

长期有机物循环利用对红壤稻田土壤供磷能力的影响

陈安磊¹, 谢小立¹, 王凯荣², 高超³

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125; 2 青岛农业大学农业生态与环境健康研究所, 山东青岛 266109; 3 湖北省水土保持监测中心, 湖北武汉 430071)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了长期不同施肥处理定位试验土壤供磷能力的差异, 并从土壤磷素平衡、全磷、有机磷、Olsen-P 和 MB-P 的含量的变化等方面探索了导致供磷能力差异的原因。结果表明, 长期施用磷肥能显著提高土壤的供磷能力, 其中以有机物循环利用配合磷肥施用处理土壤的供磷量能力最高, 植株平均吸磷量是长期不施磷肥处理的 3.5 倍, 比长期施用磷肥处理平均高出 59.8%。长期单施氮肥导致土壤供磷能力衰竭, 植株总吸磷量比长期不施肥还低 17.2%。单一有机物循环利用和配施 N 肥植株总吸磷量比长期不施肥分别高 80.3% 和 40.2%。有机物循环利用能明显提高土壤微生物对磷素的固持量, 土壤微生物对无机磷的利用可能是其向有效磷转化的关键途径。磷肥配合系统内有机物循环利用是提高红壤稻田土壤供磷能力的有效施肥模式。

关键词: 红壤性水稻土; 有机物循环利用; 土壤供磷能力; 长期施肥

中图分类号: S147.2; S158

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2008)05-0874-06

Effects of long-term cycling of organic matter on soil phosphorus supplying capacity in a red soil paddy ecosystem

CHEN An-lei¹, XIE Xiao-li¹, WANG Kai-rong², GAO Chao³

(1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China;

2 Institute of Agricultural Ecology and Environmental Health, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China;

3 The Soil and Water Conservation Monitoring Center of Hubei, Wuhan 430071, China)

Abstract: The soil P supplying capacity in red paddy soils of different long-term fertilization systems (1990–2004) was investigated using pot experiment, and the differences of soil P supplying capacity in different fertilization treatments were also studied according to the change of soil P balance, total P, organic P, Olsen-P and MB-P. The results indicated that soil P supplying capacity was significantly increased by long-term chemical P fertilizer application and kept at the highest level in the chemical P fertilizer application combined with long-term cycling of organic matter, at the same time, the average P uptake of plantation in this treatment was 3.5 times than control (no chemical P fertilizer application), and 59.8% higher than chemical P fertilizer application (NP, NPK). In the long-term chemical N fertilizer application treatment, soil P supplying capacity was very low and the total P uptake of plantation was decreased by 17.2% compared with no fertilizer application. In the application of organic matter cycling and organic matter combined with N fertilizer treatments, the total P uptake of plantation were increased by 80.3% and 40.2%, respectively. Long-term organic matter cycling obviously improved microbial fixation of soil P, and it was the key approach for the conversion of inorganic P into extractable P accomplished by microorganisms in paddy soils. Therefore, cycling of organic matter combined with chemical P fertilizer was a good fertilizer management strategy to improve soil P supplying capacity.

收稿日期: 2007-11-05 接受日期: 2008-01-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB121106); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-423); 湖南省自然科学基金(08JJ3090)资助。

作者简介: 陈安磊(1977—), 男, 江苏沛县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤化学和环境污染方面的研究。

Tel: 0731-4615223, E-mail: alchen@isa.ac.cn

Key words : red paddy soil ; cycling of organic matter ; soil P supplying capacity ; long-term fertilization

我国南方的土壤大部分缺磷,60年代的施肥试验确认了施用磷肥的产量效应^[1],从而推动我国农田磷肥的大量投入。稻田是红壤区重要的土地利用方式之一,但磷肥的当季利用率仅有10%~25%^[2],这一方面表明施入的磷肥有75%~90%积累在土壤中,另一方面说明土壤的供磷能力对作物的磷素吸收有重要作用。如何利用简便易行的措施提高土壤磷的有效性,对于减少磷肥施用量和减轻施肥对环境的污染具有重要的意义。

