

不同土地利用方式下紫色土磷吸附—解吸动力学特征

徐敏, 宋春, 毛璐, 肖霞

(四川农业大学 资源环境学院 生态环境研究所, 四川 成都 611130)

摘要: [目的] 研究川东紫色丘陵区旱耕地、林地、果园、荒草地、茶园、水稻田 6 种土地利用方式下土壤磷吸附与解吸特征及其影响因素, 以期为四川低山丘陵区不同土地利用方式下紫色土磷潜在流失风险评估提供理论依据。[方法] 采取研究区内 6 种土地利用方式下的 0—20 cm 土层土壤样品, 通过土壤磷吸附解吸试验, 计算土壤磷吸附—解吸参数, 测定土壤相关理化指标, 利用主成分分析和旋转因子分析法评估土壤磷素流失风险及其主要影响因素。[结果] 土壤 pH 值, 有机质, 水溶性磷, 速效磷, 全磷, CaCO_3 , 有效锌是影响磷吸附的重要因子, 主因素分析得出速效磷、全磷、 CaCO_3 有效锌对紫色土吸附磷能力贡献率分别为 86.9%, 89.2%, 89.4%, 96.9%。通过因子分析法分析土壤磷吸附解吸参数, 得出可用最大吸磷量 Q_m , 最大缓冲量 MBC, 易解吸磷 RDP, 拟合吸附量与解吸量的相关关系式中的截距值 b 这 4 个参数来综合预测紫色土磷素流失风险。[结论] 研究区域 6 种土地利用方式下, 果园与旱耕地土壤磷素流失风险较大, 水稻田及茶园磷素流失风险较低。

关键词: 土地利用; 紫色土; 磷; 吸附—解吸

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0039-06

中图分类号: S158

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20150928.001

Dynamics of Phosphorus Adsorption-Desorption in Purple Soil Under Different Land Use Types

XU Min, SONG Chun, MAO Lu, XIAO Xia

(Institute of Ecological and Environmental Sciences, College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: [Objective] The paper aims to study the characteristics of soil phosphorus adsorption-desorption and its influencing factors under six types of land use, namely rainfed farmland, forest land, orchard, grass land, tea plantations and paddy field in purple hilly area of Eastern Sichuan, in order to provide theoretical support for the risk assessment of phosphorus loss in purple soil under different land use types. [Methods] Soil samples were collected at a depth of 0—20 cm layer from six types of land use in research region, and then soil phosphorus adsorption-desorption parameters were determined according to the culture experiment, and related soil physical and chemical properties were measured. Principal component analysis and twiddle factor analysis methods were used to evaluate the risk of soil phosphorus loss and its main influencing factors. [Results] Soil pH value, organic matter, soil water soluble phosphorus, available phosphorus, total phosphorus, CaCO_3 and available Zn were important factors affecting the adsorption of soil phosphorus. The principal component factor analysis showed that the contribution of soil available phosphorus, total phosphorus, CaCO_3 and available Zn to purple soil phosphorus adsorption capacity were 86.9%, 89.2%, 89.4%, 96.9%, respectively. According to factor analysis, the four parameters of maximum phosphorus absorption capacity (Q_m), maximum buffering capacity (MBC), easy absorption of phosphorus (RDP), intercept value b could be used to forecast the risk of phosphorus loss in purple soil. [Conclusion] Among the six types of land use in the study area, orchard and dry farmland had the higher risk of phosphorus loss, whereas paddy fields and tea garden had the lower risk of phosphorus loss.

Keywords: land use; purple soil; phosphorus; adsorption-desorption

收稿日期: 2014-07-21

修回日期: 2014-09-14

资助项目: 四川省教育厅重点项目“不同土地利用方式下紫色土磷素形态及有效性研究”(12 ZA126); 国家自然科学基金项目“玉米—大豆带状复合种植模式下根际土壤磷有效性研究”(31201169)

第一作者: 徐敏(1991—), 女(汉族), 四川省广安市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤养分有效性方面研究。E-mail: xumin_xyz@126.com。

通信作者: 宋春(1981—), 男(汉族), 黑龙江省讷河市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农田土壤生态领域的研究。E-mail: songchun@sicau.edu.cn。

