

集约经营雷竹林土壤磷素状况及流失潜能

陈 闻^{1,2}, 吴家森¹, 许开平², 姜培坤^{1,2}

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为了解集约经营雷竹 *Phyllostachys praecox* 林土壤磷素状况及流失风险, 从浙江省临安市太湖源镇 10 块典型的雷竹林地采集土壤样品。通过等温吸附实验及利用 Langmuir 等温方程, 对雷竹林土壤磷的流失阈值及流失潜能进行了探讨。结果表明: 10 块雷竹林地的土壤有效磷质量分数平均为 $169.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。用 Langmuir 等温方程来拟合, 相关性达到极显著水平 ($R^2 = 0.987 \sim 0.999$)。所有调查样地土壤的磷零点吸附平衡质量浓度 (C_{EPC0}) 值远远超过了 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 磷吸附饱和度 (D_{PS}) 平均值为 46.18%, 最高的达 82.94%, 有 7 块样地的 D_{PS} 值明显高出临界值 (25.00%)。土壤有效磷与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 呈极显著线性相关, 雷竹林土壤发生磷素流失的有效磷“阈值”为 $52.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 10 块样地中有 9 块样地的有效磷质量分数超过了阈值, 最高的达到该“阈值”的 5.5 倍。通过 Langmuir 方程, 求得雷竹林土壤的标准需磷量为 $8.14 \sim 64.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均为 $27.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。图 2 表 2 参 29

关键词: 土壤学; 雷竹; 土壤磷; 阈值; 流失潜能

中图分类号: S714.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)05-0687-07

Soil phosphorus and potential loss in *Phyllostachys praecox* stands with intensive management

CHEN Wen^{1,2}, WU Jia-sen¹, XU Kai-ping², JIANG Pei-kun^{1,2}

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environment and Resource, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To reveal the soil phosphorus (P) status and its leaching risk for *Phyllostachys praecox* stands under intensive management with winter mulching and excessive fertilization, 10 compositing surface (0–30 cm) soil samples were collected in typical sites located across 5 villages in Lin'an, Zhejiang. The soil P loss threshold value and its potential for *Ph. praecox* stands were then determined by isothermal adsorption-desorption and the Langmuir isotherm equation. Results showed that the average available phosphorus for the ten soils sampled was $169.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Some good fitting Langmuir equations with R^2 ranged between 0.987–0.999** were yielded. For six sites, Equilibrium Phosphorus Concentration at Zero Sorption (C_{EPC0}) $> 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; the average Degree of Phosphorus Saturation (D_{PS}) of ten sites was 46.18% with 82.94% being the highest and seven sites being higher than the critical value 25% greatly. There was also a significant linear correlation ($R^2 = 0.835^{**}$) between the $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Bray-P. The threshold Bray-P for phosphorus leaching from soils was $52.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and with nine out of ten sites were higher than the threshold, and the highest was 5.45 times greater than this threshold. By application of Langmuir equation calculating the phosphate requirement for *Ph. praecox* stands was $8.14 \sim 64.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ with an average of $27.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. [Ch, 2 fig. 2 tab. 29 ref.]

Key words: soil science; *Phyllostachys praecox*; soil phosphorus; threshold value; loss potential

收稿日期: 2010-12-23; 修回日期: 2011-02-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-006); 浙江省水利厅科技计划项目(RC1019)

作者简介: 陈闻, 从事土壤与水土保持研究。E-mail: ssdchenwen@163.com。通信作者: 姜培坤, 教授, 从事土壤与环境学研究。E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