有机肥施用是我国传统农业的主要施肥措施,对土壤磷素的活化作用已有许多报道^[3-4]。一般认为,新鲜的有机物可以对土壤有机质的降解起促进作用,从而加速磷的生物矿化作用。有机残体降解过程中产生的有机酸或其他螯合剂可以把被Ca、Fe、Al固定的磷释放出来;分解产生的CO₂可以增大磷酸钙及磷酸镁的溶解性;最终形成的腐殖素可以在Fe、Al氧化物及粘土矿物表面形成保护层,减少磷酸盐的固定。另外,磷酸根可通过钙桥和有机质以较弱的力结合,使磷保持相对较高的植物有效性。

近年来,微生物对土壤磷素转化及其有效性的调节作用日益受到重视。有试验表明,在添加有机物料的条件下,土壤微生物迅速的吸收利用所加入的无机磷,在30 d培养时间内50%以上的土壤微生物磷来自加入的无机磷^[5];在提高土壤微生物生物量及其对土壤磷素吸收的同时,促进了固定态无机磷特别是Al、Fe结合态磷的活化^[6]。但微生物对土壤无机磷的活化研究多集中在室内培养试验,在大田长期定位试验条件下,微生物对土壤磷素活化作用及在土壤供磷能力的变化中的贡献研究较少。为此,采用盆栽试验,在土壤磷素平衡和磷素形态变化的基础上,研究了大田长期定位试验条件下土壤微生物在土壤供磷能力产生差异中所起的作用,为合理利用磷肥提供研究依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样来源

盆栽试验用土为第四纪红色粘土发育的水稻土,系于2004年早稻成熟期采自中国科学院桃源农业生态试验站施肥制度长期定位试验田中的8个处理表层土(0—20 cm),即:1)不施化肥,收获物全部移出系统(CK);2)不施化肥,收获物中养分循环利

用(CY收获物中养分循环利用简称“C”);3)施化肥N,收获物移出系统(N);4)在施化肥N的基础上,收获物中养分循环利用(N+C);5)施化肥N、P,收获物移出系统(NP);6)在施化肥N、P的基础上,收获物中养分循环利用(NP+C);7)施化肥N、P、K,收获物移出系统(NPK);8)在施化肥N、P、K的基础上,收获物中养分循环利用(NPK+C)。处理中凡“+C”处理为冬季种植紫云英(*Astragalus sinicus* L.)春耕时翻作早稻基肥;早晚稻秸秆全部直接还田;生产稻谷的50%(1994年以前为80%)以及全部空秕谷粉碎后喂猪,猪粪尿作为第二年的早稻基肥。该试验田1990年试验前土壤基础肥力性状为:有机碳15.4 g/kg,全氮1.88 g/kg,全磷0.60 g/kg,速效磷16.2 mg/kg,pH 5.74,有机磷166.3 mg/kg。试验田施肥情况:1990~1996年为N 262.5 kg/hm²、P 39.3 kg/hm²、K 137.0 kg/hm²;1997~2004年为N 182.3 kg/hm²、P 39.3 kg/hm²、K 197.2 kg/hm²。所用肥料为尿素(N 45%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和氯化钾(K₂O 60%)。

1.2 试验内容

1.2.1 培养试验 大田8个处理3个重复共取24个土样。土样采回混匀后,一部分新鲜样品先风干至土壤含水量大约相当于饱和持水量的40%,除去动、植物残体,切碎过2 mm筛,在标准条件下(25℃,100%空气湿度的容器内)预培养10 d,用于测定土壤微生物生物量碳和磷。其余的风干后过筛备用,用于测定土壤全磷、速效磷、有机磷等指标。

1.2.2 盆栽试验 每盆装供试的风干土样2.5 kg,共24盆。于水稻移栽前土壤浸水1周,在移栽前1 d施肥。每盆施用0.25 g尿素和0.27 g的氯化钾。移栽后37 d收获(孕穗初期)。测定水稻干物重,茎叶和根的含磷量。