土地利用对土壤的各种要素都有着重要的影响。不同土地利用类型对土壤理化性质有着显著的影响,研究表明土地利用对全氮、有机质、全磷、水溶性磷含量都有显著影响($p < 0.01$)^[1],近年来对于不同土地利用方式下土壤磷素流失风险的报道较多,不同学者研究结果有一定差异,这与研究区域的成土母质有关^[2]。刘海婷等^[3]对泉州市不同土地利用方式磷吸附—解吸特征研究表明,磷的流失风险顺序为轮作地 > 草地 > 林地 > 旱地,而胡艳等^[4]对川西地区研究结果表明,川西山地旱地对磷的固定能力较差,水田土壤对磷的固定能力很强,茶园和林地土壤的磷流失风险则介于旱地和水之间。紫色土是在亚热带湿润季风气候条件下有紫色砂页岩发育而成的,集中分布在四川盆地低山丘陵区 and 三峡库区,面积达 $1.60 \times 10^5 \text{ km}^2$ 多。紫色土因其土壤矿质元素丰富,使得其所在地区成为重要的农业生产区域。21 世纪以来磷肥的大量施用降低了肥料利用率,过量磷素随水流失,对环境造成严重的负面影响^[5-6]。川东丘陵区,因其独特的地形及气候条件,使得紫色土区磷素流失更加严重。因此,研究该区域不同土地利用方式下土壤磷素的吸附—解吸特征及流失风险对紫色土磷素肥力可持续发展具有重要意义。本文选择川东丘陵区 6 种土地利用类型,拟通过研究土地利用方式对紫色土及紫色土长期种植水稻演变成的水稻土磷的吸附与解吸特征及其影响因素,以期为四川低山丘陵区不同土地利用方式下紫色土磷潜在流失风险评估提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川省和重庆市是中国紫色土分布最多且最集中的地区,占全国紫色土面积的 51.28%。其中四川省紫色土面积为 $9.11 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占土地总面积的

18.4%,耕种紫色土面积为 $4.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占紫色土总面积的 44.6%,占全省耕地面积的 36.4%^[7]。本文以紫色土分布最广的四川东部缓丘地区的紫色土及紫色土长期种植水稻演变成的水稻土为研究对象。研究区域属于亚热带季风气候,积温达 4 000~6 000 °C,无霜期 230~340 d,全年日照时间 1 000~1 400 h,年降水量达 1 000~1 200 mm。研究区域土地利用类型较多,其中耕地、林地、果园、草地分别占该区域土地总面积的 27.01%,41.39%,3.89%,1.78%。

1.2 土样的采集与基本理化性状的测定

于 2013 年 5 月进行样品的采集,共采集土壤样本 40 个,其中旱耕地土壤 12 个,果园土壤 6 个,林地土壤 8 个,荒草地土壤 8 个,茶园土壤 3 个,水稻土 3 个。采用“S”形布点法,采集 0—20 cm 土层土样,用四分法进行缩分,挑出植物残体与石块,带回实验室风干,磨细,过 2 与 0.2 mm 筛,装袋备用。其基本理化性质见表 1,其中 pH 值用电位法测定;有机质用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7-\text{H}_2\text{SO}_4$ 外加热法测定;速效氮用碱解扩散法;速效钾用 1 mol/L NH_4OAc 浸提火焰光度计法测定;速效磷用 0.5 mol/L 的 NaHCO_3 浸提,钼锑抗比色分光光度法测定;全磷用 $\text{HClO}_4-\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶解,钼锑抗比色分光光度法测定, CaCO_3 用中和滴定法;土壤有效铁和有效锌采用 Mehlich 3 法测定^[8-9]。

1.3 吸附试验

每个样本称取 7 份 2.00 g 过 2 mm 筛的土样,分别放置于 7 个 50 ml 塑料离心管中,分别加入含磷量为 0, 10, 20, 40, 60 和 150 mg/L 的 0.01 mol/L CaCl_2 溶液 20 ml (pH 值为 7,用 KH_2PO_4 配制),同时加入 3 滴甲苯以抑制微生物生长。将塑料管加塞后置于 25 °C 下恒温震荡 24 h,转速 180 r/min,平衡后离心 10 min (4 000 r/min),取上清液测定磷浓度,计算土壤吸磷量。

