

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

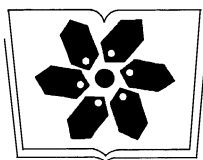
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第8期 Vol.32 No.8 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 8 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

东北地区 5 种阔叶树苗木对火烧的生理响应.....	王 荣, 胡海清 (2303)
梭梭木虱发生规律及其影响因子.....	李粉莲, 吴雪海, 王佩玲, 等 (2311)
基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布.....	刘双娜, 周 涛, 舒 阳, 等 (2320)
流域景观格局与河流水质的多变量相关分析.....	赵 鹏, 夏北成, 秦建桥, 等 (2331)
内蒙古达赉湖地区赤狐生境选择及生境景观特征分析.....	张洪海, 李成涛, 窦华山, 等 (2342)
雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价.....	徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等 (2351)
用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响.....	翟天庆, 李欣海 (2361)
2010 年牧区 2 代草地螟成虫迁飞的虫源分析	张 丽, 张云慧, 曾 娟, 等 (2371)
基于细胞色素 b 基因的中国岩羊不同地理种群遗传差异分析.....	李楠楠, 刘振生, 王正寰, 等 (2381)
喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性.....	鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2390)
永定河沿河沙地杨树人工林生态系统呼吸特征.....	方显瑞, 张志强, 查同刚, 等 (2400)
基于湿地植物光谱的水体总氮估测.....	刘 克, 赵文吉, 郭逍宇, 等 (2410)
背瘤丽蚌 F 型线粒体基因组全序列分析	陈 玲, 汪桂玲, 李家乐 (2420)
流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例	李崇巍, 胡 婕, 王 飒, 等 (2430)
线虫群落对抚顺煤矸石山周边土壤可溶性盐污染的响应.....	张伟东, 吕 莹, 肖 莹, 等 (2439)
地上竞争对林下红松生物量分配的影响.....	汪金松, 范秀华, 范 娟, 等 (2447)
湿地松和马尾松人工林土壤甲烷代谢微生物群落的结构特征.....	王 芸, 郑 华, 陈法霖, 等 (2458)
马尾松和杉木树干韧皮部水溶性糖 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气象因子的响应	卢钰茜, 王振兴, 郑怀舟, 等 (2466)
沙坡头人工植被演替过程的土壤呼吸特征.....	高艳红, 刘立超, 贾荣亮, 等 (2474)
豫西刺槐能源林的热值动态.....	谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 等 (2483)
铁皮石斛种子的室内共生萌发	吴慧凤, 宋希强, 刘红霞 (2491)
红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响	杨再强, 张继波, 李永秀, 等 (2498)
扑草净对远志幼苗根系活力及氧化胁迫的影响.....	温银元, 郭平毅, 尹美强, 等 (2506)
地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响	郑有飞, 徐卫民, 吴荣军, 等 (2515)
AMF 对喀斯特土壤枯落物分解和对宿主植物的养分传递	何跃军, 钟章成, 董 鸣 (2525)
传统豆酱发酵过程中细菌多样性动态.....	葛菁萍, 柴洋洋, 陈 丽, 等 (2532)
定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响.....	孙倩倩, 王正银, 赵 欢, 等 (2539)
基于生态需水保障的农业生态补偿标准.....	庞爱萍, 孙 涛 (2550)
保障粮食安全造成的生态价值损失评估模型及应用.....	芦蔚叶, 姜志德, 张应龙, 等 (2561)
专论与综述	
疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力.....	黄华梅, 高 杨, 王银霞, 等 (2571)
问题讨论	
厌氧氨氧化菌群体感应系统研究.....	丁 爽, 郑 平, 张 萌, 等 (2581)
基于形态结构特征的洞庭湖湖泊健康评价.....	帅 红, 李景保, 夏北成, 等 (2588)
研究简报	
黄土高原不同树种枯落叶混合分解效应.....	刘增文, 杜良贞, 张晓曦, 等 (2596)
不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异.....	马少杰, 李正才, 王 斌, 等 (2603)
干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响	欧立军, 陈 波, 邹学校 (2612)
硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响	陈 伟, 蔡昆争, 陈基宁 (2620)



封面图说: 红树林粗大的气生根——红树林是热带、亚热带海湾及河口泥滩上特有的常绿灌木或乔木群落。由于海水环境条件特殊, 红树林植物具有一系列特殊的生态和生理特征。其中之一就是气根, 红树从根部长出许多指状的气生根露出海滩地面, 以便在退潮时甚至潮水淹没时用以通气, 故称呼吸根。在中国, 红树林主要分布在海南、广西、广东和福建省沿海, 它一般分布于高潮线与低潮线之间的潮间带, 往往潮差越大, 红树的呼吸根就长得越高越粗大。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101150080

孙倩倩,王正银,赵欢,王小晶,吕慧峰,陈怡. 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响. 生态学报, 2012, 32(8): 2539-2549.

Sun Q Q, Wang Z Y, Zhao H, Wang X J, Lv H F, Chen Y. Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2539-2549.

定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响

孙倩倩^{1,2}, 王正银^{1,*}, 赵欢¹, 王小晶¹, 吕慧峰¹, 陈怡¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 阜阳师范学院物理与电子科学学院, 阜阳 236037)

摘要:基于紫色菜园土壤茼蒿-白菜轮作 3a 的 12 季连续定位施肥试验, 研究施肥对土壤磷素状况的影响。结果表明, 在紫色土上以化肥为基础增施有机肥(泥炭或菜籽粕)既提高土壤磷含量, 又增加无机磷组分中有效磷源和缓效磷源的比例, 且不会增加磷素淋失的风险, 是所有处理中最优者; 增磷、增钾处理虽然提高了土壤磷含量, 但未能提高速效磷源与缓效磷源的比例; 增氮、增硼及常规施肥降低土壤磷含量和提高无效磷源的比例; 无肥处理磷含量最低, 无效磷源比例最高。紫色菜园土无机磷约为有机磷的 4—6 倍, 无机磷各组分以钙磷为主, 占 I-P 总量的 60.89%—67.92%, 显示紫色土风化程度较低。各形态磷素呈 $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} \approx \text{Al-P} \approx \text{O}_c\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 序列变化, 其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 总共仅占无机磷总量的 11.47%—19.43%, 表明紫色土中对植物最有效的磷源不足; 而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 $\text{O}_c\text{-P}$ 共占无机磷总量的 42.48%—59.55%, 意味着紫色土无机磷有一半左右是以作物不可利用的形态存在的。紫色土全磷与无机磷、有机磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 $\text{O}_c\text{-P}$ 及 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈显著正相关; 无机磷与多种形态磷呈显著正相关(除有机磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、有效磷外); 有机磷与全磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 显著正相关; 有效磷与全磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 显著正相关; 无机磷组分间也都存在显著正相关关系($\text{O}_c\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 间有极显著正相关, 但它们与其它无机磷组分无相关性)。表明在土壤磷的整个循环系统中, 不同组分无机磷与有机磷之间处于一个动态平衡中, 它们之间存在着相互影响和制约。土壤 pH 与各形态磷关系密切。对土壤有效磷与无机磷组分间的关系进行系统分析, 简单相关分析结果土壤有效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 呈极显著正相关, 与 Al-P 呈显著正相关, 与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{O}_c\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 正相关但不显著; 通径分析结果对土壤有效磷直接影响较大的无机磷组分是 Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 其中 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的直接影响为负效应; 逐步回归分析结果与通径分析一致。综合分析得出, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 是最有效的磷源, Fe-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 次之, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 $\text{O}_c\text{-P}$ 是非有效磷源。茼蒿和白菜产量与紫色土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 呈显著正相关, 与 $\text{O}_c\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 无相关性。紫色土各形态无机磷与两种蔬菜产量的相关系数 r 大小依次为 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O}_c\text{-P}$, 这与各形态无机磷与有效磷简单相关分析的结果一致。