1.3 测定项目与方法

土壤微生物生物量磷(MB-P),采用Brookes等^[7]的方法测定。称取4份土样(4.0 g烘干基),其中2份不熏蒸,2份在真空干燥器中用氯仿蒸汽熏蒸24 h,用反复抽真空方法除去残存氯仿后,全部用80 mL 0.5 mol/L NaHCO₃(pH 8.5)提取(振荡30 min),过滤, Murphy和Riley法^[11]显色后用分光光度计法(UV8500-II型)测定无机磷。同时用外加无机磷酸盐(KH₂PO₄)的方法测定磷的提取回收率。以熏蒸土样与不熏蒸土样提取磷的差值并校正提取回

收率后,除以转换系数 $K_f(0.4)$ 计算土壤 MB-P。

土壤微生物生物量碳(MB-C),采用氯仿熏蒸— K_2SO_4 提取方法^[8]。测定时,称取经预培养相当于烘干重 20.0 g 的新鲜土样,按上述方法熏蒸后,再用 80 mL 0.5 mol/L K_2SO_4 溶液振荡提取 30 min,过滤;提取液中的有机碳用 TOC 自动分析仪(Phoenix-8000)紫外-过硫酸钾氧化法测定。以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机 C 的差值除以转换系数 $K_c(0.45)$ 计算土壤 MB-C。

土壤有机碳(OC)、全磷、提取态磷(Olsen-P)和有机磷分别采用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化法、NaOH 熔融法、0.5 mol/L $NaHCO_3$ (pH 8.5) 提取测定法和灼烧法,植株磷采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 氧化法测定^[11-12]。

所有数据处理均采用 Excel2003 软件和 SAS

6.12 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤全磷含量和稻田生态系统磷素平衡状况

表 1 表明,长期不施肥或单施氮肥稻田土壤全磷含量显著降低,与试验前基础值相比平均降低了 29.2%;而稻田有机物质循环利用(C、N+C 处理)减缓了土壤全磷降低的幅度,只降低了 14.2%。稻田长期施用磷肥(NPK 或 NP 处理)对土壤全磷含量影响甚微,与试验前相比平均提高了 2.5%;施用磷肥配合有机物质循环利用(NP+C 和 NPK+C 处理)能显著提高土壤全磷含量,与试验前相比土壤全磷含量平均提高了 18.3%,差异显著。

表 1 不同处理土壤各形态磷及土壤有机碳含量

Table 1 Content of soil total P, Olsen-P, MB-P, MB-C/P, SOC and organic P with different treatments

处理 Treatment	全磷 Total P (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	土壤微生物量磷 MB-P (mg/kg)	土壤微生物 碳磷比 MB-C/P	土壤有机碳 SOC (g/kg)	土壤有机磷 Soil organic P (mg/kg)
试验前 Before exp.	0.60	16.2		15.4	166.3	
CK	0.43 de	4.7 e	17.3 c	47	15.4 c	196 de
C	0.50 de	6.8 d	22.2 bc	61	18.8 b	245 bc
N	0.42 e	4.1 e	16.0 c	56	15.8 c	192 e
N+C	0.53 cd	6.6 d	22.5 bc	59	20.1 ab	228 bcde
NP	0.63 ab	23.8 b	24.9 bc	42	16.9 bc	236 bed
NP+C	0.71 a	29.1 a	36.1 a	45	21.3 ab	294 a
NPK	0.60 bc	16.4 c	17.9 c	48	17.2 bc	215 cde
NPK+C	0.71 a	30.3 a	29.7 ab	51	21.7 a	268 ab

注(Note):同一列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平,下同。Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level. The same below.

