

滇江流域不同土地利用方式下土壤磷积累特征及流失风险

黄永杰¹, 张世熔^{1,2}, 蒲玉琳^{1,2*}, 杨玲^{1,2}, 徐小逊^{1,2}, 贾永霞^{1,2}

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2.四川省土壤环境保护重点实验室, 成都 611130)

摘要:采用实地采样调查、室内分析与数理统计法研究了滇江小流域耕地、果园、茶园、人工林地、自然林地、饲草地和荒草地7种土地利用方式下表层土壤磷素的积累及吸附特征。结果表明,人工林地、饲草地与耕地土壤全磷 $>1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,呈现积累趋势;饲草地和耕地的 Olsen-P $\geq 40.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过磷素流失临界值;人工林地、饲草地和耕地土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ $>4.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,也超过磷素流失临界值。茶园土壤吸附固定磷能力极强,耕地、果园地、林地(尤其是人工林地)与草地土壤的吸附固定磷能力较弱。人工林地、耕地与饲草地土壤磷素流失风险较高,宜采用补偿性施磷或维持性磷肥法;果园、荒草地、自然林地的风险较低,茶园土壤磷素几乎无流失风险。

关键词:滇江流域;土地利用方式;土壤磷素;积累特征;流失风险

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0337-08 doi:10.11654/jaes.2015.02.018

Accumulation and Loss Risk of Soil Phosphorus Under Different Land Uses in Fenjiang River Watershed

HUANG Yong-jie¹, ZHANG Shi-rong^{1,2}, PU Yu-lin^{1,2*}, YANG Ling^{1,2}, XU Xiao-xun^{1,2}, JIA Yong-xia^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Key Laboratory of Soil Environment Protection of Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: Phosphorus(P) is one of the greatest demanded nutrients for crop growth, but unreasonable land use and management are major factors causing non-point source P pollution. This paper examined accumulation and sorption characteristics and potential loss risk of surface soil P under seven land-use types in the Fenjiang River watershed, using field investigation, laboratory analysis, and mathematical statistics. The seven land-use types include farmland(FL), orchard land(OL), tea plantation land(TP), artificial forest land(AF), natural forest land(NL), forage grass land(FG), and weeds land(WL). The content of soil total P in AF, FG and FL were greater than $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, showing an accumulation trend. In FG and FL, soil Olsen-P content was equal to or higher than $40.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, exceeding the critical value of P loss. The content of soil $\text{CaCl}_2\text{-P}$ was higher than $4.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in AF, FG and FL, exceeding the critical value of P loss as well. TP soil had a stronger P sorption and fixation, whereas FL, OL, AF, and FG had a weaker P sorption and fixation, especially AF. The present results show that AL, FL and FG have higher potential risk of P runoff loss and leaching, while OL, WL and NL have a relatively lower risk of P loss. TP soil has almost no P loss risk.

Keywords: Fenjiang River watershed; land use types; soil phosphorus; accumulation; potential loss risk

磷是大多数水体藻类生长的限制因子,而来自农业非点源的磷往往是地表水体富营养化的主要原因^[1]。因此,近年来土壤磷素流失的研究成为热点^[2-4]。研究表明土壤水溶磷、Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 等不同形态的有

效磷含量与地表径流中磷含量显著相关^[4-5],故常用 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 等评估土壤磷素的流失风险。土壤磷素流失常常存在一“突变点”,若土壤 Olsen-P 或 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量超过此“突变点”,其磷素流失风险将显著增大^[5-6]。此外,土壤磷流失风险也可用土壤磷素的最大吸附量(Q_m)与最大缓冲量(MBC)、磷零点吸附平衡液浓度(EPC_0)和磷吸持指数(PSI)等土壤吸持性指标评估^[7-8]。其中 Q_m 、MBC 和 EPC_0 可表示土壤固磷能力大小^[8];土壤磷吸持饱和度(DPS)是衡量土壤磷

收稿日期:2014-08-21

基金项目:四川省教育厅项目(14ZB0011);四川省科技支撑计划(2014NZ0044)

作者简介:黄永杰(1993—),男,四川乐山人。

E-mail:huang_yongjie@yeah.net

*通信作者:蒲玉琳 E-mail:pyulin@sicau.edu.cn

水平和固磷能力的综合指标,可反映土壤磷从固相进入液相的难易程度^[9],如 Allen 等^[10]研究发现土壤 DPS 与地表径流溶解态活性磷和生物可利用磷呈显著正相关。

土地利用方式对土壤磷素的流失风险影响显著^[9],如嘉兴市养殖场、庭院、果园土壤磷素流失风险显著大于水田土壤^[11],秦岭北麓猕猴桃园土壤磷素流失风险明显大于耕地土壤^[12],菜地土壤磷素流失风险也显著大于水田落干土壤^[13]。然而,已有文献对不同土地利用方式下土壤磷素流失风险的研究主要集中于受人为影响较大的耕地与果园^[11-14],较少分析小流域内多种土地利用方式土壤,尤其是茶园地、人工林地与饲草地土壤磷素的潜在流失风险。同时,近年来雅安产业结构调整,部分传统耕地改为人工林地与饲草地,加之化学磷肥的施用致使土壤磷素不断累积,其释放的潜在可能性也会大大增加,威胁流域水环境质量安全。因此,本文以四川雅安湞江小流域生态系统为研究对象,探讨耕地、林地、园地、草地等多种土地利用方式土壤磷素累积与等温吸附特征,及其潜在流失风险,旨在为该区域土壤磷素管理提供基础数据,为农业非点源污染防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省雅安市湞江流域(29°50′~30°14′N,102°51′~103°14′E)。该流域地处四川盆周山区西部,为青衣江流域一级支流,地貌类型以低山丘陵为主,海拔 580~1453 m;属亚热带季风气候,有明显的干季和湿季,年均气温 14.1~17.9℃,多年平均降雨量为 1670 mm,湿度大,日照少。土壤以紫色土为主,少量黄壤;土地利用类型主要有耕地、茶园、果园、林地。