目前, 农业面源污染已成为水体污染的重要污染源, 它对水体富营养化的贡献已超过了城市和工业点源污染^[1]。2010年中国主要污染物排放总量中, 总氮和总磷分别为472.89万t和42.32万t^[2]; 其中, 来自农业面源的分别达270.46万t和28.47万t, 占到总量的57.19%和67.27%。马立珊等^[3]和王玉梅等人^[4]的研究均表明, 部分地区农田当中氮、磷养分流失对水体富营养化的影响程度已经占了首位。磷是水体富营养化的限制因子, 当水质总磷质量浓度大于0.02 mg·L⁻¹, 即视为富营养化^[5]。土壤磷能以地表径流和渗漏流失的方式向水体迁移, 因此, 治理水体富营养化的关键就在于减少土壤养分流失, 尤其是关于磷素流失过程、机制以及防治措施等方面的研究日益受到国内外学者的重视^[6-7]。研究表明^[8]: 在土壤有效磷含量较低的情况下, 其流失量也往往较小, 而当有效磷含量超过某一临界值时, 磷的流失量则显著增加。Langmuir等温方程可以用来表征土壤磷吸附解吸特性, 通过此方程可以计算得到土壤对磷的最大吸附量(x_{\max}), 磷吸附饱和度(D_{IS}), 易解吸磷(R_{DP}), 磷零点吸附平衡浓度(C_{EPC0}), 流失“阈值”等参数, 从而对土壤磷素流失的风险进行评价。雷竹 *Phyllostachys praecox* 是中国优良的笋用竹, 在长江以南多个省市均有分布^[9]。近十几年来, 雷竹集约化栽培过程中, 肥料用量相当大, 化肥和有机肥(厩肥)的用量分别高达3 t·hm⁻²·a⁻¹和100 t·hm⁻²·a⁻¹^[10]。超量施肥已使竹林土壤养分严重积累, 磷素积累尤为突出^[11]。研究指出^[12], 覆盖雷竹园的土壤有效磷质量分数高达436.67 mg·kg⁻¹, 远远高出南京市郊集约化蔬菜地土壤的有效磷质量分数(67.89 ~ 86.78 mg·kg⁻¹)^[13]。目前, 有关土壤磷素流失的研究大多集中在水稻 *Oryza sativa* 和蔬菜地等农田土壤, 而对于高投入、高产出的林地土壤则很少有报道。前人已经对集约经营雷竹林土壤磷素的时空变化以及对周边水体的影响进行了研究, 但关于雷竹林土壤磷素发生流失的“阈值”以及流失潜能, 尚不清楚。因此, 本试验从浙江省临安市太湖源镇5个村采集了10份有代表性的雷竹林地土壤样品, 对磷素的流失潜能进行了分析, 为指导雷竹林地合理施肥和减少周边水体污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

采样区设在浙江省临安市太湖源镇, 属北亚热带季风气候。年平均降水量为1 628 mm, 多年平均气温为15.8 ℃, 7月平均气温为28.1 ℃, 1月平均气温为3.4 ℃, 极端最高气温和极端最低气温分别为41.9 ℃和-13.3 ℃, 平均日照时数为1 939 h, 无霜期为234 d。土壤类型为发育于砂页岩的红壤, 土壤质地适中, 土层疏松, 保水保肥能力强。采样地基本情况见表1。

表1 土壤采样地基本情况

Table 1 Basic properties of soil of *Phyllostachys praecox* sampling fields

编号	采样地点	纬度(N)	经度(E)	pH值	有机质/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
1	指南村	30°28'43"	119°40'20"	3.8	38.2	296.0	227.0	112.0
2	众社村	30°21'07"	119°39'3"	3.7	41.7	208.0	286.0	176.0
3	众社村	30°21'19"	119°37'57"	4.5	33.6	328.0	163.0	272.0
4	众社村	30°18'53"	119°43'35"	5.3	36.1	143.0	18.5	25.0
5	青云村	30°24'06"	119°41'51"	4.7	55.1	268.0	68.0	350.0
6	青云村	30°24'31"	119°42'15"	3.9	33.7	166.0	216.0	186.0
7	南庄	30°26'38"	119°32'44"	4.3	41.0	183.0	155.0	195.0
8	上阳村	30°28'17"	119°35'22"	4.0	64.4	262.0	194.0	203.0
9	上阳村	30°20'06"	119°42'28"	4.3	56.5	218.0	186.0	375.0
10	上阳村	30°21'56"	119°43'53"	5.3	27.5	157.0	179.0	150.0
平均值				4.4	42.8	222.9	169.3	204.4
标准差				0.6	11.3	59.8	73.1	99.9

