

徐光荣, 张世熔, 钟钦梅, 等. 岷江上游典型土壤磷的迁移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1741–1747.

XU Guang-rong, ZHANG Shi-rong, ZHONG Qin-mei, et al. Phosphorus movement characteristics of typical soils in the upper reaches of the Minjiang River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1741–1747.

岷江上游典型土壤磷的迁移特性研究

徐光荣, 张世熔*, 钟钦梅, 王贵胤

(四川农业大学环境学院, 成都 611130)

摘要:通过选取岷江上游典型土壤类型褐土、黄棕壤、暗棕壤和亚高山草甸土,分析其磷组分特征及固磷能力,以期了解土壤磷的迁移特性。结果表明, $\text{H}_2\text{O-P}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 含量分别在 $3.39\sim 10.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5.70\sim 51.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,这类磷易随土壤侵蚀而流失。褐土和黄棕壤以 HCl-P 为主,暗棕壤和亚高山草甸土则以 NaOH-P 为主,其占全磷的比例分别为71.36%、24.75%、62.16%和53.04%。因此,当 NaOH-P 或 HCl-P 随土壤颗粒进入水体后,它们向水体迁移释放磷的能力较强。该区域土壤磷的最大吸附量、最大缓冲量和吸持指数表明,褐土和黄棕壤的磷素向液相释放迁移的风险高于暗棕壤和亚高山草甸土。磷素零点吸附平衡浓度介于 $19.44\sim 24.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,均大于水体富营养化临界值 $0.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。综上,岷江上游土壤磷素迁移的风险较高。

关键词:岷江上游;土壤磷;等温吸附;磷素迁移

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)08-1741-07 doi:10.11654/jaes.2017-1776

Phosphorus movement characteristics of typical soils in the upper reaches of the Minjiang River, China

XU Guang-rong, ZHANG Shi-rong*, ZHONG Qin-mei, WANG Gui-yin

(College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In recent years, there has been an increasing interest in the non-point source pollution caused by the movement of soil phosphorus (P). The fractions and fixation capacities of soil phosphorus of four kinds of typical soils, including cinnamon soil, yellow-brown earth, dark-brown earth, and subalpine meadow soil, were assessed in this study to explore the characteristics of P movement. The results showed that the concentrations of $\text{H}_2\text{O-P}$ and $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ were $3.39\sim 10.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $5.70\sim 51.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. P was easily lost by runoff in the process of soil erosion. HCl-P was the main fraction in the cinnamon soil and yellow-brown earth while NaOH-P had the largest share in dark-brown earth and subalpine meadow soil, and correspondingly the percentages of total P in these P fractions were 71.36%, 24.75%, 62.16% and 53.04%, respectively. Therefore, NaOH-P and HCl-P in these soils had high P-release potentials. The maximum sorption capacity, maximum buffer capacity, and P sorption index of soil P demonstrated that the risks of P movement from cinnamon soil and yellow-brown earth to the liquid phase were higher than those from dark-brown earth and subalpine meadow soil. The equilibrium P concentrations at zero sorption of soil P in the four soils ranged between $19.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $24.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which is larger than $0.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for eutrophication. In summary, the soils in the Minjiang River have a higher risk of P movement.

Keywords: Minjiang River; soil phosphorus; isothermal adsorption; phosphorus movement

水体富营养化是当前河流、湖泊水质恶化的主要环境问题^[1]。磷被认为是水体富营养化的主要因子^[2],其来源主要分为两类,一是外源磷的输入,二是

土壤中的磷素随径流迁移和沉积。土壤磷素以多种组分存在,磷组分会随土壤颗粒迁移至水体,污染水生生态环境^[3]。因此,有必要加强对土壤中磷组分的

收稿日期:2017-12-30 录用日期:2018-03-12

作者简介:徐光荣(1993—),男,四川珙县人,硕士研究生,主要从事土壤环境保护研究。E-mail:xgr865@163.com

*通信作者:张世熔 E-mail:rsz01@163.com

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2014NZ0044)

Project supported: The Science and Technology Support Program of Sichuan Province, China (2014NZ0044)

研究^[4]。

迄今,研究者将土壤磷组分大致分为弱吸附态磷、铁铝结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)^[5]。其中,水溶性磷($\text{H}_2\text{O-P}$)和碳酸氢钠提取态磷($\text{NaHCO}_3\text{-P}$)均属于弱吸附态磷。虽然它们在土壤含量较低,但因其吸附磷的化学键能或物理键能作用力较小,易被打破^[6],使得磷素易随径流汇入受纳水体。 NaOH-P 和 HCl-P 分别是由铁铝金属氧化物约束和碳酸盐结合形成的磷,其性质比弱吸附态磷更稳定。但土壤颗粒流失至水体中,水体pH值或溶解氧等条件改变,金属与磷的结合程度降低时^[7],这类磷的释放能力反而比弱吸附态磷更强。总之,土壤磷素随径流迁移至水体引起的非点源污染问题应受到重视。