1.2 土壤样品采集与处理

选择能代表耕地、果园、茶园、人工林地、自然林地、饲草地、荒草地的典型样地(20 m×20 m),采用 S 型布点法分别采集 0~20 cm 土层混合样 500 g 左右,带回室内风干后研磨过筛,备用。耕地与饲草地土壤采集均在作物和饲草收获后进行。各利用类型样地基本情况见表 1。

1.3 分析项目与测定方法

1.3.1 土壤磷及相关指标^[15-16]

土壤 pH 采用水浸提(1:2.5),玻璃电极法;全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消化-钼锑抗比色法;水溶性磷(Water-extractable-P)采用蒸馏水浸提(土液比 1:20),钼锑抗比色法;Olsen-P 采用 0.05 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提(土液比 1:20),钼锑抗比色法;Mehlich3-P 采用 0.2 mol·L⁻¹ CH₃COOH、0.25 mol·L⁻¹ NH₄NO₃、0.013 mol·L⁻¹ HNO₃、0.015 mol·L⁻¹ NH₄F、0.001 mol·L⁻¹ EDTA 混合液浸提(土液比 1:10),钼锑抗比色法;CaCl₂-P(易解析磷 RDP)采用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 浸提(土液比 1:20),钼锑抗比色法。

1.3.2 土壤磷素吸附量^[14]

取过 2 mm 筛的 8 份风干土 1.50 g 于 50 mL 具塞离心管中,加入 30 mL 由 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液配制 KH₂PO₄ 的系列吸附液,其磷浓度分别为 3、5、7、12、20、30、40、50 mg·L⁻¹,同时加入两滴氯仿抑制微生物作用。25℃恒温振荡 24 h,转速 180 r·min⁻¹,离心后吸取上清液,用钼锑抗比色法测定滤液中磷浓度。土壤对磷的吸附量 Q 按(1)式计算。

$$Q = (C_0 - C)V / 1000W \quad (1)$$

式中: Q 为磷的吸附量,mg·g⁻¹; C_0 为磷的初始浓度,mg·L⁻¹; C 为吸附平衡时的磷浓度,mg·L⁻¹; V 为吸附液体积,mL; W 为烘干土质量,g。

1.3.3 土壤磷素流失风险的评价指标^[3,13,17]

1.3.3.1 磷最大吸附量(Q_m)与最大缓冲容量(MBC)

由 Langmuir 等温式[(2)式]拟合土壤磷素等温吸

表 1 试验样地基本情况
Table 1 Basic conditions of experimental plots

土地利用方式 Land use type	坡度 Slope/(°)	植被 Vegetation	利用年限 Use time	年均施肥量/kg·hm ⁻²		土壤类型 Soil type
				N	P ₂ O ₅	
耕地	2~10	小麦/玉米(大豆、向日葵)	15 年以上	375~550	110~180	紫色土
果园地	5~20	桃树、梨树	3~15 年	150~210	50~75	紫色土
茶园地	5~25	茶树	10 年以上	45~105	15~35	紫色土
人工林地	5~25	棕树、园艺林木	3~5 年	240~325	75~145	紫色土
自然林地	15~35	樟树、松树、柏树	15 年以上	—	—	紫色土
饲草地	2~15	黑麦草、三叶草	3~10 年	320~510	100~175	紫色土
荒草地	2~35	杂草	5 年以上	—	—	紫色土

附过程,可得磷的最大吸附量 $Q_m(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 和吸附能常数 $k(\text{L} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。

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

再由(3)式计算最大缓冲量 MBC

$$\text{MBC}=k \times Q_m \quad (3)$$

1.3.3.2 磷零点吸附平衡液浓度(EPC_0)

根据 Henry 线性式[(4)式]拟合土壤磷素等温吸附过程,可得线性吸附系数 $K_d(\text{L} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。

$$Q=K_d \times C-S_0 \quad (4)$$

式中: S_0 表示初始状态下的磷吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

再由(5)式计算磷零点吸附平衡液浓度 EPC_0

$$\text{EPC}_0=S_0/K_d \quad (5)$$

1.3.3.3 磷吸持指数(PSI)

PSI 测定方法:每 1 g 土加入 1.5 mg 磷酸盐(土液比 1:10), 恒温 25 °C 振荡 24 h 后测定土壤平衡液磷浓度($C, \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)和磷吸持量($X, \text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), 由(6)式计算。

$$\text{PSI}=X/\text{lg}C \quad (6)$$

1.3.3.4 磷吸持饱和度(DPS)

DPS 是土壤中可提取磷量占土壤可吸附磷容量的百分比, 由(7)、(8)式计算。

$$\text{DPS}=P_e/P_{sc} \times 100\% \quad (7)$$

$$P_{sc}=Q_m+P_e \quad (8)$$

式中: P_e 为可提取磷量, 以土壤 Olsen-P($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 表示; Q_m 为土壤最大吸附磷量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.4 统计分析与制图