关键词: 紫色菜园土; 定位施肥; 磷素有效性; 磷素形态

Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil

SUN Qianqian^{1,2}, WANG Zhengyin^{1,*}, ZHAO Huan¹, WANG Xiaojing¹, LV Huifeng¹, CHEN Yi¹

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2. School of Physics and Electronic Science, Fuyang Teachers College, Fuyang Anhui 236037, China

Abstract: A three-year (12 seasons) of experiment was conducted on a purple garden soil under a lettuce-cabbage rotation to investigate effect of site-specific fertilization on soil phosphorus (P). The combined application of organic manure (peat or rapeseed meal) and chemical fertilizers in purple garden soil was the optimal treatment which improved the content of phosphorus as well as the ratio of available to slow-available P in soil inorganic P and did not increase the risk of phosphorus leaching. The addition of P and potassium fertilizers could increase the content of phosphorus but failed to improve the proportion of available and slow-available P in soil inorganic P. The addition of nitrogen and boron fertilizers

基金项目: 国际植物营养研究所资助项目 (Chongqing200808)

收稿日期: 2011-01-15; 修订日期: 2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wang_zhengyin@163.com

and conventional fertilization treatments decreased the P concentrations and increased the percentage of unavailable P in soil inorganic P. The no fertilizer treatment displayed lowest contents of P and highest percentage of unavailable P in soil inorganic P. The results showed that the content of inorganic P was 4—6 times higher than that of organic P in the purple garden soil. The main inorganic form of P was calcium phosphate which accounted for 60.89%—67.92% of soil inorganic P indicating a low weathering stage of the soil. The contents of inorganic P were in the order of $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} \approx \text{Al-P} \approx \text{O}_c\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$. The total concentration of $\text{Ca}_2\text{-P}$ and Al-P accounted for 11.47%—19.43% of soil inorganic P suggesting the lack of the most effective phosphate in the purple garden soil. The total amount of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and $\text{O}_c\text{-P}$ accounted for 42.48%—59.55% of soil inorganic P indicating about half of inorganic P was unavailable for crop. Soil total phosphorus was significantly correlated with inorganic P, organic P, $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , Fe-P , $\text{O}_c\text{-P}$ and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$. Soil inorganic P was significantly correlated with various forms of phosphorus (except for organic P, $\text{Ca}_2\text{-P}$ and available P). Organic P had significant positive correlation with soil total P and $\text{Ca}_2\text{-P}$. Available P showed significant positive correlation with soil total P, $\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P and Fe-P . There was significant positive correlation between $\text{O}_c\text{-P}$ and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$. These results showed that various forms of inorganic P and organic P were in a dynamic balance and interaction in the cycle system of soil phosphorus. Soil pH was highly correlated with the studied forms of soil phosphorus. Correlation analysis, path analysis and stepwise regression analysis methods were applied to examine the relationship between soil available P and inorganic phosphorus compounds. Soil available P was closely correlated with $\text{Ca}_2\text{-P}$, Fe-P , and Al-P . Path analysis and stepwise regression showed that soil Al-P and $\text{Ca}_2\text{-P}$ had significant positive association with soil available P while $\text{Ca}_8\text{-P}$ had a significant negative association with soil available P. Additionally, yields of lettuce and cabbage were significantly correlation with soil $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P and Fe-P . The correlation coefficients of various forms of soil inorganic P and yields of lettuce and cabbage were in the order of $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O}_c\text{-P}$. On the basis of these results, it can be concluded that $\text{Ca}_2\text{-P}$ and Al-P followed by Fe-P and $\text{Ca}_8\text{-P}$ were the most effective forms of phosphorus while $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and $\text{O}_c\text{-P}$ were ineffective forms of phosphorus in the purple garden soil.

Key Words: purple garden soil; located fertilization; phosphorus availability; phosphorus form

土壤磷素可分为有机和无机两种形态,其中无机磷约占土壤全磷的 60%—80%^[1],是植物所需磷素的主要来源。土壤供磷能力既与磷库容量密切相关,更取决于磷素形态和缓冲力(Q/I)。我国农业土壤的供磷能力普遍不高,因此施用磷肥已成为提高作物产量和改善品质的重要农业措施。2005 年我国磷肥消费量居世界首位,约占世界磷肥消费量的 30%^[2]。但是,磷肥当季利用率仅有 10%—20%^[3]。磷肥施入土壤后极易被固定^[4-5],从而成为补充土壤磷库的主要方式以及水体富营养化的重要来源。在现代农业条件下,单一施用磷肥的现象较为少见,通常是采用化学磷肥与氮钾肥配施或制成复混肥料施用。有关肥料配合施用对土壤磷素状况的影响研究已有很多报道^[6-11],但研究对象多集中于粮食作物,而蔬菜施肥对菜园土壤磷素状况的研究却鲜有报道。

紫色土是我国特有的土壤资源,以四川盆地分布最集中^[12]。近年来利用紫色土种植蔬菜的面积不断扩大。有关施肥对紫色菜园土壤的效应研究虽有一些报道,然而长期定位施肥条件下的研究甚少。为此,针对重庆郊区紫色菜园土壤种植叶类蔬菜的“菜—菜”轮作现状和蔬菜营养与施肥特点,开展氮磷钾硼化肥和有机肥配合定位施肥研究。前期(2005—2007 年)重点考察蔬菜产量、品质和经济效益^[13],在此基础上进一步研究不同施肥处理对紫色菜园土壤肥力的影响。本文依据蒋柏藩、顾益初石灰性土壤无机磷的分级体系^[14],对定位施肥试验菜园土壤无机磷形态进行测定,研究不同肥料组合定位施用条件下土壤磷素形态及有效性,以为紫色菜园土合理施肥和蔬菜生产可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及试验概况

供试土壤采自 3a 的 12 季(茬)蔬菜定位施肥试验,各土壤基本农化性质见表 1。该定位试验设在重庆市

九龙坡区白市驿蔬菜生产基地,土壤为发育于侏罗纪遂宁组母质的红棕紫泥。试验采用随机区组设计,以叶菜前期试验研究的适宜氮磷钾配比($N_{15}P_5K_{10}$)为对照,共设 9 个处理,(1)常规施肥(CF): $N_{225}+P_2O_560+K_2O52.5$ +鸡粪水 4500;(2) $N_{15}P_5K_{10}$ (CK): $N_{225}+P_2O_575+K_2O150$;(3) $N_{20}P_5K_{10}$ (+N): $N_{300}+P_2O_575+K_2O150$;(4) $N_{15}P_{10}K_{10}$ (+P): $N_{225}+P_2O_5150+K_2O150$;(5) $N_{15}P_5K_{15}$ (+K): $N_{225}+P_2O_575+K_2O225$;(6) $N_{15}P_5K_{10}B$ (+B): $N_{225}+P_2O_575+K_2O150+B0.9$;(7) $N_{15}P_5K_{10}M_1$ (+M₁): $N_{225}+P_2O_575+K_2O150$ +泥炭 2250(泥炭仅单季施用);(8) $N_{15}P_5K_{10}M_2$ (+M₂): $N_{225}+P_2O_575+K_2O150$ +菜籽粕 2250(菜籽粕仅单季施用);(9) $N_0P_0K_0$ (CK₀):不施肥。施肥用量单位为 kg/hm²。4 次重复,小区面积 7.05 m²(4.7 m×1.5 m),栽培规格为每小区 56 穴,株距为 34 cm,行距为 38 cm。供试肥料为尿素(N,46%)、过磷酸钙(P₂O₅,12%)、氯化钾(K₂O,60%)、硼肥(持力硼,B,15%)、泥炭(全 N14.63 g/kg,全 P3.16 g/kg,全 K2.45 g/kg)、菜籽粕(全 N52.43 g/kg,全 P11.20 g/kg,全 K14.34 g/kg)和鸡粪水(速效 N649.00 mg/kg,全磷 68.84 mg/kg,速效 P22.50 mg/kg,速效 K691.00 mg/kg)。其中,有机肥菜籽粕具有高养分、泥炭具有高腐殖质的特点,且两种有机肥均源于植物,常作为农业生产中的优质有机肥。