近年来许多研究者不断检验与完善面向环境的土壤磷素表示方法,目前主要有土壤磷最大缓冲量 MBC (Maximum buffer capacity)^[8]、磷零点吸附平衡浓度 EPC_0 (Equilibrium phosphorus concentration at zero sorption)^[9]、磷吸持指数 PSI (Phosphorus sorption index)^[10]和磷吸持饱和度 DPS (Degree of phosphorus saturation)^[11]等。其中, MBC 、 EPC_0 和 PSI 值大小表征土壤固定外源磷的能力^[8-10], DPS 值被用来反映磷素进入土壤溶液的难易程度^[11]。然而,这些指标多集中评估农田土壤磷素迁移特性,对于生态环境脆弱区土壤磷的迁移特性评价鲜见报道。

岷江上游位于生态环境敏感的青藏高原东缘。近年来,该区域由于地震造成部分岩石疏松,加之部分土地陡坡耕种、过度放牧等人为扰动原因,使得在夏季暴雨和春季融雪期易形成坡面径流,磷素伴随土壤侵蚀,经过多次搬运-沉积-搬运最终进入岷江水体,增加了长江中上游水体生态环境风险。综上,本文通过化学浸提剂提取土壤中的磷组分,探究该区域典型土壤磷素水平及其吸附特征,为研究土壤磷素迁移规律提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取岷江上游作为研究区域。其整个地势由西北向东南逐渐降低,河流两侧谷坡陡峭,部分河谷坡度在 $30^\circ\sim 35^\circ$ 之间。由于地质不稳定、地表脆弱和气候多样,加之地震造成部分岩石松动,区域内频繁发生滑坡、泥石流、崩塌活动;且近年来部分土地陡坡耕种、过度放牧等加剧了该区域生态环境的脆弱敏感性。

研究区年均温 $5.7\sim 13.5^\circ\text{C}$,年均降水量为 $490.7\sim 835.8\text{ mm}$,在垂直方向上从河谷干旱气候逐渐向亚高山湿润气候过渡。近年来,其干旱河谷气候的范围在逐步扩大,一方面降水季节分配不均,夏季降雨强度大,易形成暴雨;另一方面,全年蒸发量极大,是典型的旱生河谷。土壤以褐土和黄棕壤、暗棕壤和亚高山草甸土为主,其中旱作农业土壤主要分布在河谷地带。

1.2 样品采集

根据岷江上游的汶川、茂县、黑水和松潘地区土壤分布、农牧业分布和自然地理环境等情况综合考虑,分别在河谷农区、森林区和草原牧区进行采样。在河谷农区主要采集褐土,在森林区采集黄棕壤、暗棕壤,在草原牧区采集亚高山草甸土。每种土壤类型采集3个样品($0\sim 20\text{ cm}$),其中每个样品均由3个邻近子样混合而成,本研究4种典型土壤共采集了12个样品。将土样带回实验室去除杂质,并自然风干后研磨过筛(2 mm),以备室内化验分析。

1.3 化学分析

1.3.1 土壤磷组分提取实验

本研究中土壤全磷采用 NaOH 熔融法测定。磷组分采用基于Tiemmer方法改进后的连续浸提方法^[12]。取过 2 mm 筛土壤样品 2.5 g ,加入 50 mL 浸提剂,振荡、离心、过滤,取上清液加入 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 消解,分析消解后的磷含量。本实验的第一步加入去离子水提取水溶态总磷($\text{H}_2\text{O-P}$);第二步加入 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 提取碳酸氢钠态总磷($\text{NaHCO}_3\text{-P}$);第三步加入 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 提取铁铝结合态总磷(NaOH-P);第四步加入 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 提取钙结合态总磷(HCl-P)。采用钼锑抗比色法对所有磷组分进行测定,每个样品测定3次重复。

1.3.2 土壤磷等温吸附实验

取7份风干土样 1.5 g 于 50 mL 离心管中,分别加入 30 mL 由 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 溶液配制的系列 KH_2PO_4 吸附液,本实验外源磷梯度分别设置为 5 、 10 、 15 、 20 、 40 、 60 、 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时加入3滴氯仿以抑制微生物生长。在 25°C 恒温条件下振荡 24 h ,离心、过滤,采用钼锑抗比色法测定滤液中的磷浓度,每个样品测定3次重复。