试验数据用 SPSS 13.5 软件分析与统计, 用 Origin 7.5 和 Excel 2007 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤各形态磷素积累特征

磷素是作物必需的大量营养元素之一, 土壤磷素水平在一定程度上可由全磷、水溶性磷、Olsen-P、

CaCl₂-P 等指标反映。由表 2 可知, 滇江小流域各利用方式土壤全磷含量在 0.24~1.26 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 其中人工林地、饲草地、耕地土壤全磷含量超过或接近全国土壤普查的适量等级 1.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 呈现累积趋势。不同土地利用方式下, 土壤全磷含量高低顺序为人工林地>饲草地>耕地≈果园地>自然林地≈荒草地>茶园地。方差分析显示: 人工林地土壤全磷含量分别比饲草地、耕地、果园地、自然林地、荒草地、茶园地显著高 0.10、0.31、0.34、0.94、1.11、4.33 倍; 饲草地土壤全磷含量分别比耕地、果园地、自然林地、荒草地、茶园地显著高 0.20、0.23、0.78、0.93、3.67 倍; 耕地、果园地、自然林地与荒草地土壤全磷含量分别比茶园地显著高 3.01、2.98、1.74、1.53 倍; 耕地、果园地土壤全磷含量与自然林地、荒草地土壤的差异也达显著。耕地与果园地之间、自然林地与荒草地之间的土壤全磷含量无显著差异。

Olsen-P 含量变化范围 4.18~49.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占全磷总量的 0.97%~4.27%, 说明研究区土壤磷素的活性较低。按照全国土壤二次普查分级标准, 饲草地土壤 Olsen-P>40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、耕地土壤的约为 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均属丰富等级, 呈明显富集。茶园地土壤 Olsen-P<5.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 严重缺乏; 其他利用类型土壤 Olsen-P 含量范围 7.54~15.35 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 介于适量(20.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与贫乏(5.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)等级。土壤 Olsen-P 在不同利用方式下的大小顺序为饲草地>耕地>人工林地≈荒草地≈果园地≈自然林地>茶园地。饲草地土壤 Olsen-P 含量显著高于耕地、人工林地、荒草地、果园地、自然林地和茶园地, 分别高 0.29、2.20、3.90、4.32、5.50、10.72 倍; 耕地土壤 Olsen-P 含量比人工林地、荒草地、果园地、自然林地、茶园地显著高 1.61、3.00、3.34、4.31、8.60 倍; 人工林地、荒草地、果园地与自然林地土壤 Olsen-P 含量分别比茶园地显著高 2.67、1.39、1.20、0.80 倍; 而人工林地、荒草地、果园地和自然林地土壤

表 2 滇江流域土壤基本性质以及土壤磷含量(平均值±标准误)

Table 2 Basic properties and phosphorus content of soils in Fenjiang River watershed (mean ± SD)

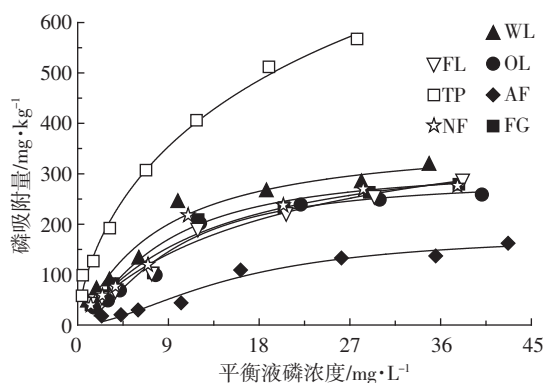
土地利用方式 Land use type	pH(H ₂ O)	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	水溶性磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Olsen-P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Mehlich3-P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	CaCl ₂ -P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
耕地	6.17~6.99	10.51±1.24b	0.97±0.06c	13.31±1.95b	39.97±5.55b	44.34±7.47b	4.53±1.99b
果园地	7.23~7.84	13.32±2.11b	0.94±0.03c	5.87±1.25cd	9.20±2.44c	6.75±1.34c	2.15±0.83c
茶园地	3.87~4.68	12.11±0.78b	0.24±0.02e	1.19±0.82e	4.18±1.70d	4.68±2.73c	1.91±1.41c
人工林地	6.88~7.95	22.28±2.65a	1.26±0.06a	6.79±1.30c	15.35±2.37c	11.47±1.11c	3.96±1.06c
自然林地	7.48~7.93	16.52±1.89a	0.65±0.09d	3.87±1.15de	7.54±2.50c	8.10±2.23c	2.16±1.18c
饲草地	6.32~6.95	17.80±2.12a	1.15±0.09b	18.13±3.31a	49.01±11.61a	77.64±21.22a	6.50±1.63a
荒草地	6.57~7.34	7.37±0.76c	0.60±0.01d	3.88±1.23de	10.00 ±1.38c	8.96±5.14c	2.65±1.40c

Olsen-P 含量差异不显著。

不同土地利用方式土壤水溶性磷、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Mehlich3-P 含量大小顺序类同 Olsen-P, 三种形态有效磷含量均表现为饲草地与耕地含量显著高于其他地类, 而饲草地又显著高于耕地; 茶园地显著低于其他利用方式的土壤, 人工林地、果园地、荒草地之间差异较小。