经 15 年定位试验的土壤磷素收支平衡结果(表 2)可以看出,不同施肥模式下稻田土壤磷素平衡存在明显差异。长期不施肥(CK)处理,土壤中以收获物形式带出系统的磷素得不到有效的补充,土壤磷库亏损严重;长期单施氮肥,因系统生产力的提高使得输出系统的磷素增加,加大了稻田土壤磷素的亏缺量,土壤全磷含量处于最低水平。红壤稻田有机物质循环利用或配合氮肥施用,土壤磷素亏损量减少,与 CK 和 N 处理相比磷库亏损量平均减少了 48.1%;施用磷肥(NP 和 NPK 处理)土壤磷库基本维持收支平衡,所以土壤全磷含量变化甚微。有机肥和磷肥配合施用(NP+C 和 NPK+C 处理),虽然输出系统的磷素明显增加,但是有机物质的循环利

用使得大量的磷素归还到土壤中,从而使得土壤全磷含量显著高于试验前。

土壤全磷包括无机磷和有机磷,有机磷一般占全磷的比例约为 20%~50%^[2],是土壤中磷素的重要形态。本试验结果表明,15 年田间试验之后,各施肥处理土壤有机磷含量与试验前相比都有所提高(提高幅度为 15.4%~77.1%),其中稻田有机物质循环利用处理有机磷提高幅度为 37.3%~77.1%,明显高于仅施化肥或不施肥处理(为 15.4%~41.6%)(表 1)。长期不施用磷肥处理,土壤全磷含量显著下降,而有机磷含量提高,说明磷库亏损部分主要来自土壤中无机磷部分。

相关分析表明,土壤有机磷(Y, mg/kg)与土壤

有机碳 (X , g/kg) 有极显著的相关关系, 其回归方程为 $Y = 7.4943X + 74.525$; $r = 0.900$, $P < 0.01$ 。可见, 稻田土壤有机碳含量较高是有机磷含量提高的主要原因之一。与无机磷肥相比, 有机磷具有在土壤中的移动性大及被土壤固定程度低的优点, 有机

磷分解后可以被植物有效地利用。土壤中有有机磷的分解是生物作用过程, 其分解决定于土壤微生物的活性, 因此有机磷的含量和微生物的活性水平对提高土壤磷素有效性有重要作用。

表 2 不同施肥条件下红壤稻田生态系统磷平衡状况 (kg/hm^2)
Table 2 P balance status in red paddy systems under different treatments

处理 Treatment	磷素输入 P input			磷素输出 P output		平衡状况 Balance status
	化肥 Fertilizer	秸秆 Straw	粪肥 Manure	秧苗 Seedling	水稻收获物 Rice harvest	
CK				2.4	22.8	-20.4
C		9.8	15.6	2.4	40.0	-12.2
N				2.4	24.6	-22.2
N + C		12.0	17.4	2.4	41.7	-9.9
NP	39.3			2.4	36.7	5.0
NP + C	39.3	14.2	18.9	2.4	48.4	26.4
NPK	39.3			2.4	42.7	-1.0
NPK + C	39.3	17.6	20.9	2.4	57.0	23.2

注 (Note): 表中数据为 1990 ~ 2004 年的平均值。The data are the average from 1990 to 2004.

2.2 土壤速效磷和 MB-P 的变化

土壤磷供应能力与土壤有效磷含量水平密切相关。全磷含量低的土壤, 其有效磷的供应往往不足; 但因土壤类型不同, 全磷含量高的土壤, 有效磷含量也不一定都高, 未必能满足当季作物生长的需要。本试验是在同一土壤背景值下进行的, 因此土壤速效磷 (Olsen-P) 与全磷变化密切相关 ($r = 0.966$, $P < 0.01$)。总体来看, 施用磷肥处理土壤 Olsen-P 含量显著高于不施磷肥处理 ($P < 0.05$), 其中磷肥配合有机物循环利用, 土壤 Olsen-P 含量处于最高水平 (表 1)。在长期不施磷肥的处理中 (CK、N、C 和 N + C 处理), 有机物质循环利用 (C 和 N + C 处理) 的土壤 Olsen-P 含量显著高于 CK 和 N 处理, 但其含量还是处于较低水平 (< 7.0 mg/kg)。