定位试验于 2005 年 5 月至 2007 年 11 月进行,采用莴笋-白菜轮作方式,共连续种植 12 季(茬)蔬菜(即莴笋和白菜各种植 6 季)。轮作试验过程中,根据气候条件选择不同的莴笋品种,而白菜品种保持不变。为节约成本,种植蔬菜时,将磷肥、钾肥、硼肥和有机肥全部作基肥一次施入(有机肥料仅单季施用),尿素在移栽后分 3 次按 25%、50%、25% 施入。为保证试验工作的连续性,收获上季作物后,在不打乱原有土层和小区划分的基础上人工翻挖耕层,根据生育期的长短直播或移栽育好的蔬菜幼苗。

1.2 土壤样品采集及测定方法

在 2007 年最后一季作物收获后,取 0—20 cm 土层土样,风干过筛,测定土壤基本理化性质、全磷(TP)、有机磷(O-P)、无机磷(I-P)、无机磷组分。土壤基本理化性状按常规方法^[15]测定。土壤全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-分光光度法测定;无机磷分级浸提采用蒋柏藩和顾益初的方法^[14],分为 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P 与 O_c-P(闭蓄态磷)6 种形态;无机磷总量为各形态无机磷含量之和,各组分相对含量为各形态磷占无机磷总量的百分数;土壤有机磷总量用灼烧法^[1]测定。数据结果采用 DPS 软件进行统计分析。

表 1 供试土壤基本农化性质

Table 1 Basic agrochemical properties of experimental soil

处理 Treatments	pH (H ₂ O)	有机质 Organic matter	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen/(g/kg)	有效磷 Rapid available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)
常规施肥(CF)	7.60	36.1	270	24.3	180
$N_{15}P_5K_{10}$ (CK)	7.58	33.6	114	31.8	250
$N_{20}P_5K_{10}$ (+N)	7.67	33.7	148	27.2	240
$N_{15}P_{10}K_{10}$ (+P)	7.58	35.0	241	37.6	250
$N_{15}P_5K_{15}$ (+K)	7.57	32.9	120	31.8	380
$N_{15}P_5K_{10}B$ (+B)	7.50	35.9	228	29.5	260
$N_{15}P_5K_{10}M_1$ (+M ₁)	7.51	46.4	120	61.3	340
$N_{15}P_5K_{10}M_2$ (+M ₂)	7.39	39.9	169	55.5	290
$N_0P_0K_0$ (CK ₀)	8.00	34.6	116	16.2	100

2 结果与讨论

2.1 定位施肥对紫色菜园土壤 TP、I-P 和 O-P 含量的影响

2.1.1 TP

土壤 TP 标示土壤磷素的总储量,是衡量磷素营养水平的参考指标^[16]。方差分析表明,定位施肥紫色菜园土壤全磷含量差异达到了极显著水平($P<0.01$),变化范围为 984.38—1507.81 mg/kg,各处理大小依次为 +P>+K>+M₁>+M₂>CK>+B>CF>+N>CK₀(表 2),表明虽然试验时间仅 3 年,但种植蔬菜施肥已达 12 季(茬),

高频率的施肥显著影响了土壤的 TP 含量。刘建玲等^[17]的研究也表明,菜园土 0—20 cm 的全磷比相邻粮田增加了 1.2 倍。增施有机肥的 3 个处理中,泥炭、菜籽粕处理提高了 TP 含量,这主要是因为泥炭、菜籽粕自身有较高磷含量(泥炭全 P 3.16 g/kg、菜籽粕全 P 11.20 g/kg),且以有机磷为主;而常规施肥处理极显著降低了 TP 含量,主要是因为常规施肥处理化学磷肥施用量低,虽然施用了有机肥鸡粪水,但是其磷含量很低(全磷 68.84 mg/kg,速效 P 22.50 mg/kg)。增施化肥的 4 个处理中,增硼、增氮处理极显著降低了 TP 含量,这与蔬菜产量增加、吸磷量增大有关^[13]。增磷处理土壤 TP 含量最高,说明施用化学磷肥是提高土壤 TP 含量的主要措施。增钾处理也极显著提高了 TP 含量,值得一提的是增钾处理作物吸磷量远高于 CK 处理^[13]。对于这一看似矛盾的结果,其主要原因可能是增钾处理极大促进了蔬菜的生长(其产量仅低于菜籽粕、泥炭处理)和根系发育,有利于根系在更大的土壤空间内吸收磷,而土壤样品仅为 0—20 cm 土层土样,关于定位施肥对紫色菜园土耕层以下土层磷素状况的影响有待于进一步探讨。无肥(CK₀)处理 TP 含量最低,说明长期不施肥,土壤 TP 含量显著下降。

2.1.2 I-P

各处理 I-P 含量间差异达到了极显著水平($P<0.01$),变化范围为 828.10—1304.70 mg/kg(表 2)。各处理变化规律与土壤全磷基本一致。

2.1.3 O-P

土壤 O-P 含量各处理间差异达到了极显著水平($P<0.01$),含量变化范围为 156.30—265.60 mg/kg。各处理大小依次为 CK>+M₂>+M₁>+B>+K>CF=+P>+N=CK₀,其变化规律与 TP、I-P 有很大差异(表 2)。对照 CK 处理 O-P 含量最高,其原因可能是对照处理蔬菜产量很低,仅高于无肥处理^[13]。该处理作物对磷素需求量低,无机磷肥的施用已足够供给其生长,甚至可能会有盈余向有机磷方向转化。此外,增磷处理 O-P 含量很低,仅高于增氮和无肥处理。但是增磷处理的 TP、I-P 含量均最高。其原因可能是(1)增磷处理蔬菜产量较高,吸磷量较大;(2)根际代谢旺盛,导致土壤无机磷总量及各组分含量保持高水平,从而供植物吸收利用。因而,土壤有机磷不能积累,甚至可能会不断转化为无机磷供蔬菜生长。