2.2 不同土地利用方式下土壤磷素吸附特征

以平衡液浓度为横坐标, 吸附量为纵坐标, 采用 Langmuir 等温式拟合各地类土壤磷素等温吸附过程 (图 1), 拟合方程的决定系数均达极显著 ($R^2=0.959\sim0.982, P<0.001$), 表明 Langmuir 方程可用于描述研究区土壤磷素的等温吸附过程。由图 1 可知, 在实验吸附液的磷含量范围内, 茶园地土壤磷素等温吸附曲线变化较陡, 斜率远较其他利用类型土壤大, 土壤吸附磷量随着外源磷量的增加持续增大, 吸附作用未达饱和。说明茶园地土壤吸附固磷能力极强。除茶园地外的各地类土壤磷素等温吸附曲线由陡变缓, 最后近似平行于横轴, 吸附作用基本达平衡。人工林地土壤磷素等温吸附曲线变化较平缓, 斜率较小, 低于其他利用类型土壤, 说明随外源磷添加量的增加, 人工林地土壤磷吸附量的增幅较小, 磷素吸附点较少, 吸附固磷能力较低; 耕地、果园地、自然林地、饲草地以及荒草地土壤磷素等温吸附曲线变化的陡缓程度与斜率大小都介于茶园与人工林地土壤之间, 说明耕地等五类利用类型土壤的磷素吸附点位与吸附固磷能力也介于茶园与人工林地土壤之间。



FL 为耕地 (Farmland); OL 为果园地 (Orchard land); TP 为茶园地 (Tea plantation land); AF 为人工林地 (Artificial forest land); NF 为自然林地 (Natural forest land); FG 为饲草地 (Forage grass land); WL 为荒草地 (Weeds land)

图 1 不同利用方式下土壤磷素等温吸附曲线

Figure 1 Isotherms of phosphorus sorption in soils under different land use types

2.3 不同土地利用方式下土壤磷素流失风险分析

2.3.1 土壤磷素最大吸附量与最大缓冲量

土壤固相表面具有一定数量的磷素吸附点位, Q_m 是当所有的磷的吸附点都被磷酸分子所占满时的吸附量, 即最大吸附量。由图 2(a) 可知, 研究区土壤磷素 Q_m 值为 $333.2\sim556.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同土地利用方式下, 土壤 Q_m 的大小顺序为茶园地>果园地>荒草地≈自然林地≈饲草地>耕地>人工林地, 且茶园土壤磷素 Q_m 与其他利用方式土壤差异显著, 人工林地土壤磷素 Q_m 也与其他利用方式土壤差异显著, 耕地土壤磷素 Q_m 与果园土壤差异显著。

土壤磷素 MBC 是土壤供磷能力的指标, 也可反映土壤保持可溶性磷能力的大小, 以及缓冲外源磷能力的强弱。土壤磷素 MBC 愈大, 维持相同供磷强度所需的磷肥量愈大; 当土壤磷吸附量相近时, MBC 值越大, 土壤吸附的磷越难被作物所吸收利用^[18]。由图 2(b) 可知, 茶园地土壤磷素 MBC 最大 ($126.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 显著高于荒草地等利用方式的土壤; 其次是荒草地土壤 ($46.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 显著高于除茶园地外的其他地类土壤; 人工林地土壤最低 ($5.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 显著低于其他地类土壤; 自然林地、饲草地、耕地与果园土壤 MBC 在 $22.1\sim36.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围之间, 相互之间无显著差异。说明本研究中各利用类型土壤在输入等量外源磷后, 茶园地土壤磷素 MBC 较大, 对茶树的有效性较低, 但缓冲外源磷素能力强; 人工林地土壤磷素 MBC 较小, 对植物有效性较高, 但保持土壤可溶态磷能力较弱, 流失风险也较高。

2.3.2 土壤磷素零点吸持平衡浓度

EPC_0 是土壤溶液中磷在既不发生净吸附, 也不发生净解吸, 即达到吸持与解吸动态平衡时的浓度, 可用来表征水-土界面磷交换的数量和方向。 EPC_0 值越小, 土壤固相中的磷越不易进入溶液, 反之, 土壤固相中磷越容易进入溶液^[19], 即土壤 EPC_0 值越大磷流失潜能越大。由图 2(c) 可知, 供试土壤的 EPC_0 值在 $41.2\sim388.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 人工林地最高 ($388.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 显著高于其他利用方式土壤; 其次是饲草地 ($245.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 显著高于除人工林地以外的其他地类土壤; 茶园地与自然林地土壤的较低, 分别是 $41.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $50.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 显著低于其他利用方式土壤; 耕地、果园地、荒草地土壤 EPC_0 相近, 在 $100.1\sim130.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 无明显差异。