1.4 土壤磷素等温吸附模型

1.4.1 Langmuir方程

本研究中土壤磷素等温吸附拟合模型采用的Langmuir方程为:

$$Q=Q_m K_L C/(1+K_L C) \quad (1)$$

由式(1)可以得出以下形式:

$$C/Q=1/K_L Q_m+C/Q_m \quad (2)$$

式中: C 为吸附平衡时的磷浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Q 为吸附平衡时磷的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Q_m 是土壤对磷的最大吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; K_L 为吸附常数 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

由式(2)可见,以 C/Q 为 Y 轴, C 为 X 轴作图,根据其直线的斜率和截距可求出 K_L 和 Q_m 的值。

1.4.2 Freundlich 方程

本研究中土壤磷素等温吸附拟合模型采用的 Freundlich 方程一般式为:

$$Q=K_F C^{1/n} \quad (3)$$

将式(3)进行对数转换:

$$\lg Q=\lg K_F+(1/n) \lg C \quad (4)$$

式中: K_F 为土壤吸附容量参数, $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$; n 为与吸附强度相关的参数。

由式(4)可见,以 $\lg Q$ 为 Y 轴, $\lg C$ 为 X 轴作图,根据其直线的斜率和截距能计算出 K_F 和 n 值。

1.5 土壤磷素吸附特征参数

本文采用土壤磷素最大缓冲量(MBC)、土壤磷零点吸附平衡液浓度(EPC_0)、土壤磷素吸持指数(PSI)和土壤磷吸持饱和度(DPS)等4个磷吸附特征参数来评价土壤磷素迁移风险。

1.5.1 磷素最大缓冲量(MBC)

$$\text{MBC}=K_L \times Q_m \quad (5)$$

式中: Q_m 是土壤对磷的最大吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; K_L 为吸附常数, $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.5.2 磷素零点吸附平衡浓度(EPC_0)

$\text{EPC}_0(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 值是通过 Q 对 C 作图,其直线与 C 轴的交点即为 EPC_0 值。其计算公式为:

$$Q=K_d \times C-S_0 \quad (6)$$

$$\text{EPC}_0=S_0/K_d \quad (7)$$

式中: S_0 为初始状态下的吸磷量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; K_d 为线性吸附常数, $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.5.3 磷素吸持指数(PSI)

PSI值的测定是按每1 g土壤中加入1.5 mg P(磷酸盐),并在水土比为10:1的条件下充分混合,25℃恒温条件下振荡24 h,最后测定土壤吸磷量 $X(\text{mg}\cdot 100\text{ g}^{-1})$ 和平衡液中的磷浓度 $C(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ 。本实验在保证外源磷添加量不变的条件下,通过加入浓度为 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的外源磷,平衡后测定的土壤磷吸附量及其平衡液浓度,以此计算土壤PSI值。其计算公式为:

$$\text{PSI}=X/\lg C \quad (8)$$

1.5.4 磷素吸持饱和度(DPS)

土壤的DPS是指通过浸提剂提取土壤中的磷量占土壤中可吸附磷容量的百分比。本研究采用 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 和 NaHCO_3-P 这2个磷组分的含量与 Q_m 值计算DPS值。其计算公式为:

$$\text{DPS}=P_e/(Q_m+P_e) \times 100\% \quad (9)$$

$$P_e=\sum (\text{H}_2\text{O}-\text{P}+\text{NaHCO}_3-\text{P}) \quad (10)$$

1.6 数据统计与分析

数据的统计与分析采用SPSS 21.0软件进行,图形采用Origin 9.0软件绘制。不同土壤类型磷组分含量、 Q_m 、MBC、 EPC_0 、PSI和DPS值采用单因素方差分析(One-way ANOVA),并用S-N-K法分别在1%和5%水平下进行差异显著性检验。采用Pearson相关性分析确定磷组分与吸附特征参数的相关关系。

2 结果与讨论

2.1 不同土壤类型磷素组分特征

研究岷江上游典型褐土、黄棕壤、暗棕壤和亚高山草甸土磷的迁移特性,首先分析了该区域土壤的磷组分含量特征,见表1。总体来看,暗棕壤的全磷(TP)含量为 $1\,142.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其余3种土壤($P<0.01$),其次是亚高山草甸土显著高于黄棕壤和褐土($P<0.05$),而黄棕壤和褐土含量之间差异不显著($P>0.05$)。褐土和黄棕壤中磷组分以 $\text{HCl}-\text{P}$ 为主,分别为 $308.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $138.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中,褐土 $\text{HCl}-\text{P}$ 占TP的比例高达71.36%;而暗棕壤和亚高山草甸土则以 $\text{NaOH}-\text{P}$ 为主要组分,且暗棕壤的 $\text{NaOH}-\text{P}$ 含量是亚高山草甸土的1.80倍($P<0.01$)。