1.2 土样采集及分析方法

于 2008 年 10 月, 用自制采样器 S 形法多点采集土壤样品, 采样深度为 30 cm。土样经风干过筛后备用。分析方法如下: 土壤 pH 采用水浸提酸度计法(土:水 = 1:5); 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法; 碱解氮采用扩散法; 有效磷采用 HCl-NH₄F 浸提, CaCl₂-P 用 0.01 mol·L⁻¹ 氯化钙溶液浸提, 钼锑抗比色法; 速效钾采用醋酸铵浸提, 火焰光度计法^[14]。所得试验数据采用 Excel 和 DPS 软件进行统计分析。

1.3 等温吸附试验

上述 10 份土样过 2 mm 筛后, 称取 2.5 g(各 7 份)于 100 mL 离心管中, 分别加入含磷量为 0, 5, 10, 20, 30, 50, 75 mg·L⁻¹ 的 0.01 mol·L⁻¹ 氯化钙溶液 50 mL, 同时加入 3 滴甲苯, 抑制微生物活动, 在 25 °C 下振荡 24 h, 过滤后测定平衡溶液的磷质量分数(C)。根据试验前后溶液磷质量分数的变化计算土壤对磷的吸附量 (X)及平衡液磷质量分数与土壤磷吸附量的比值 (C/X), 用 Langmuir 等温吸附方程: $C/X = C/X_{\max} + 1/(k \cdot X_{\max})$ 来拟合, 得到磷的最大吸附量 X_{\max} , 根据曲线在 y 轴上的截距 $1/(k \cdot X_{\max})$, 可求得与结合能有关的常数 k 。 $k \cdot X_{\max}$ 称为最大缓冲能力 C_{MB} (maximum buffering capacity)。另外, 根据曲线方程和上述参数, 还可以求得易解吸磷 R_{DP} , 磷零点吸附平衡质量浓度 C_{EPCO} , 磷吸附饱和度 D_{IS} 等评价指标, 其中, R_{DP} 是用来描述土壤磷在水土界面迁移能力的指标, 即本试验中加磷量为 0, 直接用 0.01 mol·L⁻¹ 氯化钙溶液提取的磷数量; D_{IS} 是指土壤有效磷含量与最大吸附量的比值, 是磷的土壤环境容量; C_{EPCO} 是土壤溶液中的磷在达到吸附与解吸动态平衡时的质量浓度, 即等温吸附曲线与 X 轴的交点^[15]。

2 结果与分析

2.1 集约经营雷竹林土壤磷素积累特征

对临安市太湖源镇 5 个村 10 块雷竹林地土壤磷素积累状况分析结果表明(表 1): 土壤有效磷质量分数为 18.5~286.0 mg·kg⁻¹, 平均为 169.3 mg·kg⁻¹。10 块雷竹林地中, 有效磷超过 100 mg·kg⁻¹ 的占到调查总数的 80%, 其中有 3 块雷竹林地的有效磷超过 200 mg·kg⁻¹, 质量分数最高的 2 号样地是质量分数最低的 4 号样地的 15.5 倍。除了 4 号样地, 其他样地土壤的有效磷质量分数均远远高出土壤养分分级的一级标准 (40 mg·kg⁻¹), 其中 2 号样地更是达到了一级标准的 7.2 倍。可见, 雷竹林地在长期大量施肥和冬季覆盖的集约经营模式下, 土壤磷素严重盈余。如此高的有效磷水平, 不仅会降低雷竹笋品质, 而且对周边水体环境也将造成威胁。