2.3.3 土壤磷素磷吸持指数

PSI 表征土壤固磷能力, 当 PSI 值低于 25 时, 外

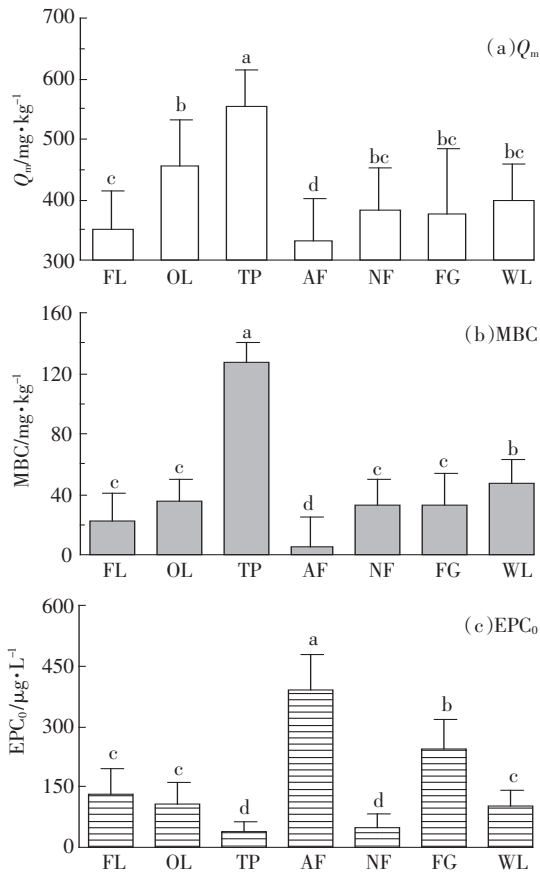


图 2 不同利用方式下土壤磷素最大吸附量(Q_m)、最大缓冲量(MBC)和吸持平衡浓度(EPC_0)

Figure 2 Q_m , MBC and EPC_0 of phosphorous in soils under different land use types

源磷的增加易引起土壤 RDP、藻类有效磷(BAP)和 EPC_0 增大,土壤磷流失风险增强^[20]。由图 3(a)可知,供试土壤 PSI 在 2.2~7.4 之间,茶园地土壤 PSI 值最高(7.4),与其他利用方式土壤的差异显著;其次是自然林地、果园地和荒草地,其 PSI 值为 3.9~4.6,显著高于耕地、饲草地与人工林地土壤;第三是耕地与饲草地,其土壤 PSI 值为 3.1~3.4,显著高于人工林地土壤;人工林地的最低,其土壤 PSI 值为 2.2。表明研究区人工林地土壤对磷素吸附固定能力最差,其磷素流失风险较高;茶园土壤 PSI 值最大,磷素流失风险相对较低。

2.3.4 土壤磷吸持饱和度

土壤 DPS 还可被定义为“土壤表面的磷酸盐覆盖度”,既能表示土壤磷素的积累强度,又可解释磷素从土壤固相向液相释放的潜能大小^[21],土壤 DPS 值愈大,其磷素流失风险愈大。由图 3(b)可知,供试土壤 DPS 值在 0.7%~11.5%之间,不同利用方式土壤 DPS 值大小排序为: 饲草地>耕地>林地≈荒草地≈果园

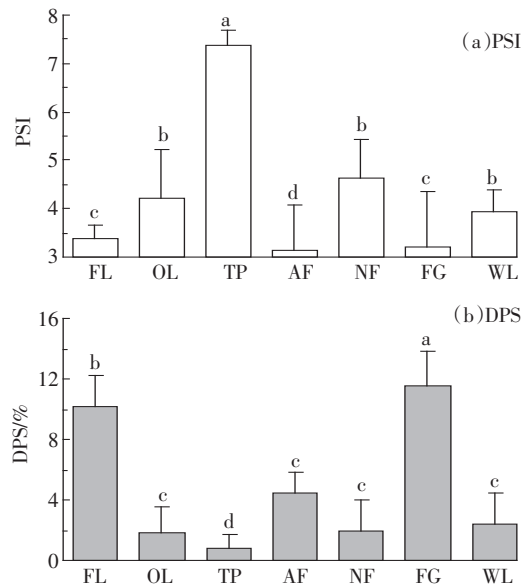


图 3 不同土地利用方式下土壤磷素吸持指数(PSI)及吸持饱和度(DPS)

Figure 3 PSI and DPS of phosphorus in soils under different land use types

地>茶园地。饲草地土壤磷素 DPS 值 11.5%,与其他利用类型土壤差异显著;耕地土壤 DPS 值 10.2%,与其他利用类型土壤差异也显著;茶园地土壤 DPS 值 0.7%,显著低于其他利用类型土壤;林地、荒草地、果园地土壤 DPS 值在 1.9%~4.4%之间,相互间无明显差异。表明饲草地土壤固相表面的固磷点位相对较少,其磷素流失风险相对增强。茶园地土壤 DPS 值仅为饲草地的6%,其固相表面的固磷点位相对较多,磷素流失风险大大降低。

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤磷素积累的影响

土壤磷素养分是自然因子和人为因子共同作用的结果,土地利用方式作为人类各种利用土地活动的综合反映,和土壤磷素养分积累有着密切的联系^[11]。目前磷肥利用率仅有 10%~25%,长期过量施用磷肥将导致磷素在土壤中累积,提高土壤有效磷及易解吸磷量^[14]。刘志祥等^[22]研究显示不同土地利用方式下土壤全磷含量大小顺序为撂荒地>坡耕地>果园、林地,张慧敏等^[23]研究结果为畜牧场>果园地>桑园地>蔬菜地>水田>旱地>水旱轮作地。本研究表明,不同土地利用方式对土壤表层磷素累积量也有着显著影响,全磷含量为人工林地>饲草地>耕地≈果园地>自然林地≈荒草地>茶园地,且人工林地、饲草地和耕地土壤由于较高的有机质含量(表 2)或磷肥施用量(表 1)