从表1中可知, $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 和 NaHCO_3-P 这2个组分磷含量在 $3.39\sim 51.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,它们占TP的百分比均在7%以下。研究表明,降雨集中是土壤侵蚀和磷素迁移的主要动力^[13]。岷江上游山高坡陡,降水快速集中形成坡面径流, $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 将直接流失进入水体。 NaHCO_3-P 也因其稳定性不强而在土壤侵蚀过程中可能会不断迁移转化流失至水体。

暗棕壤的 $\text{NaOH}-\text{P}$ 组分含量显著高于其余3种土壤($P<0.01$),其次是亚高山草甸土显著高于褐土和黄棕壤($P<0.01$)。在 $\text{HCl}-\text{P}$ 组分中,则表现为褐土显著高于其余3种土壤($P<0.01$)。通常上游土壤经过搬运-沉积-搬运最终进入岷江水体,然而该区域滑坡、泥石流频发,造成大量土壤直接进入岷江,此时水体中的土壤颗粒可以类比于水体底泥,可进行磷的释放研究。近年来的研究表明,水体底泥磷组分释放的

表1 不同土壤类型磷组分含量特征

Table 1 Characteristics of phosphorus fractions in different soil types

磷组分 Phosphorus fractions		褐土 Cinnamon soil	黄棕壤 Yellow-brown earth	暗棕壤 Dark-brown earth	亚高山草甸土 Subalpine meadow soil
TP	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	432.51±47.83Cc	557.83±37.21BCc	1 142.40±124.70Aa	745.67±52.01Bb
H ₂ O-P	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.39±0.97Bc	6.87±1.84Bb	10.91±1.97Aa	3.41±0.40Bc
	占TP比例/%	0.78	1.22	0.96	0.46
NaHCO ₃ -P	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.70±2.33Cc	28.07±6.90Bb	48.41±8.86Aa	51.97±8.10Aa
	占TP比例/%	1.29	5.01	4.21	6.98
NaOH-P	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	28.61±7.22Cc	134.47±13.94Cc	712.47±110.60Aa	395.35±26.69Bb
	占TP比例/%	6.55	24.09	62.16	53.04
HCl-P	含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	308.25±30.84Aa	138.10±12.23Bb	76.56±15.36Cc	55.94±5.16Cc
	占TP比例/%	71.36	24.75	6.69	7.51

注:大写字母和小写字母分别表示在1%和5%水平下的差异显著性。

Note: Capital letters and lowercase letters indicate the significant difference at the levels of 1% and 5%, respectively.

磷也会造成水体富营养化^[14-15]。在本研究中,褐土和黄棕壤的HCl-P含量分别为308.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和138.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,暗棕壤和亚高山草甸土的NaOH-P含量分别为712.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和395.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,它们占据了土壤TP的大部分比例。虽然NaOH-P和HCl-P因与金属氧化物结合而更具稳定性^[7],但它们的含量却远高于H₂O-P和NaHCO₃-P,当土壤颗粒随水土流失到达水体后,水体pH值或溶解氧等条件改变,NaOH-P和HCl-P向水体释放磷的能力将显著增大,这可能会引起水体富营养化。综上所述,岷江上游土壤磷的迁移释放潜能较大。

2.2 不同土壤类型磷素吸附特征

2.2.1 磷素等温吸附线

以外源磷的初始浓度为横坐标,磷吸附量为纵坐标,描述岷江上游褐土、黄棕壤、暗棕壤和亚高山草甸土的等温吸附过程。由图1可知,在实验浓度范围内,暗棕壤和亚高山草甸土的磷吸附量均大于褐土和黄棕壤,前两者的磷吸附量随外源磷初始浓度的增加持续增大,吸附作用暂未达到饱和状态,这表明暗棕壤和亚高山草甸土缓冲外源磷的能力比褐土和黄棕壤强。反观褐土和黄棕壤的磷吸附量变化趋势,表现为先逐渐增加后趋于平缓,其吸附作用基本达到平衡状态。说明随着外源磷添加量的不断增加,褐土和黄棕壤的磷吸附量增幅较小,其磷素吸附点位较少,缓冲外源磷的能力较弱。