2.2 集约经营雷竹林土壤磷素等温吸附特征

用 Langmuir 方程来拟合各土壤的等温吸附特征, 其相关性均达到极显著水平 ($R^2 = 0.987\sim 0.999$), 说明用该方程来表征雷竹林土壤磷素吸附特征并据此计算其他相关参数是可行的。表 2 是各样地土壤磷素的流失风险评价指标。由表 2 可看出, 各土壤的 X_{\max} 为 285.7~714.3 mg·kg⁻¹, 平均为 433.1 mg·kg⁻¹, 4 号样地的 X_{\max} 值最大, 土壤固磷能力的大小可用 X_{\max} 来表征; k 值的变化范围为 0.051 0~0.353 8, 平均为 0.162 5, 其大小主要与土壤性质、磷素形态及温度有关, k 值越大, 代表土壤吸附性能越强; C_{MB} 值最小的是 2 号样地土壤, 为 18.28 mg·kg⁻¹, 最大的 7 号样地, 为 196.08 mg·kg⁻¹, 平均为 73.09 mg·kg⁻¹; R_{DP} 值的变化范围为 1.910~9.940 mg·kg⁻¹, 平均为 5.175 mg·kg⁻¹; C_{EPCO} 为 0.07~1.81 mg·L⁻¹, 平均为 0.77 mg·L⁻¹, 这两者都可以用来评价磷素流失的风险大小, R_{DP} 和 C_{EPCO} 的值越大, 表明磷素进入土壤溶液越容易, 流失的风险越大; 各样地土壤的 D_{IS} 为 2.59%~82.94%, 平均为 46.18%, D_{IS} 值不仅表明了当前土壤磷吸附的饱和程度, 也可以用来预测磷素释放的潜能。从本试验结果来看, R_{DP} , C_{EPCO} 和 D_{IS} 值随土壤有效磷质量分数的增加而增加, 其中 2 号样地土壤的 R_{DP} , C_{EPCO} 和 D_{IS} 值均为最高。

有研究认为^[16]: 平衡质量浓度为 0.2 mg·L⁻¹ 时土壤的吸磷量可以作为磷肥用量的参考标准, 称为指导施磷量或标准需磷量 (P_{SR})。通过 Langmuir 方程求得各雷竹林土壤的标准需磷量在 8.14 ~ 64.66 kg·hm⁻², 平均为 27.41 kg·hm⁻²(按 1.00 mg·kg⁻¹ 相当于 2.25 kg·hm⁻² 计算^[15]), 同时, 还可以看出, C_{MB} 值较大的 5 号和 7 号土样, 其需磷量也较其他样地土壤要大。目前, 雷竹生产上, 施入林地的复合肥用量为 2 250 kg·hm⁻²·a⁻¹ 左右, 折合纯磷用量约为 157 kg·hm⁻²·a⁻¹ (N:P₂O₅:K₂O = 16:16:16)^[17], 约为标准需磷量的 2.43~19.29 倍。因此, 应该根据雷竹林土壤本身的磷素状况来确定施肥量, 这样不仅可以避免磷素过多积累, 同时也能够降低对环境污染的风险。

表2 雷竹林地土壤磷素等温吸附特征

Table 2 Phosphorus isotherm sorption characteristics of soil of *Phyllostachys praecox* stands

土样号	Langumir 方程	R^2	$X_{\max} /$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	k	$C_{\text{MB}} /$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$R_{\text{DP}} /$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$C_{\text{EPD}} /$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$D_{\text{rs}}/\%$	$P_{\text{SR}} /$ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
1	$C/X = 0.003\ 3C + 0.050\ 3$	0.987	303.0	0.065\ 6	19.88	7.378	1.49	74.91	8.83
2	$C/X = 0.002\ 9C + 0.054\ 7$	0.990	344.8	0.053\ 0	18.28	9.940	1.81	82.94	8.14
3	$C/X = 0.002\ 6C + 0.013\ 2$	0.989	384.6	0.197\ 0	75.76	2.938	0.19	42.38	32.80
4	$C/X = 0.001\ 4C + 0.011\ 3$	0.993	714.3	0.123\ 9	88.50	2.255	0.61	2.59	38.86
5	$C/X = 0.002\ 3C + 0.006\ 5$	0.995	434.8	0.353\ 8	153.85	1.910	0.07	15.64	64.66
6	$C/X = 0.003\ 5C + 0.015\ 1$	0.999	285.7	0.231\ 8	66.23	7.293	0.29	75.60	28.48
7	$C/X = 0.001\ 5C + 0.005\ 1$	0.987	666.7	0.294\ 1	196.08	2.682	0.14	23.25	42.86
8	$C/X = 0.002\ 0C + 0.039\ 2$	0.989	500.0	0.051\ 0	25.51	7.293	1.69	38.80	11.36
9	$C/X = 0.002\ 6C + 0.026\ 1$	0.998	384.6	0.099\ 6	38.31	5.414	0.94	48.36	16.90
10	$C/X = 0.003\ 2C + 0.020\ 6$	0.994	312.5	0.155\ 3	48.54	4.646	0.48	57.28	21.19
平均值		0.992	433.1	0.162\ 5	73.09	5.175	0.77	46.18	27.41
标准差		0.004	142.8	0.099\ 6	56.44	2.594	0.64	25.69	16.27