从以上分析结果可以看出,在紫色菜园土中,无机磷含量是有机磷含量的 4—6 倍,无机磷在土壤磷中占主导。增施化肥的 4 个处理中,增磷、增钾处理土壤全磷、无机磷及有机磷的含量普遍较高,而增氮、增硼处理土壤全磷、无机磷及有机磷的含量较低。无肥处理的全磷、无机磷及有机磷的含量最低。3 个有机肥处理中,菜籽粕、泥炭处理土壤全磷、无机磷及有机磷的含量较高,而常规施肥处理土壤全磷、无机磷及有机磷的含量较低。另外,菜籽粕、泥炭处理土壤 Olsen-P 的含量分别为 61.3 mg/kg 和 55.5 mg/kg(表 1),此值基本在 Hecketh 和 Brookes^[18]所确定的 Olsen-P 为 60 mg/kg 和林成永等^[19]确定 76.19 mg/kg 的菜园土壤磷素淋溶临界值范围内,说明在一定无机肥基础上增施少量优质有机肥(菜籽粕、泥炭)既能大幅度提高蔬菜产量,又能有效提高土壤全磷、无机磷及有机磷的含量,培肥地力,且不会增加磷素淋失的风险。

表 2 不同施肥处理土壤无机磷、有机磷和全磷的含量

Table 2 Contents of inorganic phosphorus, organic phosphorus and total phosphorus in different fertilization treatments

处理 Treatments	无机磷/(mg/kg) Inorganic phosphorus	有机磷/(mg/kg) Organic phosphorus	全磷/(mg/kg) Total phosphorus
常规施肥(CF)	914.06±23.18f	203.13±2.33d	1117.19±30.14f
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ (CK)	1078.13±15.42de	265.63±10.11a	1343.75±25.67d
N ₂₀ P ₅ K ₁₀ (+N)	859.38±14.68g	156.25±6.71e	1015.63±50.12g
N ₁₅ P ₁₀ K ₁₀ (+P)	1304.69±20.41a	203.13±13.44d	1507.81±23.45a
N ₁₅ P ₅ K ₁₅ (+K)	1218.75±46.77b	210.94±2.12d	1429.69±38.65b
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ B(+B)	1046.88±10.60e	218.75±3.72cd	1265.63±12.38e
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ M ₁ (+M ₁)	1148.44±17.71c	234.38±9.11bc	1382.81±30.51c
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ M ₂ (+M ₂)	1109.38±11.26cd	250.00±13.47ab	1359.38±37.66cd
N ₀ P ₀ K ₀ (CK ₀)	828.13±15.68g	156.25±5.21e	984.38±24.36g

数字后的字母代表方差分析结果

2.2 定位施肥对紫色菜园土无机磷各组分含量的影响

2.2.1 $\text{Ca}_2\text{-P}$

$\text{Ca}_2\text{-P}$ 对植物具有高度有效性,是作物的有效磷源^[14,20]。各处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量间差异达到了极显著水平 ($P<0.01$),含量范围为 18.75—51.88 mg/kg(表 3)。各处理大小依次为 $+M_1>+M_2>+P=+K>CK>+B>+N>CF>CK_0$,大小顺序与 TP、I-P 基本一致。泥炭处理与菜籽粕处理的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最高,且与其它处理差异达到了极显著水平,说明在无机肥基础上增施有机肥,能够显著提高土壤的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量。这主要是因为(1)土壤有机质自身矿化释放出磷^[21-22]; (2)通过各种途径降低土壤中自身磷的吸附,从而有利于土壤无机磷向有效态方向转化。党延辉^[23]等研究表明,增施有机肥有利于土壤无机磷向有效态转化,其不但会增加土壤无机磷有效态组分的供应强度,而且增加了其供应容量,极大地提高了无机磷的有效性。

2.2.2 Al-P

Al-P 是植物的另一种有效磷源,有人认为其与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 作用相当^[24]。各处理 Al-P 含量间差异达到了极显著水平 ($P<0.01$),含量范围为 76.25—170.42 mg/kg(表 3),各处理大小顺序与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 基本一致,

2.2.3 $\text{Ca}_8\text{-P}$

$\text{Ca}_8\text{-P}$ 是植物的一种缓效磷源^[14,24]。各处理间差异达到了极显著水平 ($P<0.01$),含量范围为 125.00—277.50 mg/kg(表 3)。与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 不同的是,泥炭处理的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量较 CK 处理显著下降,居于第 6 位。这可能与泥炭处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量最高有关,泥炭的施用有助于 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 向更有效的磷源 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 方向转化。

2.2.4 Fe-P

Fe-P 是植物的另一缓效磷源^[14,24]。各处理间差异达到了极显著水平 ($P<0.01$),含量范围为 115.00—162.50 mg/kg(表 3),各处理大小顺序与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 基本一致。

2.2.5 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$

$\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是植物的潜在磷源^[14,24]。各处理间差异达到了显著水平 ($P<0.05$),含量范围为 375.00—481.25 mg/kg(表 3)。顺序与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 不一致,依次为 $+P>+K>+M_1>+B>CK>CK_0>CF>+M_2>+N$ 。用 Duncan 法进行多重比较,虽然整体上差异显著,但是除了增磷、增钾及泥炭处理与部分其它处理差异显著外,其余 6 个处理之间无显著差异。这说明作为植物迟效磷源的磷灰石矿物很稳定,一般不可能被吸收利用,施入土壤中的磷肥也不可能短期内转化为磷灰石。这与林德喜等 2006 年^[8]的研究结论相同。但是,虽然一般施肥情况下 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 很稳定,增磷、增钾与泥炭处理, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 也有较大增加,这说明当有效磷源与缓效磷源积累到一定程度时,这些无机磷也可缓慢向 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 方向转化积累。与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 变化规律不同的是,菜籽粕处理 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量很低,居第八位,这可能是因为菜籽粕处理蔬菜产量最高^[13],吸磷量最多, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 不断向有效磷源转化供蔬菜生长的结果。

2.2.6 $\text{O}_c\text{-P}$

闭蓄态磷 $\text{O}_c\text{-P}$ 是以氧化铁胶膜包被的磷酸盐,其溶解度小,在没有除去其外层铁质包膜前,很难发挥其效用^[25],是植物的另一潜在磷源。各处理间差异达到了极显著水平 ($P<0.05$),含量范围为 74.38—182.39 mg/kg(表 3)。依次为 $+P>+K>+M_1>+B>CF>CK>+N>+M_2>CK_0$ 。与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 不同的是菜籽粕处理 $\text{O}_c\text{-P}$ 含量很低,居第八位,这与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 结果一致。其原因也可能是菜籽粕处理蔬菜吸磷量最多^[13], $\text{O}_c\text{-P}$ 不断向有效磷源转化的结果。但是,增施有机肥的泥炭处理,蔬菜吸磷量仅次于菜籽粕处理^[13], $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 $\text{O}_c\text{-P}$ 的含量仍然很高。对此,需要深入对两种有机肥的作用机制进行研究。

从以上无机磷分级结果可以看出,以 CK 为对照,菜籽粕与泥炭处理普遍提高了各形态无机磷含量,而常规施肥处理的各形态无机磷含量均显著下降。因此,在施肥过程中,不仅要注重有机肥的配施,而且要选择优质有机肥,且保证无机氮、磷、钾肥的平衡施用,才能得到较好的效果。增磷、增钾处理均提高了各形态无机磷含量,而增氮、增硼处理普遍降低了各形态无机磷含量。无肥处理的无机磷各组分含量均最低。