2.2.2 磷素等温吸附方程

为进一步观察褐土、黄棕壤、暗棕壤和亚高山草甸土磷吸附量与溶液平衡浓度之间的定量关系,本研究采用Langmuir和Freundlich模型对土壤磷的等温

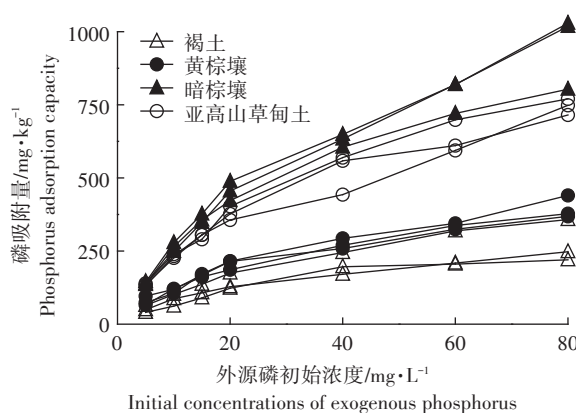


图1 不同土壤磷素等温吸附线

Figure 1 Isotherm adsorption of soil phosphorus

吸附过程进行拟合。结果表明,这2个方程均能较好地拟合土壤磷素等温吸附过程,其 R^2 在0.932~0.994之间(表2, $P<0.01$),这与王彦等^[16]研究报道的四川盆地地区土壤磷素等温吸附拟合结果相似。

采用Langmuir方程进行拟合是为了得出土壤磷的最大吸附量(Q_m)。本研究中暗棕壤的 Q_m 值为981.48 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是亚高山草甸土、黄棕壤和褐土的1.24、2.18倍和2.74倍($P<0.05$)。亚高山草甸土的 Q_m 值为790.60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于褐土和黄棕壤($P<0.05$)。而黄棕壤和褐土的 Q_m 值之间未达到差异显著水平($P>0.05$)。

研究土壤磷素等温吸附过程,不仅应得出磷素最大吸附量,还应考虑其吸附反应的自发程度。Freundlich方程中的吸附常数 K_F 常用来表征土壤磷吸附反应的自发程度^[16]。本研究中,4种土壤的 K_F 均为正值,表明在常温下该反应能自发进行。暗棕壤的 K_F 为最

大,表明其反应的自发程度较强,对磷的吸附能力也较强;相反,褐土的 K_F 为最小,自发程度不高,对磷的吸附能力较弱。总之,褐土和黄棕壤缓冲外源磷的能力较暗棕壤和亚高山草甸土弱。

2.3 不同土壤类型磷素迁移特性

研究岷江上游典型褐土、黄棕壤、暗棕壤和亚高山草甸土磷的迁移特性,还应结合磷的最大缓冲量(MBC)、零点吸附平衡液浓度(EPC_0)、吸持指数(PSI)和磷吸持饱和度(DPS)等磷素环境行为参数对其进行具体分析。

其中磷素MBC值不仅代表土壤保持可溶性磷的能力,还表示其缓冲外源磷能力的强弱^[17]。由图2可知,暗棕壤的磷素MBC值最大,显著高于其余3种土壤($P<0.05$);其次是亚高山草甸土,显著高于黄棕壤和褐土($P<0.05$);褐土和黄棕壤的磷素MBC值分别为 $16.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $35.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相互之间未达差异显著水平($P>0.05$)。因此,就土壤磷素MBC值而言,研究区褐土和黄棕壤的磷迁移风险比暗棕壤和亚高山草甸土高。

磷素 EPC_0 值表示吸附与解吸处于动态平衡时平衡溶液中的浓度,其值越大,表征土壤固定磷的能力越小^[18]。黄棕壤的 EPC_0 值最高,暗棕壤的 EPC_0 值最低,但这4种土壤的 EPC_0 值均未表现出差异显著性($P>0.05$)。已有研究建议水体富营养化的磷素临界值为 $0.02\sim 0.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[19],若 EPC_0 超过该临界值,土壤中的磷素将成为水体富营养化的重要磷源。本研究

中的土壤 EPC_0 值在 $19.44\sim 24.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,均远大于该水体富营养化临界值,表明在一定条件下,特别是有外源磷的输入时,土壤中的磷素易随径流迁移汇入岷江水体。

由图2可知,褐土和黄棕壤的PSI值均显著低于暗棕壤和亚高山草甸土,且前两者的PSI值差异不显著($P>0.05$),分别为10.16和14.88。已有研究表明土壤PSI存在临界值,且PSI值越小表示土壤中的磷素越容易发生迁移^[20]。例如张璇等^[21]研究报道,当土壤的PSI值小于25时,添加外源磷容易引起土壤水溶性磷和 EPC_0 值的增加,将导致土壤流失磷素的潜能增大。若与该值相比较,褐土和黄棕壤的PSI值均低于25,表明研究区的褐土和黄棕壤磷素迁移风险较大。

土壤DPS值亦被用来评估磷素迁移特性,其值越大,迁移风险就越大。黄棕壤、暗棕壤和亚高山草甸土的DPS值三者间未达到差异显著水平($P>0.05$),但它们均显著高于褐土($P<0.05$)。研究表明,磷素DPS值亦存在临界值,但它与土壤的基础理化性质、研究区环境状况等多种因素有关,很难采用固定的土壤DPS临界值^[22]。因此,对于生态环境脆弱和人为扰动叠加影响的岷江上游土壤还需深入研究。研究区土壤DPS值介于 $2.65\%\sim 7.14\%$ 之间,该结果仅表明区域土壤磷的吸持饱和度相对较小。