导致全磷出现累积趋势。

大量研究^[3,5-6]认为土壤可溶性磷含量存在“临界值”、“警戒值”、“突变点”,当含量超过该值(本文称为磷素流失临界值)时,土壤磷素流失风险将剧增。曹志洪等^[24]报道 Olsen-P 的磷素流失临界值为 25~30 mg·kg⁻¹ 之间,Sims 等^[25]将 Mehlich3-P 流失临界值定为 150 mg·kg⁻¹,钟晓英^[3]研究显示 RDP 流失临界值为 0.14~3.87 mg·kg⁻¹ 之间。本研究显示,研究区内各利用类型土壤 Mehlich3-P 均小于 150 mg·kg⁻¹,但饲草地和耕地土壤 Olsen-P 分别为 49.01、39.97 mg·kg⁻¹,超过了磷素流失临界值,RDP 分别为 6.50、4.53 mg·kg⁻¹,也超过了磷素流失临界值。表明受人为施用磷肥与低坡度(表 1)的影响,饲草地和耕地土壤可溶态磷(Olsen-P 与 RDP)已出现累积,增大了磷素渗流流失风险。为降低耕地与饲草地土壤磷素流失风险,宜采用补偿性施磷或维持性磷肥法^[26]。有研究显示,茶园土壤有效态磷(主要是 Olsen-P)普遍偏高,甚至超过磷素流失临界值^[27-28],但本研究中,茶园地土壤 Olsen-P、RDP 均显著低于其他类型的土壤,其原因是磷肥施用量少(表 1),加之土壤磷素大部分为难溶态的铁磷、铝磷与闭蓄态磷,降低了可溶性磷量。

3.2 土地利用方式对土壤磷素等温吸附的影响

本研究中土壤磷素 Langmuir 等温吸附曲线显示,同等条件下各利用土壤类型吸附外源磷量大小排序大致与有机质含量高低顺序相反,可能是因为有机质含量高的人工林、饲草地、自然林地土壤中有有机胶体与铁、铝氧化物形成络合物,减少铁、铝无机胶体与磷直接反应的几率,并且能够降低这些无机胶体对磷的吸持强度^[29]。

在实验吸附液的磷含量范围内,茶园地土壤表现出极强的吸附外源磷能力,究其原因一是茶园地土壤呈强酸性,铁、铝含量高,能与铁、铝结合形成固定态的磷增多;二是茶园土壤外源磷肥输入(表 1)极少,年施用量不超过 105 kg·hm⁻²,随着土壤磷素的自然耗竭,土壤中大部分磷素吸附点位都处于非饱和状态,其磷素的 DPS 仅为 0.7%(图 3b),极易吸附外源磷。茶园地土壤极强的吸附外源磷能力,与胡艳等^[27]得到的结论不尽相同,可能是由于本研究中茶园土壤磷素含量低(表 2),磷素吸附点位大部分未饱和;胡艳等^[27]研究的茶园土壤磷素含量相对较高,(全 P 0.42 g·kg⁻¹、Olsen-P 31.3 mg·kg⁻¹),使土壤磷素饱和和吸附点位大大增多。

耕地、果园地、自然林地、饲草地及荒草地土壤对

磷素的等温吸附曲线变化几乎一致。随外源磷的增加(吸附液的磷含量增多),土壤吸附固磷量的增幅先增大后逐渐减小,直至趋于零,即土壤对磷素的吸附作用达平衡。其原因在于前期土壤对磷的吸附作用,以无定形铁、铝对磷的化学吸附及粘粒上盐基离子对磷的共价吸附为主,结合能较大;后期土壤对磷的吸附主要发生在多聚铝合物崩裂产生的新点位,或磷取代结构性硅而被吸附,即以物理吸附为主,结合能小^[30]。人工林地土壤磷素的等温吸附曲线类似于耕地等土壤,但土壤的吸磷量受外源磷加入量的影响较耕地等土壤小,这可能与全磷较高(表 2),绝大部分磷素吸附点位已接近饱和有关。本研究也显示,在添加等量外源磷时,自然林地土壤对磷吸附固定量大于人工林地,荒草地土壤磷吸附固定量也大于饲草地。这是由于人为干扰(如践踏或施肥)导致土壤结构较差,增大了可溶性磷饱和度,降低了土壤吸附固磷能力。

3.3 土地利用方式对土壤磷素流失潜力的影响

有研究^[31]表明,土壤磷素最大吸附与土粒比表面、粘粒含量、无定形氧化铁铝化合物与有机质含量密切相关,不同土地利用方式土壤磷素 Q_m 、MBC 不可能一致。胡艳等^[27]研究显示川西地区不同利用方式土壤 Q_m 值大小顺序为茶园地>水田>林地>旱地;赵阳^[32]报道泉州市不同利用方式土壤磷素 Q_m 值大小为旱地>草地>林地;周萍^[28]发现湖北省主要地类土壤的磷素 MBC 大小为荒地>茶园地>青泥田>旱地>水稻土。本研究显示,土地利用方式对土壤磷素吸附与土壤缓冲能力有明显影响,七类利用方式土壤中,茶园地土壤磷素 Q_m 、MBC 值都显著高于其他利用类型;人工林地土壤磷素 Q_m 、MBC 均显著低于其他利用类型;其余利用类型土壤介于二者之间。这与周萍^[28]的研究结果类似。土壤磷素 Q_m 、MBC 越大,磷素流失潜能越小,且只有 Q_m 高、MBC 也较高时,土壤中磷素才不易流失^[33]。因此,就土壤磷素 Q_m 、MBC 而言,研究区人工林地土壤磷素流失潜力最大,其次为耕地、果园、草地与自然林地土壤,茶园土壤的磷素流失潜力最小。

