒石酸	Tartaric acid	HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH	$K_1=9.1 \times 10^{-4}$ $K_2=4.3 \times 10^{-5}$	617-48-1

1.3 方案设计

外源胁迫物浓度梯度的设置是影响 Hormesis 效应的关键因素,合适的浓度梯度范围有利于捕捉 Hormesis 效应,若设置过多的低/高浓度梯度,会增加实验工作量,并且许多效应点不起任何作用^[10, 27-28]。本研究参照前人关于植物根系分泌低分子量有机酸浓度特征^[29-31],按照低剂量区间加密设置,高剂量区间减少剂量设置的原则,确定 0、1、1.5、2、5、8、10、20 mmol·L⁻¹ 等 8 个浓度梯度。

1.4 低分子量有机酸提取土壤磷含量的测定

分别称取 3.0 g 风干过筛后的土壤样品置于 8 个 50 mL 的锥形瓶中,按 10:1 的水土比,分别加入 30 mL 的 0、1、1.5、2、5、8、10、20 mmol·L⁻¹ 等 8 个浓度梯度的低分子量有机酸溶液,同时加入 3—5 滴 0.01 g·L⁻¹ 百里酚微生物抑制剂防止土壤微生物对有机酸的消耗作用,振荡 30 min 后,离心,取上清液保存,利用磷钼蓝比色-可见光分光光度法在波长 700 nm 下测定出上清液中的有效磷浓度。所有实验设 3 个重复。

1.5 低分子量有机酸对土壤磷的提取率

分别用不同浓度梯度低分子有机酸提取出土壤磷含量(X_i)减去低分子有机酸浓度为 0 mmol·L⁻¹ 提取出土壤磷含量(对照组, X_0),计算出各浓度梯度的低分子有机酸对磷的提取率 Y ,如下式(1):

$$Y = (X_i - X_0) / X_0 \times 100\% \quad (1)$$

1.6 低分子量有机酸对土壤磷提取率 Hormesis 效应的拟合模型

根据有机酸浓度梯度(N)和各浓度梯度有机酸对磷的提取率 Y ,利用如下式(2)进行拟合:

$$Y = aN^2 + bN + c \quad (2)$$

根据式(2)计算 $Y=0$ 时两个有机酸浓度 D_1 (诱导产生 Hormesis 效应的起始浓度)、 D_2 (诱导产生 Hormesis 效应的结束浓度),因此可求出诱导效应的浓度比值 $Q_i = D_2/D_1$,浓度差值 $\Delta D = D_2 - D_1$,同时可计算出刺激效应区域面积(阴影部分),定义为 R 。

1.7 确定磷提取率最大值时有机酸浓度、磷提取量最大值

对式(2)进行一阶求导, 可得下式(3):

$$Y' = 2aN + b \quad (3)$$

式(3)中, 当 $Y'=0$ 时, 得到磷提取率最大值时有机酸浓度中间值 $N_{Me}=-b/2a$, 从而得出磷提取率最大值 Y_{max} , 以及相对应的磷提取量最大值 X_{max} .

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 土壤基本理化性质

3个湖泊湖滨带土壤基本理化性质见表3。由表3可知, CZH和WCH湖滨带土壤呈弱酸性, PGH湖滨带土壤呈中性; PGH湖滨带土壤有机质含量显著低于CZH和WCH; 3个湖泊之中PGH总磷含量最低, 但其有效磷含量显著高于CZH和WCH。

表3 各湖泊湖滨带土壤基本理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties in inner lakeside belt of three lakes

湖泊 Lake	pH	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	总磷/(mg·kg ⁻¹) Total phosphorus	有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus
CZH	4.97±0.16	29.36±1.91	12.9 ^a ±1.22	446 ^a ±21.66	1.20 ^a ±0.12
PGH	7.04 ^c ±0.11	22.15 ^b ±2.54	10.8 ^a ±0.64	298 ^b ±10.42	5.47 ^b ±0.63
WCH	5.85 ^b ±0.27	31.94 ^a ±1.28	11.7 ^a ±0.69	547 ^a ±20.11	2.10 ^c ±0.37

注: 数据以平均值(M)±标准误差(SE)表示, 平均值后面的小写字母表示同一指标在3个湖泊之间的差异性($P<0.05$)。

Note: The data was shown by mean (M) ± standard error (SE), and the different lowercase letters indicated the difference of the same index in the three lakes ($P<0.05$).