评价岷江上游典型土壤磷素迁移特性,还要分析土壤磷组分与磷素吸附特征参数间的关系。结果表明(表3), $\text{H}_2\text{O-P}$ 与MBC呈显著正相关关系($P<0.05$),

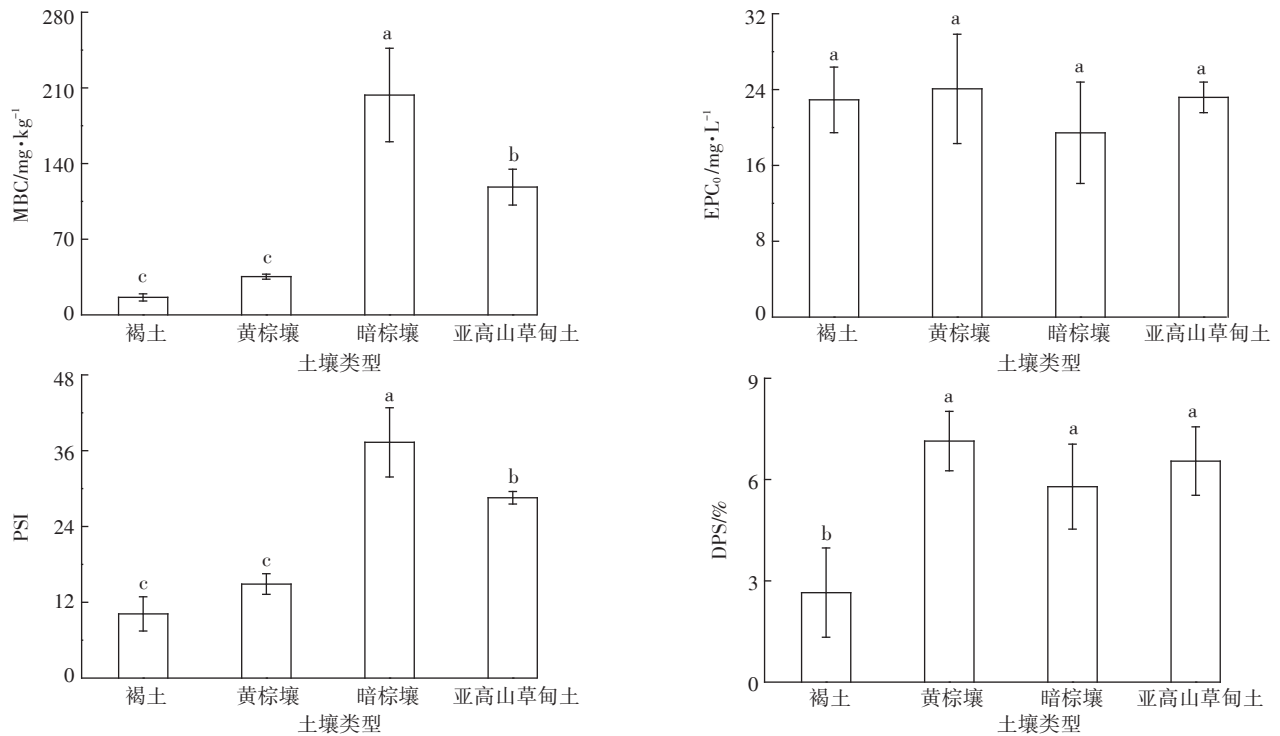
表2 不同土壤对磷的等温吸附 Langmuir 和 Freundlich 方程相关参数

Table 2 Related parameters of Langmuir and Freundlich equations for isothermal adsorption of soil phosphorus

土壤类型 Soil types	Langmuir 方程 Langmuir equation	$Q_m/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	K_L	R^2	Freundlich 方程 Freundlich equation	K_F	$1/n$	R^2
褐土 Cinnamon soil	$Y=3.409X+71.636$	$357.78\pm 102.64c$	0.047	0.979	$Y=0.574X+1.358$	22.80	0.574	0.956
	$Y=2.139X+50.092$		0.042	0.981	$Y=0.548X+1.570$	37.17	0.548	0.994
	$Y=3.342X+66.712$		0.049	0.979	$Y=0.496X+1.483$	30.39	0.496	0.983
黄棕壤 Yellow-brown earth	$Y=2.012X+26.843$	$450.48\pm 43.83c$	0.075	0.954	$Y=0.469X+1.807$	64.14	0.469	0.958
	$Y=2.404X+30.468$		0.079	0.971	$Y=0.387X+1.851$	70.99	0.387	0.965
	$Y=2.285X+27.866$		0.082	0.987	$Y=0.467X+1.771$	58.98	0.467	0.981
暗棕壤 Dark-brown earth	$Y=0.993X+3.969$	$981.48\pm 139.81a$	0.250	0.958	$Y=0.333X+2.439$	274.79	0.333	0.972
	$Y=0.946X+6.101$		0.148	0.956	$Y=0.397X+2.328$	212.86	0.397	0.989
	$Y=1.201X+5.060$		0.235	0.989	$Y=0.339X+2.345$	221.31	0.339	0.975
亚高山草甸土	$Y=1.202X+7.685$	$790.60\pm 37.01b$	0.156	0.980	$Y=0.349X+2.282$	191.43	0.349	0.983
Subalpine meadow soil	$Y=1.323X+10.124$		0.129	0.932	$Y=0.342X+2.231$	170.22	0.342	0.982
	$Y=1.327X+8.003$		0.163	0.987	$Y=0.371X+2.224$	167.49	0.371	0.990