水体富营养化的磷素阈值为 20 μg·L⁻¹,当土壤磷素 EPC₀ 值大于此值时,土壤磷素易成为地表或地下水体中磷的重要来源^[34]。本实验结果显示滇江小流域土壤 EPC₀ 值均大于 20 μg·L⁻¹,说明在一定条件下研究区内土壤磷素易成为地表或地下水体中磷的重要来源,若有外源磷输入流失风险仍较大。7 种利用方式土壤磷素 EPC₀ 值差异也较大,如人工林地土壤

磷素 EPC_0 值最高,其次是饲草地,分别比其他利用方式土壤显著高 0.88~8.48 倍,表明人工林地与饲草地土壤磷素较易随地表径流或渗漏途径流失进入地表或地下水体。

土壤吸持磷能力是有限的,随着其吸磷量增多,土壤 DPS 逐渐升高。因此,可将 DPS 视作磷的土壤净容量,用以评估土壤固磷能力及磷流失风险^[20]。欧洲多国普遍认为 DPS 达 25% 时,土壤磷素容易流失^[35],国内也有将 DPS 15% 作为土壤磷素流失的临界值的研究^[36],但土壤 DPS 值大小与土壤性质、当地的水文特征等多种因素有关,因此较难采用一个固定的土壤 DPS 临界值。土壤磷素 PSI 值也存在一“临界值”(约为 25),若 PSI 值低于 25,一旦有外源磷素进入,土壤 RDP、BAP 和 EPC_0 等都会大幅增加,且 PSI 值越小土壤磷越易流失^[19]。本研究结果显示,供试土壤的 DPS 值介于 0.7%~11.5%,说明研究区土壤磷的吸持饱和度相对较低,但饲草地、耕地土壤磷素 DPS 值接近 12%,显著较高,表明饲草地与耕地土壤磷流失潜力相对高于其他利用方式土壤。供试土壤磷素 PSI 值都低于 25,说明研究区若有外源磷加入,各利用类型土壤磷素都存在不同程度的流失风险,与胡艳等^[27]的结论基本一致。

因此,综合分析 7 类利用类型土壤磷素的 Q_m 、MBC、 EPC_0 、DPS 与 PSI 值可知,在本研究条件下,滇江流域人工林地、饲草地与耕地土壤磷素流失风险较高,果园、荒草地、自然林地土壤磷素的流失风险较低,茶园土壤磷素几乎无流失风险。

4 结论

(1)土地利用方式对土壤磷素积累影响显著。人工林地、饲草地与耕地土壤全磷呈现积累趋势,饲草地和耕地的 Olsen-P 明显积累,超过了磷素流失临界值,人工林地、饲草地和耕地土壤 RDP 也明显积累,超过了磷素流失临界值。

(2)Langmuir 等温式适宜描述滇江流域土壤磷素的吸持过程。茶园地土壤的吸附固磷能力极强,耕地、果园地、人工林地与草地土壤的吸附固定磷能力则较弱,尤其是人工林地。

(3)在本研究条件下,滇江流域人工林地、饲草地与耕地土壤磷素流失风险较高,宜采用补偿性施磷或维持性磷肥法;果园、荒草地、自然林地土壤磷素含量较低,茶园土壤磷素几乎无流失风险,急需施用磷肥以促进植株生长。

参考文献:

- [1] Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2):227-293.
- [2] 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 CSAE*, 2011, 27(6):59-65.
- [3] 钟晓英,赵小蓉,鲍华军,等.我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值[J]. *生态学报* 2004, 24(10):2275-2280.
ZHONG Xiao-ying, ZHAO Xiao-rong, BAO Hua-jun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils: I. Leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2275-2280.
- [4] Liu Z R, Zhang C P, Li Z W, et al. Output characteristics of non-point nitrogen and phosphorus from a typical small watershed in Yimeng Mountains areas during a rainstorm[J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2012, 3(5):15-18.
- [5] 崔力拓,李志伟.洋河流域典型旱坡地土壤磷素淋失风险研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6):2419-2422.
CUI Li-tuo, LI Zhi-wei. Risk of phosphate leaching from soil of the typical dry-slope farmland of Yanghe watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2419-2422.
- [6] Fang F, Brezonik P L, Mulla D J, et al. Estimating runoff phosphorus losses from calcareous soils in the Minnesota River Basin[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6):1918-1929.
- [7] Indiat R, Sharpley A N. Soil phosphorus sorption and simulated runoff parameters as affected by fertilizer addition and soil properties[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26(15/16):2319-2331.
- [8] Zhou M F, Li Y C. Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern everglades and adjacent farmlands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 65(5):1404-1412.
- [9] Allen B L, Mallarino A P, Klatt J G, et al. Soil and surface runoff phosphorus relationships for five typical USA Midwest soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(2):599-610.
- [10] Allen B L, Mallarino A P. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2006, 70(2):454-463.
- [11] 罗春燕,张维理,雷秋良,等.农村土地利用方式对嘉兴土壤氮磷含量及其垂直分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10):2098-2103.
LUO Chun-yan, ZHANG Wei-li, LEI Qiu-liang, et al. Effects of rural land uses on contents and vertical distribution of nitrogen, phosphorus in the soil profile in Jiaxing region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2098-2103.
- [12] 张瑞龙,吕家珑,刁展.秦岭北麓两种土地利用下土壤磷素淋溶风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1):121-127.
ZHANG Rui-long, LÜ Jia-long, DIAO Zhan. Prediction of soil phosphorus leaching risk under two types of land use in northern area of Qinling Mountains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):121-127.
- [13] 张国林,钟继洪,曾芳,等.土壤磷素的流失风险研究[J]. *农业环*