2.2 两种有机酸对不同湖泊湖滨带湿地土壤磷释放量的影响

添加不同浓度酒石酸对CZH、PGH和WCH湖滨带土壤磷提取量及其提取率的影响如图1所示。

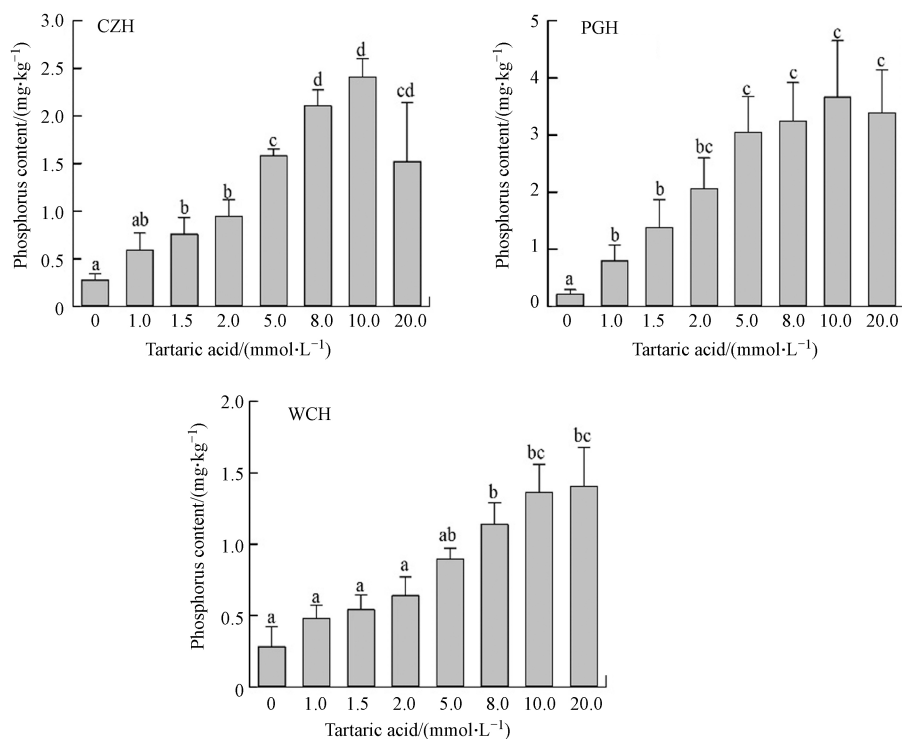


图1 不同酒石酸浓度对各湖泊湖滨带土壤磷释放量影响

注: 不同小写字母表示同一个湖泊中不同酒石酸浓度影响下的磷含量差异显著($P<0.05$), 下同。

Fig.1 Influence of different concentrations of tartaric acid on phosphorus release in inner lakeside belt of three lakes

Note: The different lowercase letters indicate the difference of phosphorus content under the different tartaric acid concentration in the same lake ($P<0.05$), the following figures are the same.

由图 1 可知, 随着酒石酸浓度升高, 3 个湖泊湖滨带土壤磷含量升高, 其中 CZH 和 PGH 磷提取量在 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 酒石酸浓度时达到最高. 在 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 酒石酸浓度时磷提取量受到抑制, 相对于 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的磷含量, CZH 和 PGH 磷提取量时磷含量分别降低 36.84% 和 7.43%; WCH 磷提取量则随着酒石酸浓度的升高而增加, 在 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 酒石酸浓度时磷提取量最大.

苹果酸对 3 个湖泊湖滨带土壤磷提取量影响见图 2 所示. 由此可知, 当苹果酸分别为 10、20、10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CZH、PGH 和 WCH 土壤磷提取量最大, 其中 CZH 湖滨带土壤磷提取量在苹果酸浓度为 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时显著高于苹果酸浓度为 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷提取量, 而 PGH、WCH 湖滨带土壤磷提取量在苹果酸浓度 $>5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时无显著差异.