注:小写字母表示不同土壤类型 Q_m 值的差异显著性($P<0.05$); $R_{0.05}=0.666$, $R_{0.01}=0.798$ 。

Note: Lowercase letters indicate the significant difference in Q_m for different soil types ($P<0.05$). $R_{0.05}=0.666$, $R_{0.01}=0.798$.



小写字母表示不同土壤类型 MBC、EPC₀、PSI 和 DPS 值差异显著性 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference in MBC, EPC₀, PSI and DPS for different soils ($P < 0.05$)

图2 不同土壤磷素 MBC、EPC₀、PSI 和 DPS 值

Figure 2 MBC, EPC₀, PSI and DPS of phosphorus under different soil types

褐土和黄棕壤的 MBC 值比暗棕壤和亚高山草甸土显著低,表明褐土和黄棕壤的 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 更易直接流失。 NaHCO_3-P 与 MBC、PSI 和 DPS 极显著正相关 ($P < 0.01$),土壤的 NaHCO_3-P 含量越高,MBC 和 DPS 也越高,虽然提高了土壤缓冲外源磷的能力,但当 DPS 超过临界值时,其磷素迁移风险也将增大。 $\text{NaOH}-\text{P}$ 和 $\text{HCl}-\text{P}$ 分别与 MBC、PSI 呈极显著相关 ($P < 0.01$),前者为正相关,后者为负相关,表明 $\text{NaOH}-\text{P}$ 含量低而 $\text{HCl}-\text{P}$ 含量高的土壤缓冲外源磷的能力较弱,迁移潜力较大。因此,综合土壤磷组分含量和磷素 MBC、

EPC₀、PSI 和 DPS 值分析可知,该区域褐土和黄棕壤的磷迁移风险比暗棕壤和亚高山草甸土高。

3 结论

岷江上游褐土和黄棕壤磷素在土-水界面的迁移风险比暗棕壤和亚高山草甸土高,且 4 种土壤的 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 和 NaHCO_3-P 组分在土壤侵蚀过程中易流失,当土壤颗粒最终进入水体后, $\text{NaOH}-\text{P}$ 和 $\text{HCl}-\text{P}$ 将充当水体富营养化的磷源。

参考文献:

- [1] 徐 洋,陈敬安,王敬富,等. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1):68-74.
XU Yang, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, et al. The micro-scale investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake Hongfeng [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(1):68-74.
- [2] 胡 艳,夏建国,吴德勇. 川西山地不同土地利用方式下土壤磷迁移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):141-145.
HU Yan, XIA Jian-guo, WU De-yong. Movement of phosphorus in soils under different land utilization in mountain regions in western Sichuan [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26 (Suppl): 141-145.

表3 土壤磷组分与吸附特征参数的关系

Table 3 Correlation between soil phosphorus fractions and the parameters of phosphorus adsorption characteristic

	$\text{H}_2\text{O}-\text{P}$	NaHCO_3-P	$\text{NaOH}-\text{P}$	$\text{HCl}-\text{P}$
MBC	0.619*	0.800**	0.989**	-0.711**
EPC ₀	NS	NS	NS	NS
PSI	NS	0.849**	0.949**	-0.800**
DPS	NS	0.725**	NS	-0.698*

注:**代表 $P < 0.01$, *代表 $P < 0.05$, NS 表示无显著性, $n=12$ 。

Note: **means $P < 0.01$, * means $P < 0.05$, NS means not significant, $n=12$.