2.3 集约经营雷竹林土壤磷素流失潜能分析

土壤磷素的流失临界值因土壤性质而异。钟晓英等^[18]对中国 23 个土壤磷素流失的研究表明：不同土壤的磷素流失临界值差异很大，发生磷流失的 Olsen-P 为 29.96~156.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Hesketh 等研究认为^[19]：不同土壤的磷素流失的临界值可为 10~119 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。刘利花等^[20]研究了瘠土磷素的流失特征，当土壤耕层中 Olsen-P 质量分数达 23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，磷素开始流失。水稻土磷环境敏感临界值在好气条件下，为 Olsen-P 50~75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，Bray-P 90~140 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；而在厌气条件下，则为 Olsen-P 35~45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，Bray-P 75~115 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21]。蔬菜地土壤磷素发生流失的 Olsen-P 阈值为 56.00~76.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[22-23]。

研究认为^[24-25]：土壤 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间有着非常好的相关性，可以用 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钙溶液浸提磷来估算土壤磷的解吸量，从而来评价磷素流失的风险。据王彩绒等^[26]报道：土壤 Bray-P 质量分数较低时， $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 几乎为 0，当 Bray-P 超过某一数值时， $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 开始急剧增加，与 Bray-P 呈极显著线性关系，用 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 为非 0 的数据与 Bray-P 建立回归方程，求方程在 X 轴上的截距，得到土壤发生磷素流失的 Bray-P 临界值为 60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

本试验 10 块样地的土壤有效磷质量分数为 18.5~286.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 质量分数为 0.096~0.497 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ （去除了 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 质量分数为 0 的 4 号土样），以有效磷质量分数为 X 轴， $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 质量分数为 Y 轴，进行线性回归分析，得到回归方程： $y = 0.002\ 1x - 0.110\ 3$ ， $R^2 = 0.835\ 2^{**}$ ， $n = 9$ （图 1）。结果表明：雷竹林土壤的有效磷质量分数与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 质量分数呈极显著线性相关，求上述方程与 X 轴的交点，为 52.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，该值即为供试雷竹林土壤发生磷素流失的有效磷“阈值”，同时，可以看出，90% 的样地土壤有效磷质量分数明显高于流失临界值，其中最高的 2 号样地已达到该“阈值”的 5.5 倍。

从 10 块雷竹林地的土壤 C_{EPD} 值看，有 60% 的样地远远超过了水体总磷浓度富营养化限值 0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这表明雷竹林土壤磷素在一定条件下，可以成为产区周边水体磷的重要来源。由此可见：雷竹林土壤磷素具有很大的流失潜能，长期大量施肥，不仅导致土壤磷素积累，并且会降低土壤对磷的吸附能力，从而增加土壤的渗漏率^[27]。

有研究指出^[28-29]：当土壤磷吸附饱和度 (D_{rs}) 超过 25% 时，磷流失的风险将大大增加。据此，一些国家把 D_{rs} 为 25% 作为土壤磷素流失的临界值，而一般认为各种土壤的 D_{rs} 临界值为 25%~40%。从本试验结果来看，磷吸附饱和度随着土壤有效磷质量分数增加而呈极显著线性增加，相关系数达 0.850（图 2）。10 块样地土壤的磷吸附饱和度平均值为 46.18%，最高的达到 82.94%，有 7 块土壤的 D_{rs} 值已经远远超过了流失阈值 25%。这也进一步说明，雷竹林地磷库饱和程度普遍较高，存在较高的流失风险。

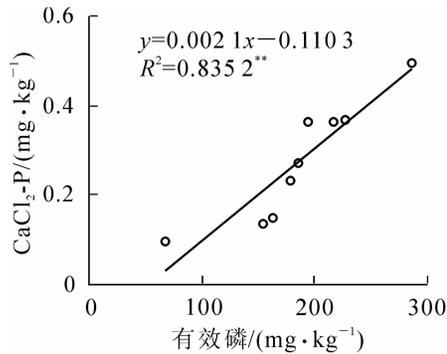
图 1 土壤有效磷与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的关系

Figure 1 Relationship between $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Bray-P in soil of *Phyllostachys praecox* stands