表 3 不同施肥处理各形态无机磷的含量

Table 3 Content of inorganic phosphorus fractions in different fertilization treatments						
处理 Treatments	Ca ₂ -P /(mg/kg)	Al-P /(mg/kg)	Ca ₈ -P /(mg/kg)	Fe-P /(mg/kg)	Ca ₁₀ -P /(mg/kg)	O _c -P /(mg/kg)
常规施肥 (CF)	23.75±1.24d	86.25±4.75d	155.00±8.33e	120.00±7.47e	412.50±12.57bcd	116.56±9.35c
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ (CK)	34.38±5.33b	131.25±7.21c	227.50±7.54c	147.50±6.35b	425.00±5.14abcd	112.50±7.54c
N ₂₀ P ₅ K ₁₀ (+N)	25.63±2.41cd	81.25±13.14d	150.00±9.21e	137.50±8.14c	375.00±8.36d	90.00±7.87d
N ₁₅ P ₁₀ K ₁₀ (+P)	35.63±1.85b	170.42±8.77a	277.50±8.74a	157.50±8.23a	481.25±8.75a	182.40±10.33a
N ₁₅ P ₅ K ₁₅ (+K)	35.63±3.15b	163.75±2.59a	272.50±5.65ab	150.00±7.45b	456.25±11.51ab	140.63±7.47b
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ B(+B)	26.88±4.13c	127.50±8.14c	212.50±5.14d	127.50±4.45d	425.00±10.54abcd	127.50±9.74b
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ M ₁ (+M ₁)	51.88±4.11a	146.25±7.52b	205.00±6.77d	160.00±6.74a	450.00±11.65abc	135.31±9.58b
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ M ₂ (+M ₂)	50.63±3.25a	165.00±5.75a	260.00±10.12b	162.50±11.51a	393.75±4.25cd	77.50±7.74e
N ₀ P ₀ K ₀ (CK ₀)	18.75±1.77e	76.25±6.65d	125.00±7.65f	115.00±7.54e	418.75±12.38bcd	74.38±5.42e

数字后的字母代表方差分析结果

2.3 定位施肥对紫色菜园土无机磷各组分相对含量的影响

表 4 为不同施肥方式土壤中 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P 与 O_c-P 占 I-P 百分数的变化,可见各形态无机磷含量顺序为 Ca₁₀-P>Ca₈-P>Fe-P≈Al-P≈O_c-P>Ca₂-P。这一结果与稻-麦轮作系统中紫色土无机磷含量大小顺序 Ca₁₀-P>O_c-P>Al-P>Fe-P>Ca₈-P>Ca₂-P^[11]不同。紫色菜园土中无机磷以钙磷为主,占 I-P 总量的 60.89%—67.92%。钙结合态磷占磷素总量的百分比可以用于评价土壤发育的相对状态及土壤矿质态磷的转化^[26]。在紫色土中钙磷比例很高,表明紫色土风化程度较低。此外,Ca₂-P 和 Al-P 总共仅占无机磷总量的 11.47%—19.43%,显示紫色土中对植物最有效的磷源不足。而 Ca₁₀-P 和 O_c-P 共占无机磷总量的 42.48%—59.55%,意味着紫色土无机磷有一半左右是以作物不可利用的形态存在的。

不同施肥处理条件下,Al-P、Ca₈-P 和 O_c-P 相对含量的大小顺序与绝对含量顺序基本一致,而 Ca₂-P、Fe-P 与 Ca₁₀-P 却不同。配施优质有机肥(菜籽粕、泥炭)处理不仅普遍提高了无机磷各组分的含量,而且提高了有效磷源和缓效磷源在无机磷中的比例,更有利于蔬菜生长;增施化肥(磷肥、钾肥)处理虽然也普遍提高了无机磷各组分的绝对含量,但却未能有效提高速效磷源与缓效磷源的比例;而增氮、常规施肥及无肥处理不仅降低了无机磷各组分含量,而且相对提高了其无效磷源的比例,最不利于蔬菜生长。这在蔬菜的产量^[13]上得到了证明。

表 4 不同施肥处理各形态无机磷的相对含量

Table 4 The percentage of inorganic phosphorus forms in total inorganic phosphorus in different fertilization treatments						
处理 Treatments	Ca ₂ -P/%	Al-P/%	Ca ₈ -P/%	Fe-P/%	Ca ₁₀ -P/%	O _c -P/%
常规施肥 (CF)	2.60	9.44	16.96	13.13	45.13	12.75
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ (CK)	3.19	12.17	21.11	13.68	39.42	10.43
N ₂₀ P ₅ K ₁₀ (+N)	2.98	9.45	17.45	16.00	43.64	10.47
N ₁₅ P ₁₀ K ₁₀ (+P)	2.73	13.06	21.27	12.07	36.89	13.98
N ₁₅ P ₅ K ₁₅ (+K)	2.92	13.44	22.36	12.31	37.44	11.54
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ B(+B)	2.57	12.18	20.30	12.18	40.60	12.18
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ M ₁ (+M ₁)	4.52	12.73	17.85	13.93	39.18	11.78
N ₁₅ P ₅ K ₁₀ M ₂ (+M ₂)	4.56	14.87	23.44	14.65	35.49	6.99
N ₀ P ₀ K ₀ (CK ₀)	2.26	9.21	15.09	13.89	50.57	8.98

2.4 土壤磷素各组分及其与土壤基本农化性状间的相关分析

对土壤各形态磷之间及与土壤的农化性状指标间进行相关分析,以探讨它们之间的关系。从表 5 可知,不同形态磷之间多存在相关关系。土壤全磷与无机磷、有机磷、Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O_c-P 及 Ca₁₀-P 呈显

著正相关。无机磷与多种形态磷呈显著正相关(除有机磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、有效磷外)。有机磷仅与全磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 呈显著正相关。有效磷与全磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 显著正相关。无机磷组分间也都存在显著正相关关系($\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 间有极显著正相关,但它们与其它无机磷组分无相关性)。相关分析表明,在土壤磷的整个循环系统中,不同组分无机磷与有机磷之间处于一个动态平衡中,它们之间存在着相互影响和制约。

在土壤基本农化性状方面,有机质仅与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、有效磷呈显著正相关。 pH 值与多种形态磷显著负相关(除无机磷、 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$),这是因为(1)紫色菜园土长期施用有机肥,通过各种途径增加了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 的含量^[21-23],土壤 pH 值也因有机肥的分解过程释放的中间产物而显著降低;(2)增施有机肥和增施钾、磷肥,促进了蔬菜的生长与根系发育,根系分泌有机酸,降低了土壤 pH 值,同时增加了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 的有效性^[27]。

表 5 土壤磷素各组分与土壤基本农化性状的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between soil phosphorus fractions and soil agrochemical properties

	全磷 Total phosphorus	无机磷 Inorganic phosphorus	有机磷 Organic phosphorus	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	$\text{O}_\text{C}\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	有效磷 Rapid available P	pH	有机质 Organic matter
全磷 Total phosphorus	1											
无机磷 Inorganic phosphorus	0.99 **	1										
有机磷 Organic phosphorus	0.70	0.57	1									
$\text{Ca}_2\text{-P}$	0.71 *	0.66	0.69 *	1								
$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.95 **	0.94 **	0.63	0.64	1							
Al-P	0.97 **	0.96 **	0.66	0.77 *	0.97 **	1						
Fe-P	0.81 **	0.79 *	0.60	0.91 **	0.79 *	0.85 **	1					
$\text{O}_\text{C}\text{-P}$	0.72 *	0.78 *	0.20	0.20	0.59	0.58	0.38	1				
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	0.63	0.78 *	0.22	0.24	0.57	0.61	0.35	0.87 **	1			
有效磷 Rapid available P	0.63	0.58	0.62	0.98 **	0.53	0.68 *	0.84 **	0.18	0.19	1		
pH	-0.68 *	-0.61	-0.74 *	-0.72 *	-0.69 *	-0.69 *	-0.68 *	-0.33	-0.09	-0.71 *	1	
有机质 Organic matter	0.25	0.20	0.37	0.73 *	0.05	0.27	0.43	0.02	0.09	0.83 **	-0.40	1