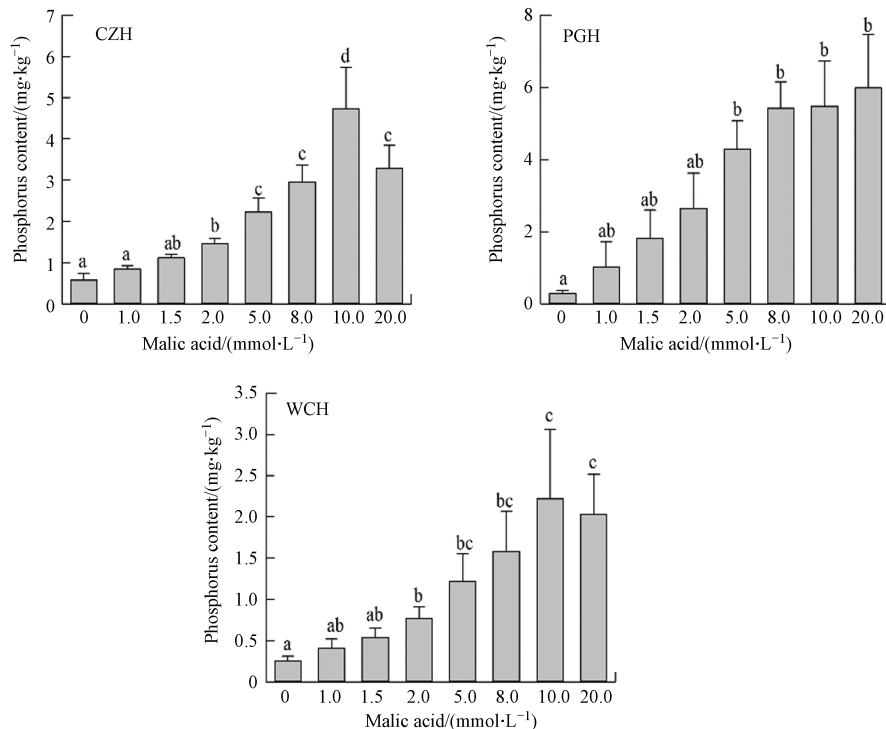


图 2 不同苹果酸浓度对各湖泊湖滨带土壤磷释放量影响

Fig.2 Influence of different concentrations of malic acid on phosphorus release in inner lakeside belt of three lakes

低分子量有机酸浓度可以降低土壤磷的固定, 增加土壤磷的生物有效性, 本文研究表明土壤磷的提取随着有机酸浓度的升高, 呈现有规律的变化趋势, 这与前人的研究一致^[32-34]. 低分子量有机酸对磷含量提取和活化具有一定的促进作用, 随着低分子量有机酸浓度的升高, 磷提取量增加, 有机酸的种类和浓度范围、提取时间、土壤类型等影响土壤磷的提取量^[35-37]. 有机酸本身的解离过程对土壤磷的提取量有较大影响, 一方面, 有机酸根离子可以有效活化土壤中的钙磷、铝磷和铁磷等难溶性磷化合物, 但这与有机酸根离子的结构有较大关系; 另一方面, 有机酸释放出的 H^+ 对土壤磷的活化贡献占 25%—40%^[38]. 本研究中, 同一浓度下的两种有机酸对 3 个湖泊湖滨带土壤磷的提取量差异较大, 苹果酸对 3 个湖泊湖滨带土壤磷的释放量显著高于酒石酸, 苹果酸对 CZH 和 PGH 湖滨带土壤磷的提取量比酒石酸平均高出 70.19% 和 46.45%, 这可能是由于苹果酸和酒石酸都属于二元有机弱酸, 其解离常数差异较小. 由于同一浓度下, 两种有机酸解离常数两种有机酸释放出的 H^+ 贡献度类似, 然而苹果酸根离子比酒石酸根离子少 1 个羟基基团, 因此与土壤中难溶性磷化合物形成络合物的空间位阻效应要小的多, 因此苹果酸对磷的提取能力比酒石酸强.