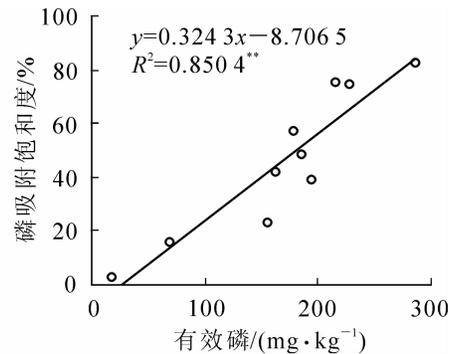


图 2 土壤有效磷与磷吸附饱和度的关系

Figure 2 Relationship between Bray-P and D_{PS} in soil of *Phyllostachys praecox* stands

3 结论

雷竹林地在集约经营模式下，土壤磷素普遍严重积累。10 块雷竹林调查样地的土壤有效磷平均质量分数为 $169.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，远远高出有效磷养分一级标准 ($40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，最高的达到一级标准的 7.2 倍。用 Langmuir 等温方程来拟合，相关性达到极显著水平 ($R^2 = 0.987\sim 0.999$)，有 6 块样地的磷零点吸附平衡质量浓度 (C_{EPC0}) 值远远超过了水体磷质量浓度富营养化限值 ($0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，磷吸附饱和度 (D_{PS}) 平均值为 46.18%，最高的达 82.94%，有 7 块样地的磷吸附饱和度值已经显著高于吸附饱和度的临界值 25%。土壤有效磷与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 呈极显著线性相关，通过两者的回归方程，求得雷竹林土壤发生磷素流失的有效磷“阈值”为 $52.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有 9 块样地的有效磷质量分数超过了该临界值，其中最高的已达到该阈值的 5.5 倍。以平衡质量浓度为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的磷吸附量作为磷肥施用量的依据。通过 Langmuir 方程求得各雷竹林土壤的标准需磷量在 $8.14 \sim 64.66 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，平均为 $27.41 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此，雷竹林地具有很高的磷素流失潜能，应加强对林地经营措施的管理，控制施肥量，减少磷素进入水体的风险。

参考文献：

- [1] 冉江华, 黄洁. 农业面源污染研究现状及发展趋势[J]. 山西农业科学, 2009, **37** (3): 7 - 10.
RAN Jianghua, HUANG Jie. Research situation and prospect of agricultural non-point source pollution [J]. *J Shanxi Agric Sci*, 2009, **37** (3): 7 - 10.
- [2] 宋家永, 李英涛, 宋宇, 等. 农业面源污染的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, **26** (11): 362 - 365.
SONG Jiayong, LI Yingtao, SONG Yu, et al. Research and prospect on non-point pollution from agriculture [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26** (11): 362 - 365.
- [3] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, **17** (1): 39 - 47.
MA Lishan, WANG Zuqiang, ZHANG Shuiming, et al. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu Lake, Jiangsu [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 1997, **17** (1): 39 - 47.
- [4] 王玉梅, 任丽军, 霍太英, 等. 山东省化肥流失状况及其对水环境污染的影响[J]. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2009, **25** (3): 263 - 266.
WANG Yumei, REN Lijun, HUO Taiying, et al. Chemical fertilizer outflow and its influence on water environmental pollution in Shandong Province [J]. *Ludong Univ J Nat Sci Ed*, 2009, **25** (3): 263 - 266.
- [5] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-1983 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 戴照福, 王继增, 程炯, 等. 流溪河流域菜地土壤磷素特征及流失风险分析[J]. 广东农业科学, 2006 (4): 82 - 84.
DAI Zhaofu, WANG Jizeng, CHENG Jiong, et al. Vegetable plot soil phosphorus characteristics of Liuxi River and its environmental impact [J]. *J Guangdong Agric Sci*, 2006 (4): 82 - 84.