- [3] Zheng Z M, Zhang T Q, Wen G, et al. Soil testing to predict dissolved reactive phosphorus loss in surface runoff from organic soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5):1786-1796.
- [4] Yan X, Wei Z Q, Hong Q Q, et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources[J]. *Geoderma*, 2017, 295:80-85.
- [5] 钢迪嘎, 齐维晓, 刘会娟, 等. 南水北调对密云水库水位变幅带土壤磷释放量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10):3813-3822.
GANG Di-ga, QI Wei-xiao, LIU Hui-juan, et al. Impact of south-to-north water diversion project on phosphorus release from water level fluctuating zone at Miyun Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10):3813-3822.
- [6] Nwoke O C, Vanlauwe B, Diels J, et al. The distribution of phosphorus fractions and desorption characteristics of some soils in the moist savanna zone of West Africa[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(2):127-141.
- [7] 张奇, 喻庆国, 王胜龙, 等. 滇西北剑湖沉积物磷组分、空间分布及释放贡献[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10):3792-3803.
ZHANG Qi, YU Qing-guo, WANG Sheng-long, et al. Phosphorus fractions, spatial distribution and release contributions in sediments of Jianhu Lake, Northwestern Yunnan Plateau, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10):3792-3803.
- [8] Dari B, Nair V D, Colee J, et al. Estimation of phosphorus isotherm parameters: A simple and cost-effective procedure[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2015, 3:70.
- [9] Pöthig R, Behrendt H, Opitz D, et al. A universal method to assess the potential of phosphorus loss from soil to aquatic ecosystems[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, 17(2):497-504.
- [10] Hughes S, Reynolds B, Bell S A, et al. Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved P in runoff from arable soils[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 16(3):206-210.
- [11] Fischer P, Pöthig R, Venohr M. The degree of phosphorus saturation of agricultural soils in Germany: Current and future risk of diffuse P loss and implications for soil P management in Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600:1130-1139.
- [12] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction[C]//Carter M R. Soil sampling and methods of analysis, Boca Raton: Poldisher Lewis, 1993:75-86.
- [13] 陈曦, 王雪松, 贺京哲, 等. 模拟降雨条件下秦岭北麓土壤磷素流失特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):80-87.
CHEN Xi, WANG Xue-song, HE Jing-zhe, et al. Experimental study on soil phosphorus loss of northern area of Qinling Mountains under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):80-87.
- [14] 王振华, 王圣瑞, 刘元英, 等. Fe和Al对湖泊沉积物中磷赋存组分的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(5):556-562.
WANG Zhen-hua, WANG Sheng-rui, LIU Yuan-ying, et al. Effects of iron and aluminum on phosphorus fractions in lake sediments[J]. *Reserach of Environmental Sciences*, 2012, 25(5):556-562.
- [15] 鲍林林, 李叙勇, 苏静君. 筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(14):4663-4670.
BAO Lin-lin, LI Xu-yong, SU Jing-jun. Phosphorus cycling and the associated ecological effects of eutrophication in dam regulated rivers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14):4663-4670.
- [16] 王彦, 张进忠, 王振华, 等. 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):2068-2074.
WANG Yan, ZHANG Jin-zhong, WANG Zhen-hua, et al. Adsorption and desorption characteristics of phosphorus on cropland soils in the hilly area of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):2068-2074.
- [17] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 不同利用方式土壤中磷的吸附与解吸特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7):2757-2762.
QIU Ya-qun, GAN Guo-juan, LIU Wei, et al. Characteristics of phosphate adsorption and desorption in soils under different utilization[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(7):2757-2762.
- [18] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水灌溉对稻田土壤磷组分和吸附特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1434-1442.
YIN Ai-jing, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Influence of domestic sewage irrigation on phosphorus forms and adsorption in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1434-1442.
- [19] 王霞, 吕宪国, 白淑英, 等. 松花湖富营养化发生的阈值判定和概率分析[J]. 生态学报, 2006, 26(12):3989-3997.
WANG Xia, LÜ Xian-guo, BAI Shu-ying, et al. Probability and threshold values for recognizing eutrophication in Lake Songhua[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12):3989-3997.
- [20] 魏红安, 李裕元, 杨蕊, 等. 红壤磷素有效性衰减过程及磷素农学与环境学指标比较研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6):1116-1126.
WEI Hong-an, LI Yu-yuan, YANG Rui, et al. The declining process of soil phosphorus availability and comparison between agronomic and environmental indexes in red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(6):1116-1126.
- [21] 张璇, 郝芳华, 王晓, 等. 河套灌区不同耕作方式下土壤磷素的流失评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):59-65.
ZHANG Xuan, HAO Fang-hua, WANG Xiao, et al. Assessment of phosphorus loss under different tillage methods in Hetao agricultural irrigation areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6):59-65.
- [22] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的影响及其风险评价[J]. 土壤学报, 2003, 40(6):838-844.
LIU Fang, HUANG Chang-yong, HE Teng-bing, et al. The environment impact on phosphorus on water by a long-term applying fertilizer P in the upland fields of yellow soil areas and its risks evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6):838-844.