表 1 供试土壤基本理化性质

土地利用方式	样本数/个	pH 值	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水溶性磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CaCO_3 / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效铁/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效锌/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
旱耕地	13	5.79~6.86	15.1±1.6	32.9±1.3	75.7±3.7	12.4±7.6	16.1±7.6	0.409±0.221	6.83±4.97	0.324±0.237	8.57±9.47
果园	6	6.02~6.87	15.2±1.0	33.4±1.1	106.5±6.0	18.3±2.1	33.2±2.1	0.430±0.582	6.55±2.75	0.268±0.173	8.44±4.98
林地	8	5.95~6.68	9.3±1.1	34.0±1.5	117.6±5.6	15.6±2.1	16.1±1.1	0.375±0.262	5.95±4.10	0.341±0.237	7.38±6.52
荒草地	8	5.83~6.82	15.5±1.2	41.7±1.4	80.0±3.8	7.3±1.2	8.4±4.4	0.298±0.112	5.29±2.57	0.347±0.225	6.65±9.82
水田	3	5.07~6.31	17.3±2.1	48.1±1.3	64.7±1.5	8.3±2.9	9.0±1.1	0.213±0.109	6.06±4.77	0.843±0.244	3.97±2.06
茶园	3	4.68~5.28	6.2±0.4	55.0±2.4	58.2±3.5	11.0±3.3	15.5±7.5	0.319±0.165	1.01±0.16	0.334±0.133	3.65±0.01

1.4 解吸试验

吸附试验结束后,用 95% 的酒精清洗土样中游离的及塑料管壁残留的磷酸盐各 2 次,加入 20 ml 0.01

mol/L CaCl_2 溶液,加塞,25 °C 下恒温震荡 24 h,转速 180 r/min,平衡后离心 10 min (4 000 r/min),取上清液测定溶液中磷浓度,计算磷解吸量。

1.5 吸附解吸参数计算

根据 Langmuir 等温吸附模型^[3]:

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

式中: C ——平衡溶液中磷的浓度 ($\mu\text{mol/L}$); Q ——土壤吸磷量 ($\text{mg}/100\text{ g}$); K ——与吸附能力有关的常数; Q_m ——土壤最大吸磷量 (mg/kg)。

其中参数含义如下:最大吸磷量 Q_m (mg/kg) 是土壤磷库容量的一种标志,只有当磷库达到一定容量时,土壤才有可能向作物提供生长所需的养分;吸附常数 K 在一定程度上反映了土壤吸附磷的能级, K 为正值,说明吸附反应在常温下是自发进行的。

根据吸附解吸试验及 Langmuir 等温吸附模型得出的系列参数,计算如下指标:

磷吸持指数 PSI,即 $\text{PSI} = X/\ln c$,其中 X ($\text{mg}/100\text{ g}$) 为土液比为 1:10 条件下,每 1 g 土加 1.5 mg 磷时,平衡后测得的土壤吸磷量; c ($\mu\text{mol/L}$) 为与此条件下平衡液中的磷浓度。可以用以表征土壤的固磷能力,其值越大表明土壤固磷能力越强^[3]。

易解吸磷 RDP (mg/kg),加磷量为 0 时土壤中的磷进入溶液中的磷,即在 0.01 mol/L CaCl_2 溶液浓度时,土壤磷素从固相向液相转移的量,其大小可表征磷由固相进入液相的能力,其值越大表明土壤磷素越易流失^[10]。

最大缓冲容量 MBC (mg/kg), $\text{MBC} = KQ_m$,一般认为它能较好地表征土壤的吸磷特征,该值越大,说明土壤贮存磷的能力越强。若土壤 Q_m 高,而 MBC 低,土壤结合能力低,磷易流失,当 Q_m 高,且 MBC 也较高时,土壤对磷固持能力才较强^[11]。

1.6 数据处理

运用 SPSS 20.0 软件进行相关性分析,数据标准化采用中心效果测度转换,主成分分析选用旋转因子分析。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下紫色土吸附特征