- [7] 宋科, 张维理, 徐爱国, 等. 太湖水网地区不同种植类型农田磷素渗漏流失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15** (6): 1288 - 1294.
SONG Ke, ZHANG Weili, XU Aiguo, *et al.* Phosphorus leaching losses in different planting farmlands in the riverine plain area of Taihu Lake [J]. *Plant Nut Fert Sci*, 2009, **15** (6): 1288 - 1294.
- [8] TURMER B L, HAYGARTH P M. *Practical and Innovative Measures for the Control of Agricultural Phosphorus Losses to Water* [M]. Northern Ireland: Green Mount College of Agriculture and Horticulture, 1998: 152 - 153.
- [9] 方伟, 何钧潮, 卢学可, 等. 雷竹早产高效栽培技术[J]. 浙江林学院学报, 1994, **11** (2): 121 - 128.
FANG Wei, HE Junchao, LU Xueke, *et al.* Intensive cultivation technology of *Phyllostachys praecox* stands [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1994, **11** (2): 121 - 128.
- [10] 孟赐福, 沈菁, 姜培坤, 等. 不同施肥处理对雷竹林土壤养分平衡和竹笋产量的影响[J]. 竹子研究汇刊, 2009, **28** (4): 11 - 17.
MENG Cifu, SHEN Jing, JIANG Peikun, *et al.* Effects of different fertilization on soil nutrient balance and bamboo shoot yield of *Phyllostachys praecox* stands [J]. *J Bamboo Res*, 2009, **28** (4): 11 - 17.
- [11] 孙达, 黄芳, 蔡荣荣, 等. 集约经营雷竹林土壤磷素的时空变化[J]. 浙江林学院学报, 2007, **24**(6): 670 - 674.
SUN Da, HUANG Fang, CAI Rongrong, *et al.* Temporal and spatial variation of soil phosphorus in *Phyllostachys praecox* stands under intensive cultivation management [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, **24** (6): 670 - 674.
- [12] 徐秋芳, 叶正钱, 姜培坤, 等. 雷竹笋营养元素含量及其与土壤养分的关系[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20** (2): 115 - 118.
XU Qiufang, YE Zhengqian, JIANG Peikun, *et al.* Relationship between bamboo-shoot nutrition and soil nutrients [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20** (2): 115 - 118.
- [13] 高秀美, 汪吉东, 刘兆普, 等. 集约化蔬菜地土壤磷素累积特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26** (1): 82 - 82.
GAO Xiumei, WANG Jidong, LIU Zhaopu, *et al.* Accumulation and leaching risk of phosphorus in vegetable soils under intensive cultivation [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2010, **26** (1): 82 - 86.
- [14] 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.
- [15] 黄东风, 邱孝煊, 李卫华, 等. 福州市郊菜地土壤磷素特征及流失潜能分析[J]. 水土保持学报, 2009, **23** (1): 83 - 87.
HUANG Dongfeng, QIU Xiaoxuan, LI Weihua, *et al.* Analysis on characteristics and lost potential of soil phosphorus in vegetable field located at suburb of Fuzhou City [J]. *J Soil Water Conserv*, 2009, **23** (1): 83 - 87.
- [16] FOX R L, KAMPRATH E J. Phosphate isotherms for evaluating the phosphate requirement of soils [J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1970, **34**: 902 - 904.
- [17] 姜培坤, 徐秋芳, 周国模, 等. 雷竹林土壤质量及其演变趋势[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 23 - 30.
- [18] 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 Xiaoying, ZHAO Xiaorong, BAO Huajun, *et al.* The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils (I) leaching criterion [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (10): 2275 - 2280.
- [19] HESKETH N, BROOKES P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. *J Environ Qual*, 2000, **29**: 105 - 110.
- [20] 刘利花, 杨淑英, 吕家珑. 长期不同施肥土壤中磷淋溶“阈值”研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, **31** (3): 123 - 126.
LIU Lihua, YANG Shuying, LÜ Jialong. Studies on “threshold value” of phosphorus leaching in long-term different fertilization soils [J]. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For Nat Sci Ed*, 2003, **31** (3): 123 - 126.
- [21] 章明奎, 周翠, 方利平. 水稻土磷环境敏感临界值的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25** (1): 170 - 174.
ZHANG Mingkui, ZHOU Cui, FANG Liping. Environmentally sensitive thresholds of phosphorus of paddy soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2006, **25** (1): 170 - 174.
- [22] 刘子国, 黄敏, 余萃, 等. 武汉市郊典型利用方式下土壤磷素特征及流失风险分析[J]. 环境科学与技术, 2010, **33** (5): 71 - 74.
LIU Ziguo, HUANG Min, YU Cui, *et al.* Phosphorus characteristics and loss risk assessment under typical land uti-