$r_{0.05}=0.666, r_{0.01}=0.798, n=9$

2.5 定位施肥各无机磷组分对磷素有效性的贡献

Olsen 法测得的土壤有效磷与植物吸磷量之间有良好的相关性,该方法被普遍用来测定中性和石灰性土壤有效磷含量^[28]。为了研究不同无机磷组分对土壤磷素有效性的贡献大小,可以从探讨各形态无机磷对 Olsen-P 的贡献大小入手^[29]。

2.5.1 土壤无机磷组分与土壤有效磷的简单相关分析

对土壤无机磷组分与有效磷进行简单相关分析结果已在 2.4 中进行了讨论,土壤有效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 呈极显著正相关($r_{\text{Ca}_2\text{-P}}=0.98 **$, $r_{\text{Fe-P}}=0.84 **$),与 Al-P 呈显著正相关($r_{\text{Al-P}}=0.68 *$),与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 正相关不显著。土壤有效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 相关系数最大,即它们之间的相关密切程度最高。根据相关系数 r 值得

出各无机磷组分与土壤有效磷的相关密切程度依次为: $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O}_\text{C}\text{-P}$ 。

2.5.2 土壤无机磷组分与土壤有效磷的通路分析

利用简单相关分析,虽然土壤各形态无机磷与有效磷的相关密切程度已经比较清楚,但是由于各形态无机磷间存在不同程度的相关关系,且由于其在土壤中的含量各不相同。因此,简单相关分析不能比较各组分无机磷对磷素有效性的贡献大小,也无法了解它们是直接还是间接影响土壤有效磷水平的高低。应用通路分析可以较好地解释土壤各形态无机磷对有效磷的贡献大小和方式,从而得出各组分磷的相对有效性。

直接通路系数表示各个自变量对因变量的直接作用大小。表6显示,土壤各无机磷组分对有效磷的直接通路系数绝对值从大到小依次为: $\text{Al-P} (1.372) > \text{Ca}_8\text{-P} (-1.231) > \text{Ca}_2\text{-P} (0.762) > \text{Ca}_{10}\text{-P} (-0.434) > \text{O}_\text{C}\text{-P} (0.355) > \text{Fe-P} (-0.024)$ 。直接通路系数的绝对值越大,说明该形态无机磷对有效磷含量的直接影响越大。

表6 不同施肥处理土壤有效磷和各无机磷形态的通路分析

Table 6 Path analysis of soil Olsen-P and inorganic phosphorus forms in different fertilization treatments

因子 Factor	直接通路系数 Direct path coefficient	间接通路系数 Indirect path coefficient						相关系数 Correlation coefficient
		→ $\text{Ca}_2\text{-P}$	→ $\text{Ca}_8\text{-P}$	→ Al-P	→ Fe-P	→ $\text{O}_\text{C}\text{-P}$	→ $\text{Ca}_{10}\text{-P}$	
$\text{Ca}_2\text{-P}$	0.762		-0.788	1.059	-0.022	0.070	-0.104	0.977 **
$\text{Ca}_8\text{-P}$	-1.231	0.488		1.330	-0.019	0.209	-0.247	0.529
Al-P	1.372	0.588	-1.194		-0.021	0.204	-0.266	0.685 *
Fe-P	-0.024	0.691	-0.977	1.173		0.133	-0.151	0.845 **
$\text{O}_\text{C}\text{-P}$	0.355	0.150	-0.724	0.790	-0.009		-0.377	0.185
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	-0.434	0.183	-0.701	0.839	-0.008	0.308		0.186

剩余通路系数 $P_e = 0.052$, 决定系数 $R^2 = 0.997$

从土壤各组分无机磷对有效磷的直接通路系数可以看出,直接通路系数与相关系数有很大不同,甚至符号相反:其中, $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 对土壤有效磷的直接贡献为正效应,但是它通过其它无机磷组分对土壤有效磷的间接贡献为负效应,导致总效应不明显,与有效磷呈不显著正相关; Fe-P 对土壤有效磷的直接贡献为负效应,但是它通过其它无机磷组分对土壤有效磷的贡献为较强的正效应,即它转化为其它形态磷被植物吸收利用,导致相关系数较大,与有效磷呈显著正相关,成为土壤的有效磷源; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 对土壤有效磷的直接贡献为较强的负效应,但是它通过其它无机磷组分对土壤有效磷的贡献为较强的正效应,即它也转化为其它形态磷被植物吸收利用,导致相关系数为正,但是与有效磷正相关不显著。这表明相关系数有时会造成一些假象。因此在有效性选择过程中,不能仅凭相关系数大小作为选择依据,通路系数更有利于解释其复杂的表型关系。

2.5.3 土壤无机磷组分与土壤有效磷的逐步回归分析

为进一步确定影响土壤有效磷含量的主要无机磷组分并分析它们之间的数量关系,利用 DPS 软件的“逐步选入—剔除”法进行逐步回归分析,得出多元回归方程:

$$Y = 70.25 + 0.97X_1 - 0.32X_2 + 0.53X_3 - 0.02X_4 + 0.15X_5 - 0.20X_6$$

式中, Y 代表土壤有效磷, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 分别代表土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。复相关系数 $M. R = 0.9986^*$, 决定系数 $R^2 = 0.9972$ 。决定系数表示方程自变量引起因变量变异占总变异的比列,说明引起因变量有效磷含量变化的 99.72% 的因素已经考虑在内。并且该回归方程达到 0.01 显著水平,表明此方程已较好地反映了土壤有效磷与无机磷组分之间的数量关系。即此方程可以在一定范围内对土壤中的有效磷或无机磷组分的含量进行预测。

$\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 对有效磷 Y 的偏回归系数为正值,对有效磷含量具有正作用, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 对有效磷 Y 的偏回归系数为负值,对有效磷含量具有负作用,这与直接通路系数的结果一致。

采用相关分析、通路分析和回归分析方法对土壤有效磷与无机磷组分间的关系进行了较为系统的分析。简单相关分析表明,土壤有效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P 呈极显著正相关,与 Al-P 呈显著正相关。与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ -

P 正相关不显著;通径分析结果表明,对土壤有效磷直接影响较大的无机磷组分是 Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 。其中, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的直接影响为负效应;利用逐步线性回归分析,通过各自变量的偏回归系数,也可以了解各无机磷组分对有效磷的贡献大小,结果与通径分析一致。综合考虑相关分析、通径分析、回归分析的结果, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 是最有效的磷源, Fe-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是仅次于它们的有效磷源, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 非有效磷源。

2.6 定位施肥对蔬菜产量的效应

为了探讨土壤无机磷组分与蔬菜产量的关系,选择最能代表供试土壤肥力水平的最后一季蔬菜产量进行研究。各施肥处理莴笋最后一季的产量 (kg/hm^2) 大小依次为: $+M_2(40185) > +M_1(38490) > +K(36435) > +P(35370) > +B(33495) > +N(31770) > \text{CF}(30000) > \text{CK}(29010) > \text{CK}_0(18960)$;白菜最后一季的产量大小依次为: $+M_2(65635) > +M_1(62445) > +K(56430) > +P(51840) > +B(48825) > +N(44580) > \text{CF}(40680) > \text{CK}(38745) > \text{CK}_0(28123)$,顺序与莴笋一致。