土壤磷等温吸附曲线可以用 Langmuir 方程很好的拟合^[12]。根据 Langmuir 方程可计算出一系列土壤磷吸附参数如表 2 所示。不同土地利用方式下土壤最大吸磷量 Q_m 表现为:果园土壤 > 水稻土 > 荒草地土壤 > 旱耕地土壤 > 林地土壤 > 茶园土壤,表明果园与旱耕地相对于其他利用类型来说土壤磷素容量较大。 K 值表现为:茶园土壤 > 荒草地土壤 > 水稻土 > 林地土壤 > 旱耕地土壤 > 果园土壤,茶园土壤 K 值较高,表明其对磷素吸附能力较强,而其速效磷含量偏低 (15.5 mg/kg , Olsen 法,表 1),表明土壤可供植株吸收的磷较少,需适当施用磷肥来满足植物生长需求。

表 2 不同土地利用方式下土壤磷吸附的 Langmuir 方程及吸附参数

土地利用方式	Langmuir 方程	相关系数 R^2	$Q_m / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	K	RDP / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	PSI	MBC / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
旱耕地	$C/Q = 0.0065C + 0.0636$	0.9980	153	0.103	0.196	23.3	15.7
果园	$C/Q = 0.0055C + 0.0948$	0.9883	181	0.058	0.216	26.5	10.6
林地	$C/Q = 0.0088C + 0.0653$	0.9808	114	0.134	0.157	19.2	15.3
荒草地	$C/Q = 0.0062C + 0.0296$	0.9978	157	0.216	0.152	25.6	33.8
水田	$C/Q = 0.0057C + 0.0294$	0.9064	175	0.194	0.145	28.2	34.0
茶园	$C/Q = 0.0122C + 0.0340$	0.9718	82	0.358	0.089	14.00	29.4

注: Q_m (mg/kg) 指最大吸磷量; K 指吸附常数; PSI 指磷吸持指数; RDP (mg/kg) 指易解吸磷; MBC (mg/kg) 指最大缓冲容量。下同。

RDP 指数表现为:果园土壤 > 旱耕地土壤 > 林地土壤 > 荒草地土壤 > 水稻土 > 茶园土壤。这表明水稻土与茶园土壤对磷具有较强的吸附能力,这可能是因为水稻土有机质含量高,对磷的吸附位点较多,茶园土 pH 值较低,即 H^+ 较多,从而增加了此两种利用方式下土壤对磷的吸附能力;而果园与旱耕地土壤由于水溶性磷和速效磷含量较高,使得土壤中的磷更易从固相中向液相中转移,其土壤磷更易流失;林地、荒草地的易解吸磷居中,原因是林地具有较厚的枯枝落叶层,提高了土壤对水分养分的吸附性能,而荒草地由于常年的不耕作,使得土壤水溶性磷含量较低所致,加之土壤扰动较少,使二者保蓄磷素的能力均高

于果园和旱耕地。

不同土地利用方式下,土壤 MBC 值表现为:水稻土 > 荒草地土壤 > 茶园土壤 > 旱耕地土壤 > 林地土壤 > 果园土壤,果园土壤具有较高的 Q_m ,而 MBC 较低,表明果园土壤对磷的结合能力低^[5],使得果园土壤中的磷更易随水流失,旱耕地也表现出相同的趋势。水稻土磷吸附解吸参数则表现为 Q_m 较高,且 MBC 也较高,表明水稻土对磷的固持能力较高,能够吸附磷,表现出磷“汇”的作用,这与王彦^[13]、高超^[14]等研究结果表现出一致的趋势。其原因可能是土壤在淹水条件下,土壤 Eh 为负值,处于还原状态,微生物活动减弱,从而积累了大量的有机质,同时淹水条

件增加了活性氧化铁的含量(表 1),有机质与 Fe 等氧化物结合在一起,形成有机无机复合体,提高了土壤对磷的吸附能力^[15],而其土壤全磷、速效磷含量较低,可能会导致作物生长受阻,因此,水田注重施用一定量的磷肥也是十分必要的。