- lization in the suburbs of Wuhan [J]. *Environ Sci & Technol*, 2010, **33** (5): 71 – 74.
- [23] 姜波, 林咸永, 章永松. 杭州市郊典型菜园土壤磷素状况及磷素淋失风险研究 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2008, **34** (2): 207 – 213.
JIANG Bo, LIN Xianyong, ZHANG Yongsong. Phosphorus status and index for predicting environmental risk of phosphorus leaching in typical vegetable soils of Hangzhou [J]. *J Zhejiang Univ Agric & Life Sci*, 2008, **34** (2): 207 – 213.
- [24] BORLING K, OTABBONG E, BARBERIS E. Soil variables for predicting phosphorus release in Swedish Noncalcareous soil [J]. *J Environ Qual*, 2004, **33** (1): 99 – 106.
- [25] 吕家珑, FORTUNE S, BROOKES P. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究 [J]. 农业环境科学学报, 2003, **22** (2): 142 – 146.
LÜ Jialong, FORTUNE S, BROOKES P. Research on phosphorus leaching from soil and its Olsen-P “Threshold Volume” [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2003, **22** (2): 142 – 146.
- [26] 王彩绒, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型地区蔬菜地土壤磷素淋失风险 [J]. 环境科学学报, 2005, **25** (1): 76 – 80.
WANG Cairong, HU Zhengyi, YANG Linzhang, et al. Risk of phosphate leaching loss from soil of vegetable plot in the typical region of Taihu Lake [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2005, **25** (1): 76 – 80.
- [27] MAGUIRE R O, SIMS J T. Soil testing to predict phosphorus leaching [J]. *J Environ Qual*, 2002, **31**: 1601 – 1609.
- [28] CASSON J P, BENNETT D R, NOLAN S C, et al. Degree of phosphorus saturation thresholds in manure-amended soils of Alberta [J]. *J Environ Qual*, 2006, **35**: 2212 – 2221.
- [29] PAUTLER M C, SIMS J T. Relationship between soil test phosphorus, soluble phosphorus and phosphorus saturation in Delaware soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, **64**: 765 – 773.

欢迎订阅 2012 年《中国农业科学》中、英文版

《中国农业科学》中、英文版由农业部主管、中国农业科学院主办。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种, 耕作栽培·生理生化, 植物保护, 土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境, 园艺, 园林, 储藏·保鲜·加工, 畜牧·兽医等栏目。读者对象是国内外农业科研院(所)、农业大专院校的科研、教学及管理人员。

《中国农业科学》中文版为半月刊, 影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊最前列或前列位次。为北京大学图书馆 1992–2008 年连续 5 次遴选的核心期刊。1999 年起连续 10 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”资助; 1999 年获“首届国家期刊奖”, 2003 年和 2005 年获“第二、三届国家期刊奖提名奖”; 2002 年起 7 次被中信所授予“百种中国杰出学术期刊”称号; 2010 年荣获“第二届中国出版政府奖期刊提名奖”。《中国农业科学》英文版 (*Agricultural Sciences in China*) 2002 年创刊, 月刊, 全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2010 年 *Agricultural Sciences in China* 被 SCIE 收录, 拟于 2012 年 1 月更名为 *Journal of Integrative Agriculture*。

《中国农业科学》中文版大 16 开, 每月 1 日和 16 日出版, 国内外公开发行。224 页/期, 定价 49.50 元, 全年定价 1 188.00 元。国内统一刊号: CN 11-1328/S; 国际标准刊号: ISSN 0578-1752; 邮发代号: 2-138; 国外代号: BM43。《中国农业科学》英文版大 16 开, 每月 20 日出版, 国内外公开发行。160 页/期, 国内订价 36.00 元, 全年 432.00 元。国内统一刊号: CN 11-4720/S; 国际标准刊号: ISSN 1671-2927; 邮发代号: 2-851; 国外代号: 1591M。

地址: 100081 北京中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

电话: 010-82109808, 82106280, 82106281, 82106282; 传真: 010-82106247

网址: www.ChinaAgriSci.com; E-mail: zgnykx@mail.caas.net.cn