对土壤各形态无机磷与蔬菜产量作相关分析。从表 7 看出,莴笋产量与土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 呈显著正相关,与 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 无相关性。白菜的相关分析结果与莴笋一致。各形态无机磷与莴笋产量的相关系数 r 大小依次为: $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O}_\text{C}\text{-P}$ 。白菜的相关系数大小顺序与莴笋一致。说明在紫色菜园土中,各形态无机磷与蔬菜产量的相关密切程度从大到小依次为 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O}_\text{C}\text{-P}$ 。这与上文各形态无机磷与有效磷简单相关分析的结果一致,说明通过有效磷角度研究各无机磷组分对磷素有效性的贡献是可行的。

表 7 无机磷各组分与蔬菜产量的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between inorganic P fractions and vegetable yields

蔬菜 Vegetable	$\text{Ca}_2\text{-P}$	Al-P	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Fe-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	$\text{O}_\text{C}\text{-P}$
莴笋 Lettuce	0.82 **	0.77 *	0.73 *	0.81 **	0.21	0.41
白菜 Chinese cabbage	0.88 **	0.79 *	0.70 *	0.82 **	0.22	0.31

$r_{0.05}=0.666, r_{0.01}=0.798, n=9$

3 结论

3.1 以 $\text{N}_{15}\text{P}_5\text{K}_{10}$ 为基础增施有机肥(菜籽粕、泥炭)明显提高紫色土壤全磷、无机磷及无机磷各组分(除泥炭处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$,菜籽粕处理 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$)的含量,使无机磷中有效磷源与缓效磷源的比例增加;增施磷肥、钾肥也能提高土壤全磷、无机磷及无机磷各组分含量,但不能有效提高无机磷中有效磷源与缓效磷源的比例;无肥、常规施肥及增氮处理降低土壤全磷、无机磷及无机磷各组分含量,相对增大潜在磷源的比例。从改善土壤供磷水平看,增施有机肥(菜籽粕、泥炭)为最优。

3.2 紫色菜园土中,无机磷在土壤全磷中占主导地位,是有机磷的 4—6 倍;而无机磷中以钙磷为主,占 I-P 总量的 60.89%—67.92%,显示紫色土风化程度较低;紫色土无机磷有一半左右以不能被作物利用的潜在磷源存在,因而磷素生物有效性低。

3.3 紫色土壤中不同形态磷之间多存在显著正相关,土壤 pH 值与各形态磷关系密切。

3.4 运用相关分析、通径分析及逐步回归分析对紫色土壤有效磷与无机磷组分间关系的分析结果, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 是最有效的磷源, Fe-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是仅次于它们的有效磷源, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与 $\text{O}_\text{C}\text{-P}$ 非有效磷源。

致谢:王晓晶、陈怡、吕惠峰、赵欢等给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Lu R K. Methods of Agricultural Chemical Analysis in Soil. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 169-175.
- [2] Zhang Y Z. Situation and development of phosphate fertilizer industry in China. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2007, (1): 1-4.
- [3] Lu R K. The Principle and Fertilization of Soil-Plant Nutrition. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 152-153.
- [4] Pote D H, Daniel T C, Sharpley A N, Moore P A, Edwards D R, Nichols D J. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 855-859.

- [5] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, Boulding K W T. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 904-910.
- [6] Yang F, He Y Q, Li C L, Xu J B, Lin T. Effect of fertilization on phosphorus forms and its availability in upland red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 794-798.
- [7] Zhou B K, Zhang X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(2): 143-147.
- [8] Lin D X, Fan X H, Hu F, Yang L Z, Han X Z. Forms of phosphorus in Hapli-Udic isohumols soils after long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4): 605-610.
- [9] Li L, Li X H, Li X Y, Li Y T, Zhao B Q. Effect of long-term fertilization on accumulation, transformation and availability of phosphorus in Fluvio-aquic soil. *Soils and Fertilizers*, 2005, (3): 32-35.
- [10] Wang P, Li F M, Liu S Y, Wu Y M, Wang J. Effects of long-term fertilization on forms of inorganic phosphorus in calcic kastanozems. *Soils*, 2005, 37(5): 534-540.
- [11] Xiong J F, Shi X J, Mao Z Y. Long-term experimental study on changes and availability of inorganic-P forms in purple soil. *Soils*, 2000, 32(5): 262-265.
- [12] Li Z M. *Purple Soils in China (I)*. Beijing: Science Press, 1991: 210-214.
- [13] Zhong P, Yang J Y, Wang Z Y. Research on vegetable responses to long-term fertilization in continued lettuce-cabbage rotations. Research on best nutrient management for different cropping systems in the southwest China. Chengdu: Sichuan University Press, 2009: 159-173.
- [14] Jiang B F, Gu Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Agricultural Sciences in China*, 1989, 22(3): 58-66.
- [15] Bao S D. *Soil Agro-Chemical Analysis*. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 141-149.
- [16] Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil p pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation I. Crop yield effect of fertilizer P and dynamics of soil total P and inorganic P. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 360-364.
- [17] Liu J L, Liao W H, Zhang F H, Gao Z L. Variation and distribution of individual phosphorus pool in the soil profile of vegetable fields. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2004, 27(6): 6-11.
- [18] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 105-110.
- [19] Jiang B, Lin X Y, Zhang Y S. Phosphorus status and index for predicting environmental risk of phosphorus leaching in typical vegetable soils of Hangzhou. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2008, 34(2): 207-213.
- [20] Jiang B F, Gu Y C, Lu R K. Effect of weathering on the transformation and availability of phosphorus in different fractions of particle size of main soils of China. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(2): 134-143.
- [21] Baggie I, Rowell D L, Robinson J S, Warren G P. Decomposition and phosphorus release from organic residues as affected by residue quality and added inorganic phosphorus. *Agroforestry Systems*, 2004, 63(2): 125-131.
- [22] Sekhon G S, Black C A. Uptake of phosphorus by plants in relation to carbon dioxide production and organic phosphorus mineralization in soils. *Plant and Soil*, 1968, 29(2): 299-334.
- [23] Dang Y H, Zhang M. The position study on effect of organic manure on soil nutrient content, forms and transformation in Heilu soil. *Agricultural Research in The Arid Areas*, 1999, 17(4): 1-4.
- [24] Sheng S M. *Soil Fertility in China*. Beijing: China Agricultural Press, 1998: 101-166.
- [25] Jiang B F, Gu Y C, Li A. Transformation of phosphate fertilizers with different solubilities in calcareous soils. *Pedosphere*, 1993, 3(2): 145-152.
- [26] Walker T W, Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 1976, 15(1): 1-19.
- [27] Liang Y Y, Huang Y Z, Meng F Q, Zhu Y G. Effect of organic acids on the activation of phosphorus in vegetable garden soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1171-1177.
- [28] Yang J H, Wang C L, Dai H L. *Soil Agrochemical Analysis and Environmental Monitor*. Beijing: China Land Press, 2008: 61-66.
- [29] Wang Y L, Wang J, Zhao L P, Cai H G. Study on forms of inorganic phosphates and their usefulness in black soils in Jilin Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 85-89.

参考文献:

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 169-175.
- [2] 张永志. 中国磷肥工业现状及发展思路. *中国土壤与肥料*, 2007, (1): 1-4.
- [3] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998: 152-153.