土壤 MB-P 周转速率快, 可迅速参与养分循环而成为植物有效磷的重要来源。试验结果 (表 1) 表明, 与不施肥 (处理 CK) 相比, 仅施用化肥对土壤 MB-P 影响较小, 而有机物质循环利用处理, 土壤 MB-P 含量平均提高了 59.7%, 其中磷肥配合有机物循环利用使土壤 MB-P 提高幅度最大 (达 90.3%)。从微生物固持磷量来看, 与 CK 和 N 处理相比, 有机物质循环利用处理土壤微生物平均多固持 12.8 kg/hm^2 的磷素, 而磷肥配合有机物循环利用土壤微生物平均多固持 26.0 kg/hm^2 的磷素。土壤处理

MB-P 是土壤有机磷中最活跃的部分, 与土壤有机磷化合物相比, 微生物量磷容易矿化为植物有效磷。有研究表明, 在作物生长过程中当土壤有效磷被植物耗竭时, 土壤 MB-P 被迫释放出来, 形成的土壤有效磷供植物吸收利用^[14]。可见, 提高土壤微生物磷含量, 对植物的磷素营养有重要作用。

稻田微生物对磷的固持作用主要取决于土壤微生物本身的生物量大小, 微生物的生长繁殖离不开作为能源物质的土壤有机碳和投入的大量新鲜碳源, 红壤稻田有机碳归还量较大^[15] (> 1300 kg/hm^2) 是稻田维持较高微生物量的重要因子之一。据报道, 在无外源磷供应的情况下, 土壤微生物量碳 (MB-C) 在扩大过程中不仅直接利用有效态的无机磷, 并且能够通过活化和利用无机态的 Al-P 和 Fe-P 形成 MB-P, 且有相当一部分转化成有机磷^[6]。这就揭示了本长期试验中, 长期不施磷肥土壤有机磷含量提高, 无机磷含量显著降低的原因。另外, 在磷库亏损严重的情况下, 土壤 MB-P 明显高于土壤 Olsen-P, 结合每年水稻都可以从稻田系统携带出大量的磷素 (> 22 kg/hm^2) 可以推论出土壤微生物在土壤磷活化的过程中起到关键作用。

2.3 土壤供磷能力状况

大田试验的水稻吸磷量不能作为土壤供磷能力的评价指标, 这是因为大田试验不能把土壤磷对水

稻生长的贡献与施入的有机物中和化肥中的磷对作物生长的贡献分开;另外,还有其他因素影响水稻的生长和磷素养分的吸收。因此,本试验在氮、钾养分不限制水稻生长的条件下进行盆栽试验,研究各施肥模式下土壤的供磷能力变化。

表3表明,长期单施氮肥土壤磷素的供应不足,严重限制了水稻干物量的形成,与CK处理相比,地上部生物量和整株生物量分别减少12.6%和18.4%,其整株吸磷量降低了17.2%;而氮肥配合有机物循环利用(N+C处理),整株吸磷量提高了40.2%,但低于长期有机物循环利用(C处理)的增幅(80.3%)。可见,长期偏施氮肥土壤供磷能力降

到了较低水平。

长期施用磷肥水稻干物量和土壤供磷量处于较高水平,与对照相比,整株吸磷量和整株生物量平均高了259.8%和40.6%。磷肥配合有机物循环利用,土壤供磷能力处于最高水平,平均整株吸磷量是长期不施磷肥处理的3.5倍,比长期仅施用磷肥(处理NP和NPK)平均高出59.8%,干物重也有明显提高(表3)。

相关分析看出,水稻总吸磷量与土壤全磷、Olsen-P、有机磷和MB-P都有极显著的相关关系(表4)。土壤全磷的变化是各种磷素变化的基础,本试验是在同一土壤背景值下进行的,更能直观体现磷

表3 长期施肥对水稻干物重及吸磷量的影响

Table 3 Effect of long-term fertilization on dry weight and phosphorus uptake of rice