2.2 不同土地利用方式下紫色土解吸特征

磷在土壤中的解吸过程是吸附过程的逆过程,因此,影响吸附作用的因素同样也影响解吸作用,众多学者认为土壤磷素解吸过程与土壤吸附磷再利用、提高磷生物有效性及土壤向水体释放磷素等相关^[4,14]。由表 3 可以看出,随着外源磷投入量浓度的增大,紫色土解吸的磷量增大,表明随着外源磷添加量的提

高,紫色土磷流失风险也随之变大,这与李学平等^[15]研究结果表现出一致的趋势。

表 4 为用 $y = ax + b$ 拟合吸附量与解吸量的相关关系,可以看出土壤对磷的吸附量与解吸量呈显著或极显著相关关系。 b 为单位吸附量的解吸量, b 值越大,表明土壤对外源磷的缓冲能力越差,由此可以看出土壤对磷缓冲能力大小为:茶园 > 荒草地 > 耕地 > 林地 > 水田 > 果园,果园的缓冲能力最差,这与其较高的速效磷水平密切相关。因此,果园应投入较少磷素,在施用磷肥的方式上应该是有机无机肥混合施用,以增强土壤对磷的缓冲能力,降低磷素流失风险。

表 3 不同土地利用方式下紫色土吸附磷的解吸量

mg/100 g

土地利用方式	不同外源磷溶液浓度(mg/L)时吸附磷的解吸量						
	0	10	20	40	60	100	150
旱耕地	7.37	8.46	10.7	12.2	13.0	15.9	16.5
果园	4.55	6.76	10.8	12.0	16.2	16.3	33.4
林地	3.79	5.77	6.99	7.77	9.41	14.5	15.3
荒草地	5.16	5.50	7.23	9.61	12.3	15.4	17.6
水田	2.81	3.04	3.79	5.29	6.47	12.5	14.5
茶园	1.15	3.20	3.48	4.23	4.39	5.17	5.96

表 4 不同土地利用方式下土壤磷的解吸量(y)与吸附量(x)的关系

土地利用方式	$y = a + bx$		
	a	b	R ²
旱耕地	8.594 3	0.087 0	0.956 *
果园	6.119 4	0.265 2	0.928 **
林地	4.746 3	0.096 4	0.961 **
荒草地	3.684 8	0.077 7	0.983 *
水田	1.267 7	0.125 9	0.970 **
茶园	3.327 3	0.045 3	0.976 **

注: * 表示显著相关($p \leq 0.05$); ** 表示极显著相关($p \leq 0.01$)。下同。

2.3 土壤理化性质与磷吸附解吸参数之间的相关性

土壤磷素的吸附—解吸受土壤理化性质影响较大^[2,16]。本试验结果如表 5 所示。有机质与 Q_m , PSI 呈极显著正相关关系,表明土壤有机质对磷的吸附固持能力有显著影响。目前大量研究表明,有机质在土壤磷吸附中的作用十分复杂,主要表现在两方面:一是有机质分解过程中会产生大量有机酸,有机酸释放的质子有利于增强土壤对磷的吸附能力,二是有机质产生的有机阴离子能够结合磷吸附位点,降低土壤吸磷容量^[2]。速效氮与 K , RDP 相关系数分别为 0.925, -0.894, 其对土壤磷流失其负效应,在这方面

的类似研究还鲜见报道,其可能的原因是速效氮与土壤其他理化性质的相关影响,从而间接对土壤吸附磷能力造成影响。从相关性分析可以看出,速效氮与土壤 pH 值、 CaCO_3 相关系数分别为 -0.923, -0.821。土壤水溶性磷、速效磷、全磷与磷吸附解吸能力密切相关。由表 5 可以看出,水溶性磷、全磷与 MBC 的相关系数分别为 -0.937, -0.923, 均达极显著水平,而速效磷与 b 呈显著正相关关系,表明土壤磷含量越高,其缓冲能力越差,对土壤吸附能力具有负效应,对解吸能力具有正效应,与前人研究结果一致^[17]。