- [6] 杨芳,何园球,李成亮,徐江兵,林天. 不同施肥条件下红壤旱地磷素形态及有效性分析. 土壤学报, 2006, 43(5): 794-798.
- [7] 周宝库,张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 143-147.
- [8] 林德喜,范晓晖,胡锋,杨林章,韩晓增. 长期施肥后筒育湿润均腐土中磷素形态特征的研究. 土壤学报, 2006, 43(4): 605-610.
- [9] 李莉,李絮花,李秀英,李燕婷,赵秉强. 长期施肥对褐潮土磷素积累、形态转化及其有效性的影响. 土壤肥料, 2005, (3): 32-35.
- [10] 王平,李凤民,刘淑英,吴银明,王娟. 长期施肥对黑垆土无机磷形态的影响研究. 土壤, 2005, 37(5): 534-540.
- [11] 熊俊芬,石孝均,毛知耘. 紫色土无机磷形态转化及其有效性的定位研究. 土壤, 2000, 32(5): 262-265.
- [12] 李仲明. 中国紫色土(上篇). 北京: 科学出版社, 1991: 210-214.
- [13] 钟攀,李建勇,王正银. 蔬菜轮作定位施肥复合效应研究. 西南地区作物系统养分管理研究. 成都: 四川大学出版社, 2009: 159-173.
- [14] 蒋柏藩,顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58-66.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005: 141-149.
- [16] 刘建玲,张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 I. 磷肥产量效应及土壤总磷库、无机磷库的变化. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360-364.
- [17] 刘建玲,廖文华,张风华,高志岭. 菜园土各形态磷库的变化及空间分布. 河北农业大学学报, 2004, 27(6): 6-11.
- [19] 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. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 34(2): 207-213.
- [20] 蒋柏藩,顾益初,鲁如坤. 风化对土壤粒级中磷素形态转化及其有效性的影响. 土壤学报, 1984, 21(2): 134-143.
- [23] 党延辉,张麦. 有机肥对黑垆土养分含量、形态及转化影响的定位研究. 干旱地区农业研究, 1999, 17(4): 1-4.
- [24] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 101-166.
- [27] 梁玉英,黄益宗,孟凡乔,朱永官. 有机酸对菜地土壤磷素活化的影响. 生态学报, 2005, 25(5): 1171-1177.
- [28] 杨剑虹,王成林,代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008: 61-66.
- [29] 王艳玲,王杰,赵兰坡,蔡洪光. 黑土无机磷形态及其有效性研究. 水土保持学报, 2004, 18(3): 85-89.

CONTENTS

Physiological responses of five deciduous broad-leaved tree seedlings in the Northeast Area of China to burning	WANG Rong, HU Haiqing (2303)
The occurrence regularity of psyllid in <i>Haloxylon</i> spp and its influencing factors	LI Fenlian, WU Xuehai, WANG Peiling, et al (2311)
The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques	LIU Shuangna, ZHOU Tao, SHU Yang, et al (2320)
Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality	ZHAO Peng, XIA Beicheng, QIN Jianqiao, et al (2331)
Red fox habitat selection and landscape feature analysis in the Dalai Lake Natural Reserve in Inner Mongolia	ZHANG Honghai, LI Chengtao, DOU Huashan, et al (2342)
Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin	XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu, et al (2351)
Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models	ZHAI Tianqing, LI Xinhai (2361)
Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010	ZHANG Li, ZHANG Yunhui, ZENG Juan, et al (2371)
Genetic diversity based on cytochrome <i>b</i> gene analysis of different geographic populations of blue sheep in China	LI Nannan, LIU Zhensheng, WANG Zhenghuan, et al (2381)
Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills	LU Shiyang, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2390)
Ecosystem and soil respiration of a poplar plantation on a sandy floodplain in Northern China	FANG Xianrui, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, et al (2400)
Estimating total nitrogen content in water body based on reflectance from wetland vegetation	LIU Ke, ZHAO Wenji, GUO Xiaoyu, et al (2410)
Analysis on complete F type of mitochondrial genome in <i>Lamprotula lei</i>	CHEN Ling, WANG Guiling, LI Jiale (2420)
The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed	LI Chongwei, HU Jie, WANG Sa, et al (2430)
Responses of soil nematode communities to soluble salt contamination around Gangue hill in Fushun	ZHANG Weidong, LV Ying, XIAO Ying, et al (2439)
Effect of aboveground competition on biomass partitioning of understory Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>)	WANG Jinsong, FAN Xiuhua, FAN Juan, et al (2447)
Research of methane metabolic microbial community in soils of slash pine plantation and Masson pine plantation	WANG Yun, ZHENG Hua, CHEN Falin, et al (2458)
$\delta^{13}\text{C}$ values of stem phloem water soluble sugars of <i>Pinus massoniana</i> and <i>Cunninghamia lanceolata</i> response to meteorological factors	LU Yuxi, WANG Zhenxing, ZHENG Huaizhou, et al (2466)
Soil respiration patterns during restoration of vegetation in the Shapotou area, Northern China	GAO Yanhong, LIU Lichao, JIA Rongliang, et al (2474)
Dynamics of caloric value of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. energy forest in the west of Henan Province	TAN Xiaohong, LIU Shiqi, MA Luyi, et al (2483)
<i>Ex-situ</i> symbiotic seed germination of <i>Dendrobium catenatum</i>	WU Huifeng, SONG Xiqiang, LIU Hongxia (2491)
Effects of red/far red ratio on morphological index, leaf area and dry matter partitioning of cut chrysanthemum flower	YANG Zaiqiang, ZHANG Jibo, LI Yongxiu, et al (2498)
Effect of prometryne on root activity and oxidative stress of <i>Polygala tenuifolia</i> Willd. seedling roots	WEN Yinyuan, GUO Pingyi, YIN Meiqiang, et al (2506)
Combined effects of elevated O_3 concentration and UV-B radiation on photosynthetic characteristics of soybean	ZHENG Youfei, XU Weimin, WU Rongjun, et al (2515)
Nutrients transfer for host plant and litter decomposition by AMF in Karst soil	HE Yuejun, ZHONG Zhangcheng, DONG Ming (2525)
The dynamics of bacteria community diversity during the fermentation process of traditional soybean paste	GE Jingping, CHAI Yangyang, CHEN Li, et al (2532)
Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil	SUN Qianqian, WANG Zhengyin, ZHAO Huan, et al (2539)
A method of determining standards for ecological compensation in agricultural areas, giving priority to environmental flows in water allocation	PANG Aiping, SUN Tao (2550)
The loss of ecosystem services value caused by food security assessment model and its application	LU Weiye, JIANG Zhide, ZHANG Yinglong, et al (2561)
Review and Monograph	
Review of the current situation of coastal ecological engineering using dredged marine sediments and prospects for potential application in China	HUANG Huamei, GAO Yang, WANG Yinxia, et al (2571)
Discussion	
Quorum sensing in anaerobic ammonium oxidation bacteria	DING Shuang, ZHENG Ping, ZHANG Meng, et al (2581)
Health evaluation of Dongting Lake based on morphological characters	SHUAI Hong, LI Jingbao, XIA Beicheng, et al (2588)
Scientific Note	
Effects of mix-leaf litter decomposition of different trees in the Loess Plateau	LIU Zengwen, DU Liangzhen, ZHANG Xiaoxi, et al (2596)
Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands	MA Shaojie, LI Zhengcai, WANG Bin, et al (2603)
Effects of drought stress on photosynthesis and associated physiological characters of pepper	OU Lijun, CHEN Bo, ZOU Xuexiao (2612)
Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves	CHEN Wei, CAI Kunzheng, CHEN Jining (2620)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 8 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 8 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元