2.3 不同拟合方程模拟两种低分子量有机酸对磷的提取率

利用线性方程、一元二次多项式方程、幂指数方程和双曲线方程等曲线方程拟合有机酸对磷提取率的影响结果如表 4 所示. 由表 4 可知, 线性方程的拟合效果相对较差, 酒石酸对 CZH 和 PGH 土壤磷提取率无显著性差异, 苹果酸对 CZH 土壤磷提取率无显著性差异 ($P < 0.05$); 幂指数方程拟合酒石酸对 CZH 土壤磷提取率的影响无显著性差异, 对其它土壤磷提取率的拟合效果较好 ($P < 0.05$); 一元二次多

项式方程和双曲线方程都能拟合两种有机酸对 3 个湖泊湖滨带土壤磷提取率的影响 ($P < 0.05$), 其中一元二次多项式方程的拟合效果最佳, 在同等条件下其拟合曲线的相关系数大于双曲线方程拟合曲线的相关系数, 即该一元二次多项式方程即可表示低分子量有机酸对土壤磷提取的 Hormesis 效应. 前人众多研究表明有机酸对土壤磷提取可以用线性方程、对数方程、指数方程、Langmiur 方程等多种方程进行拟合, 这些拟合过程较多关注有机酸浸提时间、有机酸浸提次数对土壤磷释放动力学的影响, 这了解有机酸提取土壤磷的释放具有重要意义^[16-17,20,39]. 本研究中, 主要了解有机酸浸提浓度对土壤磷提取率的影响, 从最优拟合方程的各项参数全面了解有机酸对磷提取释放的意义, 这是之前的研究未关注的.

表 4 不同拟合方程模拟酒石酸和苹果酸对磷提取率

Table 4 The different fitting equations simulated the extraction rates of phosphorus by tartaric acid and malic acid

有机酸 Organic acid	湖泊名称 Lake name	线性方程 Linear equation $Y = aX + b$	多项式方程 Polynomial equation $Y = aX^2 + bX + c$	幂指数方程 Exponential equation $Y = aX^b$	双曲线方程 Hyperbolic equation $Y = \frac{aX}{b+X}$
酒石酸	CZH	$r=0.5606$	$r=0.9974$	$r=0.7362$	$r=0.8450$
		$P=0.1905$	$P=0.0001$	$P=0.0592$	$P=0.0160$
	PGH	$r=0.7410$	$r=0.9628$	$r=0.8812$	$r=0.9589$
		$P=0.0562$	$P=0.0053$	$P=0.0088$	$P=0.0006$
	WCH	$r=0.8960$	$r=0.9957$	$r=0.9578$	$r=0.9852$
		$P=0.0063$	$P < 0.0001$	$P=0.0007$	$P < 0.0001$
苹果酸	CZH	$r=0.7192$	$r=0.9478$	$r=0.8083$	$r=0.8664$
		$P=0.0685$	$P=0.0103$	$P=0.0278$	$P=0.0116$
	PGH	$r=0.8418$	$r=0.9845$	$r=0.9353$	$r=0.9837$
		$P=0.0175$	$P=0.0010$	$P=0.0020$	$P < 0.0001$
	WCH	$r=0.8516$	$r=0.9833$	$r=0.9152$	$r=0.9533$
		$P=0.0150$	$P=0.0011$	$P=0.0038$	$P=0.0009$

注: X 表示有机酸浓度($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), Y 表示有机酸对土壤磷的提取率(%), r 表示拟合曲线的相关系数, P 表示显著性意义.

Note: X is the concentration of organic acids ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), Y is the extraction rates of phosphorus by organic acids (%). r is the correlation coefficient of the fitting equation, P is the significant difference.

2.4 基于一元二次多项式方程拟合低分子量有机酸对土壤磷提取率的影响

图 3 反映了利用一元二次多项式方程拟合不同酒石酸和苹果酸浓度对 3 个湖泊湖滨带土壤磷提取率的影响, 酒石酸对 CZH、PGH 和 WCH 湖滨带土壤磷提取率拟合方程的相关系数分别为 0.9974 ($P=0.0001$)、0.9628 ($P=0.0053$) 和 0.9957 ($P < 0.0001$); 苹果酸对 CZH、PGH 和 WCH 湖滨带土壤磷提取率拟合方程的相关系数分别为 0.9478 ($P=0.0103$)、0.9845 ($P=0.0010$) 和 0.9833 ($P=0.0011$), 由此可知该方程拟合效果较好.