土壤 CaCO_3 与 RDP 值相关系数为 0.872, 由表 1 可知,本研究土壤 pH 值 < 7, 在 pH 值 < 7 的情况下,随着 CaCO_3 含量升高,土壤磷有效性会有所提高,进而使土壤更易释放磷源。田春丽等^[18]研究表明,土壤全磷与有效 Fe 存在显著负相关关系,本研究也得出相同的结论,二者相关系数为 -0.832, 而淹水条件下能够提高活性氧化铁的含量,这就是水稻土全磷含量较低的主要原因。有效锌与钾, RDP 相关系数分别为 -0.852, 0.882, 对土壤吸附磷能力有重大的影响,目前大多数学者认为磷锌具有拮抗作用,这可能是造成随着有效锌含量的增大,土壤对磷的吸附固定作用越强的主要原因。

表 5 供试土壤对磷的吸附和解吸参数与其基本理化性质的相关性

参数	pH 值	有机质	速效氮	速效钾	水溶性磷	速效磷	全磷	CaCO ₃	有效铁	有效锌
Q_m	0.433	0.964**	-0.446	0.155	0.018	0.205	-0.019	0.799	0.326	0.397
K	-0.794	-0.577	0.925**	-0.695	-0.606	-0.538	-0.548	-0.923**	0.152	-0.852*
RDP	0.759	0.632	-0.894*	0.582	0.557	0.588	0.63	0.872*	-0.247	0.882*
PSI	0.414	0.978**	-0.368	0.111	-0.123	0.038	-0.178	0.782	0.443	0.293
MBC	-0.538	0.074	0.799	-0.731	-0.937**	-0.706	-0.923**	-0.451	0.581	-0.799
b	0.285	0.457	-0.48	0.519	0.653	0.812*	0.403	0.527	-0.063	0.457

注: b 指用 $y=ax+b$ 拟合吸附量与解吸量的相关关系式中的截距值。下同。

在此基础上,对土壤理化性质进行主成分分析(如表 6 所示),提取出 2 个主成分,共同积累贡献率达到了 80.79%,其中第 1 主成分贡献率达 48.16%,为主要的贡献因子。第 1 主成分主要与速效氮、CaCO₃、锌有关,第 2 主成分主要与全磷和速效磷有关。大量研究表明,N 与 C 含量密切相关,pH 值与 CaCO₃ 含量密切相关,也就是说有机质,CaCO₃、锌是第 1 主成分的主要决定因子,而土壤磷含量构成第 2 主成分的主要决定因子,由此,有机质,CaCO₃、锌及土壤磷含量是影响土壤对磷吸附与解吸的主要因素,而宋春丽等^[2]研究表明对不同质地红壤发育而成的水稻土土壤的全磷含量、有机质和 pH 值与土壤磷吸附参数未表现出相关性,表明不同区域、不同母质、不同类型的土壤其理化性质对磷吸附—解吸影响程度不一致。

表 6 主成分分析相关系数矩阵

参数	主成分 1	主成分 2
有机质	0.603	-0.393
速效氮	0.955	-0.199
水溶性磷	-0.525	0.632
速效磷	-0.268	0.869
全磷	0.102	0.892
CaCO ₃	0.894	-0.310
锌	0.969	0.211
初始特征值	3.942	1.713
贡献率/%	48.16	32.63
累积贡献率/%	48.16	80.79

2.4 评价土壤磷素流失潜力的主要吸附解吸特性参数分析

通过土壤磷吸附与解吸试验及 Langmuir 方程,可以得出一系列评价磷吸附解吸能力的指标,对这些指标进行因子分析,能够找出最适合评价磷素流失的指标^[12,16]。如表 7 所示,对 6 个指标进行提取,提取出 3 个主成分,累积贡献率达 96.559%,主成分 1 的

贡献率高于主成分 2 和 3,说明主成分 1 显得更为重要。主成分 1 中 K , RDP, b 值为主要的反应对象,主成分 2 主要反应的是 Q_m 和 PSI 值,主成分 3 主要反应的是 MBC 值。而 Q_m 与 PSI 值相关系数为 0.982, K 与 RDP 值相关系数为 -0.967,均达极显著水平,因此,评估土壤磷素流失风险可以用其中之一。综上,可以选择 Q_m (或者 PSI), MBC, RDP(或者 K), b 这 4 个指标来预测土壤磷素流失风险。