处理 Treatment	生物量 Biomass (g/pot, DW)		地上部吸磷量 P uptake shoot (g/pot)	植株总吸磷量 P uptake of plant (g/pot)
	地上部 Shoot	全株 Whole plant		
CK	16.7 cd	26.1 cd	4.8 c	12.2 de
C	22.7 abc	32.8 abc	11.7 c	22.0 cd
N	14.6 d	21.3 d	4.6 c	10.1 e
N + C	20.4 bcd	28.2 bcd	9.3 c	17.1 de
NP	24.8 ab	35.3 ab	21.2 b	34.5 b
NP + C	28.8 a	38.6 a	36.4 a	53.5 a
NPK	24.5 ab	34.1 abc	21.0 b	33.1 bc
NPK + C	28.5 a	38.9 a	36.9 a	54.5 a

表4 土壤全磷、Olsen-P、MB-P和有机磷与生物量和吸磷量之间的关系

Table 4 Correlation of total P, Olsen-P, MB-P, organic P with plant biomass and phosphorus uptake

植株指标 Plant parameter	土壤指标 Soil parameter			
	全磷 Total P	有效磷 Olsen-P	微生物生物量磷 MB-P	有机磷 Organic P
地上部生物量 Biomass of shoot	0.968 **	0.907 **	0.834 **	0.891 **
整株生物量 Biomass of whole plant	0.943 **	0.891 **	0.799 *	0.860 **
地上部吸磷量 P uptake by shoot	0.971 **	0.963 **	0.860 **	0.867 **
整株吸磷量 P uptake by plant	0.973 **	0.963 **	0.861 **	0.871 **

注: * $r_{0.05} = 0.707$; ** $r_{0.01} = 0.834$

库的变化方向,这从土壤Olsen-P与土壤全磷有极显著的相关关系可以看出。有研究表明,当MB-C/P值较小时,土壤微生物释放磷的潜力较大,从而发挥补充有效磷库的功能;而当MB-C/P值过高时,微生物处于缺磷状态,趋于吸收土壤中的有效磷,从而与作物竞争土壤中的有效磷^[6]。本研究中不施磷肥处理土壤MB-C/P值为56,高于施用磷肥处理的平均值47(表1),可能发生了微生物与植株竞争土壤有效磷现象;另外,本试验微生物生物量维持在较

高水平^[15]($> 800 \text{ mg/kg}$),因而即使在速效磷含量很低时,土壤MB-P也能维持在较高水平。同时还看出,微生物与植株竞争土壤有效磷,从而出现土壤MB-P与植株吸磷相关性小于土壤Olsen-P和全磷与植株吸磷的相关性的现象。

3 讨论

稻田当季施用的磷肥有75%~90%积累在土壤中,对于长期不施磷肥或者晚稻不施磷肥的双季稻

作土壤,水稻吸收的磷全部来自土壤,因此土壤供磷能力的大小对水稻的磷素营养有重要作用。

增加土壤积累态磷含量和如何活化利用这部分磷是提高土壤供磷能力的两个主要方面。从土壤磷库平衡状况来看,系统内有机物循环利用不足以弥补磷库的损失;本试验施磷水平(39.3 kg/hm²)下,磷肥配合有机物循环利用,土壤磷库盈余较多,结合土壤全磷的变化可以得出,磷肥配合有机物循环利用是提高土壤磷库积累的有效措施。长期不施肥,土壤 MB-P 明显大于 Olsen-P 含量,微生物固持磷量为 36.0~50.6 kg/hm²,这是在土壤全磷和速效磷显著降低的情况下,每年水稻仍然能从土壤携带出超过 20 kg/hm² 的磷素的关键,这部分磷可能主要来自土壤有机磷。可见,微生物对土壤磷素的活化利用对提高土壤供磷能力有重要意义。磷肥配合有机物循环利用,土壤微生物固持磷量比仅施用磷肥处理高出 26.0 kg/hm²,有机磷高出 24.8%,土壤供磷能力处于最高水平。有研究表明,红壤对磷的固定能力较强,但在碳源充足的条件下,土壤微生物迅速的吸收利用所加入的无机磷,在培养 30 d 时 50% 以上的土壤微生物磷来自加入的无机磷,并且随无机磷加入量的增加而提高^[5];另外,微生物利用的磷约有 30% 以上被转化到有机磷库中^[6]。稻田生态系统有机碳的归还量较大^[15],维持了较高的微生物含量水平。说明磷肥配合有机物循环利用,既能提高土壤磷素的积累,又保持较高有效磷含量,土壤供磷能力处于最高水平。