2.5 不同有机酸提取湖滨带土壤磷 Hormesis 效应方程的模拟参数

由表 5 可知, 不同有机酸提取各湖泊湖滨带土壤磷的 Hormesis 效应参数不同. 酒石酸提取下 3 个湖泊 D_1 均为负值, 两种有机酸提取下 CZH 的 ΔD 最低, 这说明土壤磷背景具有较大的影响. 3 个湖泊湖滨带土壤磷提取的两种有机酸的 N_{Me} 在 12.21—16.25 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 其对应的土壤磷提取含量最大值 X_{max} 在 1.47—6.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 酒石酸和苹果酸对 PGH 湖滨带土壤磷提取率最大, 分别为 1817.57% 和 2166.63%, 对 WCH 湖滨带土壤磷提取率最小, 分别为 422.91% 和 787.07%, 这与应对胁迫潜能 R 值变化规律一致, 这可能与该地区土地有效磷含量较高及物种多样性有关. 3 个湖泊湖滨带优势物种都是一年生的草本植物, 但其生物量有较大差异, 其中芦苇和野菰的生物量较大, 而其它植物生物量较小, 这会影响植物根系吸收土壤磷的差异性, 从而导致土壤磷释放量不同^[25,40-41].

土壤磷含量和形态也会对有机酸提取土壤磷的 Hormesis 效应产生影响, 这与土壤有机质含量和土壤磷素形态相关, 有机质含量和土壤有效磷含量越高, 越有利于有机酸对土壤磷的释放^[42]; 同时低分子量有机酸提取土壤磷形态受土壤类型影响较大, 酸性土壤中有机酸活化磷的作用大于石灰性土壤^[38], 这些都会对有机酸提取土壤磷 Hormesis 效应参数产生重要影响. 本研究中, PGH 总磷含量和有机质含量较低, 但其有效磷含量显著高于 CZH 和 WCH, 这可能会是 PGH 湖滨带土壤磷最大提取率 (Y_{max}) 和应对胁迫潜能 (R) 最高的原因.