- 境科学学报, 2007, 26(5): 1917-1923.
- ZHANG Guo-lin, ZHONG Ji-hong, ZENG Fang, et al. Risk assessment on phosphorus potential loss in agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1917-1923.
- [14] 王艳玲, 何园球, 吴洪生, 等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 880-887.
- WANG Yan-ling, HE Yuan-qiu, WU Hong-sheng, et al. Environmental risk analysis of accumulated phosphorus in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 880-887.
- [15] 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.
- LU Ru-kun. The analysis method about agricultural chemistry of soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] Bortolon L, Gianello S, Welter S, et al. Simultaneous extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils and potassium recommendations for crops in southern Brazil[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 365-372.
- [17] 付强, 尹澄清, 马允源. 源头农业区不同类型水塘中水体沉积物磷吸附容量[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 70-76.
- FU Qiang, YIN Cheng-qing, MA Yun-yuan. Phosphorus sorption capacities of pond sediments in a headstream agricultural watershed[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(4): 70-76.
- [18] Kuo S, Jellum E J, Pan W L. Influence of phosphate sorption parameter of soils on the desorption of phosphate by various extractants[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(4): 974-979.
- [19] Taylor A W, Kunishi H M. Phosphate equilibria on stream sediments and soil in a watershed draining agricultural region[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1971, 19(5): 827-831.
- [20] 周慧平, 高超, 王登峰, 等. 巢湖流域农田土壤磷吸持指数及吸持饱和度特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 386-389.
- ZHOU Hui-ping, GAO Chao, WANG Deng-feng, et al. Phosphorus sorption and saturation in topsoil of Chaohu Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl): 386-389.
- [21] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T, et al. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. *Soil and Water Cons*, 1996, 51(2): 160-166.
- [22] 刘志祥, 江长胜, 祝滔. 缙云山不同土地利用方式对土壤全磷和有效磷的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 140-145.
- LIU Zhi-xiang, JIANG Chang-sheng, ZHU Tao. Effect of different land use patterns on soil total phosphorus and available phosphorus in Jinyun Mountain[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2013, 35(3): 140-145.
- [23] 张慧敏, 章明奎. 城市复合土地利用系统中土壤磷素的积累和流失潜力的空间分异[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2008, 34(4): 453-460.
- ZHANG Hui-min, ZHANG Ming-kui. Spatial heterogeneity in accumulation and loss potential of soil phosphorus in urban complex land use system[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2008, 34(4): 453-460.
- [24] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 I. 稻田土壤磷素径流迁移流失特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 799-804.
- CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment; I. Characteristics of soil P losses from paddy fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 799-804.
- [25] Sims J T, Maguire R O, Leytem A B, et al. Evaluation of Mehlich 3 as an agri-environmental soil phosphorus test for the Mid-Atlantic United states of America[J]. *Soil Science of America Journal*, 2002, 66(6): 2016-2032.
- [26] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 111-151.
- SHEN Shan-min. Soil fertility of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 111-151.
- [27] 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.
- [28] 周萍. 土壤磷素流失影响因子及流失潜力评价指标研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- ZHOU Ping. Study on impact factors and potential evaluation index of soil P loss in runoff[D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [29] 夏汉平, 高子勤. 磷酸盐在土壤中的竞争吸附与解吸机制[J]. 应用生态学报, 1993, 4(1): 89-93.
- XIA Han-ping, GAO Zi-qin. Mechanisms of competitive adsorption and desorption of phosphate in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(1): 89-93.
- [30] Syers J K, Iskander I K. Soil phosphorus chemistry [C]// Modeling wastewater reservation. New York: E and F N Spon Ltd., 1981: 571-599.
- [31] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报, 2010, 11(41): 1374-1381.
- ZHOU Ming-hua, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 11(41): 1374-1381.
- [32] 赵阳. 泉州市土壤磷素分布及磷流失风险分析[D]. 福建: 华侨大学, 2011.
- ZHAO Yang. Distribution of phosphorus and environmental risk of soil phosphorus loss in Quanzhou City[D]. Fujian: Huaqiao University, 2011.
- [33] 张红爱. 太湖地区典型水稻土土壤磷素径流流失及其吸持特征的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(18): 7788-7792.
- ZHANG Hong-ai. Research on P runoff loss in paddy soils in the Taihu Lake region and its sorption characters[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(18): 7788-7792.
- [34] Foy R H, Withers P J A. The contribution of agricultural phosphorus to eutrophication[M]. Proceedings No. 365 of the Fertilizer Society, 1995: 1-32.
- [35] Lookman R, Jansen K, Merckx R, et al. Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters a transect study in northern Belgium[J]. *Geoderma*, 1996, 69(3/4): 265-274.
- [36] 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 environmental impact of phosphorus on water by a long-term applying fertilizer P in upland fields of yellow soils areas and its risks evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 838-844.