表 7 旋转因子载荷矩阵

参数	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Q_m	0.360	0.915	-0.094
K	0.921	0.237	-0.292
RDP	0.903	0.234	-0.151
PSI	0.099	0.984	-0.067
MBC	-0.058	-0.105	0.989
b	0.915	0.122	0.326
初始特征值	2.645	1.943	1.206
贡献率/%	44.083	32.379	20.097
累积贡献率/%	44.083	76.462	96.559

3 结论

四川丘陵区不同土地利用方式下紫色土对磷的吸附能力差异较大。果园土壤和旱地土壤对磷吸附能力较低,茶园土壤和水稻土对磷吸附能力较高。

土壤基本理化性质对土壤磷吸附解吸参数有重要的影响,主因素分析得出速效磷,全磷, CaCO₃, 锌对土壤吸附磷能力的贡献率分别 86.9%, 89.2%, 89.4%, 96.9%, 而如何衡量这些因素对土壤固持磷能力的影响大小,还需进一步深入研究。

通过旋转因子分析方法得出可以用 Q_m , MBC, RDP, b 这 4 个指标综合评价预测紫色土磷素流失风险。不同土地利用方式下紫色土磷素流失风险表现为: 果园 > 旱耕地 > 林地 > 荒草地 > 茶园 > 水田。

[参 考 文 献]

- [1] 王洪杰,史学正,李宪文,等. 小流域尺度土壤养分的空间分布特征及其与土地利用的关系[J]. 水土保持学报, 2004,18(1):15-18.
- [2] 宋春丽,樊剑波,何园球,等. 不同母质发育的红壤性水稻土磷素吸附特性及其影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2012,49(3):607-611.
- [3] 刘海婷,赵阳,于瑞莲,等. 泉州市不同利用方式下土壤磷的吸附与解吸特性[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1114-1118.
- [4] 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(S): 141-145.
- [5] Pernet C B, Qi W X, Liu H J, et al. Sources and pathways of nutrients in the semi-arid region of Beijing-Tianjin, China[J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(10):5294-5301.
- [6] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009,323(5917):1014-1015.
- [7] 何毓蓉,郑霖,陈学华,等. 中国紫色土[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [9] 刘肃,李西开. Mehlich3 通用浸提剂的研究[J]. 土壤学报, 1995,32(2):132-141.
- [10] Bache B W, Williams E G. A phosphate sorption index for soils[J]. Journal of Soil Science, 1971,22(3):289-301.
- [11] 谢学俭,冉炜,沈其荣. 淹水条件下水稻田中磷的淋溶研究[J]. 土壤, 2003,35(6):506-509.
- [12] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007,44(1):37-47.
- [13] 王彦,张进忠,王珍华,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, 2011,20(10):2068-2074.
- [14] 高超,张桃林,吴蔚东,等. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001, 7(22): 68-72.
- [15] 李学平,石孝均,刘萍. 紫色土磷素流失的环境风险评估:土壤磷的“临界值”[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1153-1158.
- [16] 田娟,刘凌,董贵明,等. 淹水土壤磷释放机理研究进展[J]. 土壤通报, 2008,39(2):426-430.
- [17] 刘建玲,廖文华,张作新,等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评估[J]. 中国农业科学, 2007,40(5):959-965.
- [18] 田春丽,介晓磊,刘世亮,等. 富啡酸对石灰性潮土中磷吸附—解吸及其对锌次级吸附—解吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(3):530-537.

(上接第 38 页)

- [17] 杨勤科,李锐,曹明明. 区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展[J]. 地球科学进展, 2006,21(8):849-856.
- [18] 刘刚才,张建辉,高美荣,等. 土壤水蚀影响因子与土壤退化研究进展[J]. 西南农业学报, 2003,16(S1):23-28.
- [19] 潘兴瑶,李法虎,刘洪禄. 土壤结皮及其对土壤水蚀影响的研究进展[C]//北京农业工程学会. 国际农业论
谈:2005 北京都市农业工程科技创新与发展国际研讨会论文集. 2005.
- [20] 武文波,姬翠翠,李晓松,等. 影响土壤水蚀的环境因子分析[J]. 中国水土保持, 2010,31(5):36-38.
- [21] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000,20(4):27-30,45.