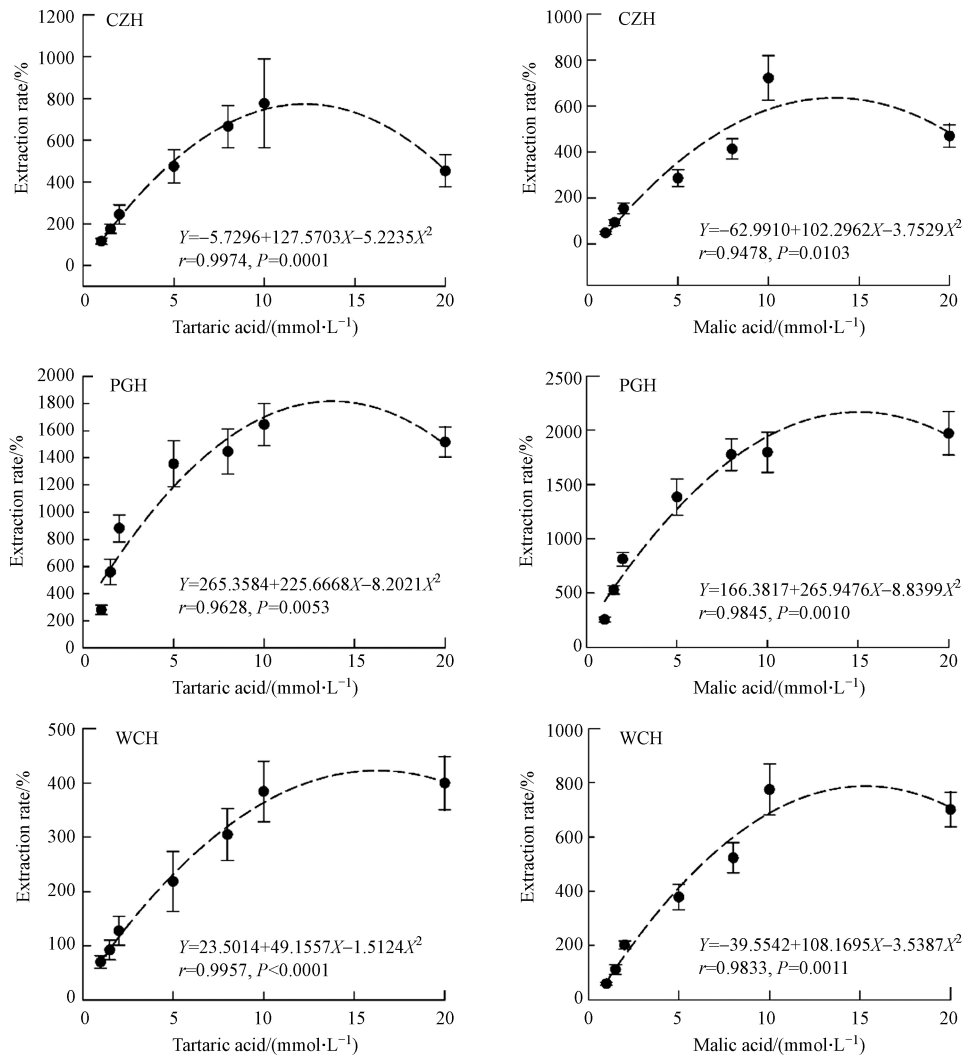


图3 不同浓度的酒石酸和苹果酸对各湖泊湖滨带土壤磷提取率影响

Fig.3 Influence of different concentrations of tartaric acid and malic acid on phosphorus extraction in inner lakeside belt of three lakes

表5 不同有机酸提取各湖滨带土壤磷 Hormesis 效应参数

Table 5 Hormetic parameters of soil phosphorus induced by different organic acids in inner lakeside belt of three lakes

有机酸 Organic acid	湖泊名称 Lake name	D ₁	D ₂	N _{Me}	Y _{max}	X _{max}	Q _i	ΔD	R
酒石酸	CZH	-0.04	24.47	12.21	784.62	2.43	-545.77	24.51	13551.25
	PGH	-1.13	28.64	13.76	1817.57	4.02	-25.36	29.77	93383.91
	WCH	-0.47	32.97	16.25	422.91	1.47	-69.97	33.44	10561.63
苹果酸	CZH	0.63	26.63	13.63	634.10	4.23	42.24	26.00	4377.96
	PGH	-0.61	30.70	15.04	2166.63	6.55	-50.07	31.31	88529.41
	WCH	0.37	30.20	15.28	787.07	2.25	81.58	29.83	11313.27

3 结论(Conclusion)

(1) 土壤磷的提取随着有机酸浓度的升高呈现一定规律的变化规律.这种变化规律可通过基于 Hormesis 效应-剂量曲线的一元二次多项式方程进行拟合,其拟合效果较好,该方程的各项参数对了解有机酸对土壤磷提取有重要意义.

(2) 苹果酸对湖滨带湿地土壤磷的释放能力比酒石酸强,两种有机酸对 PGH 湖滨带土壤磷提取量

显著高于 CZH 和 WCH.因此,在推广应用有机酸调控土壤磷生物有效性方面,可优先选择苹果酸作为二元有机弱酸的代表性物质.

(3)土壤有机质含量、土壤磷素形态和土壤类型对低分子量有机酸提取土壤磷的 Hormesis 效应有重要影响,PGH 湖滨带土壤磷最大提取率和应对胁迫潜能最高.

参考文献 (References)