磷肥配合有机物循环利用使土壤磷库一直处于盈余状态中,这种积累固然增加了土壤磷的供应能力,但是土壤磷素积累到一定程度就可能对水体环境造成威胁^[17]。因此,土壤积累态的磷不是越多越好,两者如何配比施用既能提高土壤的供磷能力又能减少磷肥对环境的污染需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 林葆,李家康.我国化肥的肥效及其提高的途径—全国化肥试验网的主要结果[J].土壤学报,1989,26(3):273-279.
Lin B, Li J K. Fertilizer efficiency and measure to raise fertilizer efficiency in China - main achievements of China national network on chemical fertilizer experiments[J]. Acta Pedol. Sin., 1989, 26(3): 273-279.
- [2] 张宝贵,李贵桐.土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J].土壤学报,1998,35(1):104-111.
Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus[J]. Acta Pedol. Sin., 1998, 35(1): 104-111.
- [3] Oberson A, Fardeau J C, Besson J M, Sticher H. Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods[J]. Biol. Fert. Soils, 1993, 16: 111-117.
- [4] 章永松,林咸永,罗安程,苏玲.有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究 I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J].植物营养与肥料学报,1998,4(2):145-152.
Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C, Su L. Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms I. Effect of organic manure(matter) on activation different phosphate in soils[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 145-152.
- [5] 来璐,赵小蓉,李贵桐,林启美.土壤微生物量磷及碳磷比对加入无机磷的响应[J].中国农业科学,2006,39(10):2036-2041.
Lai L, Zhao X R, Li G T, Lin Q M. The changes of soil microbial P and C/P with adding different quantities of inorganic P[J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(10): 2036-2041.
- [6] 黄敏,肖和艾,黄巧云,等.有机物料对水旱轮作红壤磷素微生物转化的影响[J].土壤学报,2004,41(4):584-589.
Huang M, Xiao H A, Huang Q Y *et al.* Effect of amendment of organic materials on transformation of P in red-earth soil under flood-drought cultivation[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(4): 584-589.
- [7] Brookes P C, Landman A, Pruden G *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen, a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. Soil Biol. Biochem., 1985, 17(6): 837-842.
- [8] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B *et al.* Measurement of soil microbial biomass by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. Soil Biol. Biochem., 1990, 22(8): 1167-1169.
- [9] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus in soil[J]. Soil Sci., 1957, 84: 133-144.
- [10] Peterson G W, Corey R B. A modify Chang Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1966, 30: 563-565.
- [11] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
Liu G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
Institute of Soil Sciences, CAS. Soil physical and chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1978.
- [13] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
Huang C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass[J]. Soil Biol. Biochem., 1984, 16: 169-175.
- [15] 陈安磊,王凯荣,谢小立,苏衍涛.长期有机养分循环利用对红壤稻田土壤供氮能力的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(5):838-843.
Chen A L, Wang K R, Xie X L, Shu Y T. Effects of long-term cycling of organic nutrient on soil nitrogen supplying capacity in a red soil paddy ecosystem[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 838-843.
- [16] He Z L, Wu J, O'Donnell A G *et al.* Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture[J]. Biol. Fert. Soils, 1997, 24: 421-428.
- [17] 鲁如坤,时正元.退化红壤肥力障碍特征及重建措施 III. 典型地区红壤磷素积累及其环境意义[J].土壤,2001(5):227-231.
Lu R K, Shi Z Y. Constraint characteristics of fertility constraint and rebuilding measurements in degraded red earth III. Accumulation and environmental sense of phosphorus in representative red soil region [J]. Soils, 2001, (5): 227-231.