- [1] GILBERT N. Environment: the disappearing nutrient [J]. *Nature*, 2009, 461(7265): 716-718.
- [2] LAMBERS H. Phosphorus acquisition and utilization in plants [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2022, 73: 17-42.
- [3] 魏丹, 杨华薇, 陈延华, 等. 有机酸对土壤磷的活化利用研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(7): 1391-1399.
WEI D, YANG H W, CHEN Y H, et al. Research on the activation and regulation of soil phosphorus by organic acids [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1391-1399.
- [4] 王永壮, 陈欣, 史奕, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2189-2198.
WANG Y Z, CHEN X, SHI Y, et al. Review on the effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus activation and mechanisms [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 2189-2198 (in Chinese).
- [5] HAN Y, WHITE P J, CHENG L Y. Mechanisms for improving phosphorus utilization efficiency in plants [J]. *Annals of Botany*, 2021, 129(3): 247-258.
- [6] RYAN P R, DELHAIZE E, JONES D L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2001, 52: 527-560.
- [7] CHEN Y T, WANG Y, YEH K C. Role of root exudates in metal acquisition and tolerance [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, 39: 66-72.
- [8] JONES D L. Organic acids in the rhizosphere—a critical review [J]. *Plant and Soil*, 1998, 205(1): 25-44.
- [9] CALABRESE E J, BALDWIN L A. Toxicology rethinks its central belief [J]. *Nature*, 2003, 421(6924): 691-692.
- [10] 卢明星, 徐传红, 朱咏莉, 等. Cd 诱导土壤 ALP 的 Hormesis 效应: 土地利用变化的驱动机制 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(2): 173-180.
LU M X, XU C H, ZHU Y L, et al. Hormetic effect of Cd on soil alkaline phosphatase: Driving mechanism of land use change [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(2): 173-180 (in Chinese).
- [11] WANG S Y, HUANG B, FAN D W, et al. Hormetic responses of soil microbiota to exogenous Cd: A step toward linking community-level hormesis to ecological risk assessment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125760.
- [12] ZHU Y L, LIU C L, YOU Y, et al. Magnitude of the mixture hormetic response of soil alkaline phosphatase can be predicted based on single conditions of Cd and Pb [J]. *Ecotoxicology*, 2019, 28(7): 790-800.
- [13] KPOMBLEKOU-A K, TABATABAI M A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 100(2/3): 275-284.
- [14] HOU E Q, TANG S B, CHEN C R, et al. Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties [J]. *Geoderma*, 2018, 313: 172-180.
- [15] 孔涛, 伏虹旭, 吕刚, 等. 低分子量有机酸对滨海盐碱土壤磷的活化作用 [J]. *环境化学*, 2016, 35(7): 1526-1531.
KONG T, FU H X, LYU G, et al. Enhanced release of phosphorus from coastal saline alkaline soil induced by low molecular weight organic acids [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(7): 1526-1531 (in Chinese).
- [16] 陆文龙, 王敬国, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响 [J]. *土壤学报*, 1998, 35(4): 493-500.
LU W L, WANG J G, CAO Y P, et al. Kinetics of phosphorus release from soils, as affected by organic acids with low-molecular-weight [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 493-500 (in Chinese).
- [17] 庄正, 李艳娟, 刘青青, 等. 模拟杉木凋落物源有机酸对南方红壤磷的持续释放效应 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2017, 46(5): 569-575.
ZHUANG Z, LI Y J, LIU Q Q, et al. Sustained release of phosphorus by organic acid extraction from litter-derived red soil from Chinese fir plantation in Southern China [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2017, 46(5): 569-575 (in Chinese).
- [18] 介晓磊, 李有田, 庞荣丽, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤磷素形态转化及有效性的影响 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(6): 856-860.
JIE X L, LI Y T, PANG R L, et al. Effect of low molecular weight organic acids on transformation and availability of phosphates in calcareous soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 856-860 (in Chinese).
- [19] 张乃于, 闫双堆, 李娟, 等. 低分子量有机酸对土壤磷组分影响的 Meta 分析 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(12): 2076-2083.
ZHANG N Y, YAN S D, LI J, et al. Meta-analysis on the effects of low molecular weight organic acids on increasing availability of soil phosphorus [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12): 2076-2083 (in Chinese).
- [20] 宋金凤, 刘星平, 孙金兵, 等. 有机酸对暗棕壤磷的持续释放效应及其动力学特征 [J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(10): 1-8.
SONG J F, LIU X P, SUN J B, et al. Sustained release and the kinetics of phosphorus from dark brown forest soils by organic acids [J].

- Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(10): 1-8(in Chinese).
- [21] ZHAO K, WU Y Y. Rhizosphere calcareous soil P-extraction at the expense of organic carbon from root-exuded organic acids induced by phosphorus deficiency in several plant species [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(5): 640-650.
- [22] STRÖM L, OWEN A G, GODBOLD D L, et al. Organic acid behaviour in a calcareous soil implications for rhizosphere nutrient cycling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11): 2046-2054.
- [23] 王洪铸. 湖滨带的基本概念(代前言)[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(S2): 1-2.
WANG H Z. Basic concepts of lakeshore zones(preface)[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(Sup 2): 1-2(in Chinese).
- [24] 柴培宏, 代嫣然, 梁威, 等. 湖滨带生态修复研究进展 [J]. *中国工程科学*, 2010, 12(6): 32-35.
CHAI P H, DAI Y R, LIANG W, et al. Advances of ecological restoration of lakeside zone [J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(6): 32-35(in Chinese).
- [25] 赵宽, 万昕, 郭展翅, 等. 安庆湿地湖滨带土壤重金属含量特征及潜在生态风险评价 [J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(4): 67-75.
ZHAO K, WAN X, GUO Z C, et al. Characterization of heavy metals and assessment of potential ecological risk in shoreline buffer zone soils of Anqing Lake wetland [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(4): 67-75(in Chinese).
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000(in Chinese).
- [27] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(1): 105-109.
CAO H, SUN H, YANG H, et al. A review-soil enzyme activity and its indication for soil quality [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(1): 105-109(in Chinese).
- [28] 江桂斌, 郑明辉, 孙红文. 环境化学前沿-第二辑[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
JIANG G B, ZHENG M H, SUN H W. *Frontiers of Environmental Chemistry(Volume II)* [M]. Beijing: Science Press, 2019(in Chinese).
- [29] JONES D L, DENNIS P G, OWEN A G, et al. Organic acid behavior in soils—misconceptions and knowledge gaps [J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1/2): 31-41.
- [30] BAETZ U, MARTINOIA E. Root exudates: The hidden part of plant defense [J]. *Trends in Plant Science*, 2014, 19(2): 90-98.
- [31] NEUMANN G, RÖMHELD V. The release of root exudates as affected by the plant physiological status// PINTON R, VARANINI Z, NANNIPIERI Z. *The rhizosphere: biochemistry and organic substances at the soil-plant interface*[M]. New York, USA: Marcel Dekker Inc., 2000.
- [32] HE X J, AUGUSTO L, GOLL D S, et al. Global patterns and drivers of soil total phosphorus concentration [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(12): 5831-5846.
- [33] STRÖM L, OWEN A G, GODBOLD D L, et al. Organic acid behaviour in a calcareous soil: Sorption reactions and biodegradation rates [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2125-2133.
- [34] 孙桂芳, 金继运, 王玲莉, 等. 低分子量有机酸类物质对红壤和黑土磷有效性的影响 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2010, 16(6): 1426-1432.
SUN G F, JIN J Y, WANG L L, et al. Effect of low-molecular-weight organic acids on Olsen-P in red soil and black soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1426-1432(in Chinese).
- [35] 龚松贵, 王兴祥, 张桃林, 等. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用 [J]. *土壤学报*, 2010, 47(4): 692-697.
GONG S G, WANG X X, ZHANG T L, et al. Release of inorganic phosphorus from red soils induced by low molecular weight organic acids [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 692-697(in Chinese).
- [36] 王艳玲, 朱红霞, 王琳, 等. 有机酸对红壤磷素吸附特性的影响 [J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 685-691.
WANG Y L, ZHU H X, WANG L, et al. Effect of organic acids on phosphorus adsorption characteristic in red soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 685-691(in Chinese).
- [37] YANG X Y, CHEN X W, GUO E H, et al. Path analysis of phosphorus activation capacity as induced by low-molecular-weight organic acids in a black soil of Northeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(2): 840-847.
- [38] 杨绍琼, 党廷辉, 戚瑞生, 等. 低分子量有机酸对不同肥力土壤磷素的活化作用 [J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 60-64.
YANG S Q, DANG T H, QI R S, et al. Activation of organic acids on phosphorus of soil with different fertility [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 60-64(in Chinese).
- [39] 唐海燕, 魏世强. 低分子量有机酸对淹水土壤磷释放动力学的影响 [J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 27(4): 439-443.
TANG H Y, WEI S Q. Kinetics of phosphorus release from flooded soils as affected by organic acids with low molecular weight [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2005, 27(4): 439-443(in Chinese).
- [40] 施葵初. 安徽湿地[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2003.
SHI K C. *Wetlands in Anhui Province*[M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2003(in Chinese).
- [41] 程中才. 中国湿地资源-安徽卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
CHENG Z C. *Chinese wetlands resources-Anhui*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015(in Chinese).
- [42] 刘丽, 梁成华, 王琦, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化影响的研究 [J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(3): 593-600.
LIU L, LIANG C H, WANG Q, et al. Effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus release [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 593-600(in Chinese).