

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

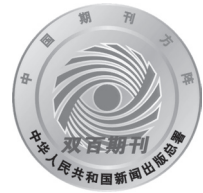
第 52 卷 第 4 期

Vol.52 No.4



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

目 次

综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田N₂O和CH₄排放的影响····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对¹⁵N利用及土壤累积的影响····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片: 离子型稀土矿废弃地全景 (由汤叶涛、刘文深提供)

DOI: 10.11766/trxb201406160285

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响*

俞映惊 薛利红[†] 杨林章 何世颖 冯彦房 侯朋福

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要 针对菜地土壤酸化趋势显著、氮肥利用率低下等突出问题, 以小白菜为供试作物, 设置了前3季连续施用化肥氮及后2季不施化肥氮的5季盆栽试验, 研究生物炭添加对酸化土壤上连续多季种植小白菜的产量、氮肥利用率以及土壤供氮能力的影响。结果表明: 在连续添加化肥氮的条件下, 生物炭添加显著增加了小白菜的产量及氮素累积量, 有效降低了土壤速效氮含量, 并提高了土壤速效氮中 NO_3^- -N含量比例, 缓解了土壤酸化趋势, 降低了小白菜中硝酸盐含量, 增加了氨基酸含量, 提高了氮肥利用率; 在停止施用化肥后, 生物炭添加处理仍能保持较高的土壤速效氮含量, 提高土壤固持氮素的有效性, 促进植株对氮素的吸收利用, 从而使产量维持在施氮条件下的高水平。研究表明生物炭添加对土壤氮素具有“削峰填谷”的调节功能, 能够有效促进氮素的吸收转化, 从而有利于维持高产。

关键词 氮素利用率; 土壤酸化; 小白菜; 生物炭

中图分类号 S157 **文献标识码** A

氮素是蔬菜作物生长发育不可或缺的矿质营养元素, 对提高产量效果显著。在经济收益驱动及高产必须高投入的错误观念指导下, 菜农往往盲目过量地施用肥料氮。李俊良等^[1]调查发现菜地氮素添加量高出大田4倍~10倍, 是蔬菜生长所需量的6倍~8倍。肥料高投入带来的是低下的氮肥利用效率与土壤氮素的大量残留。曹兵等^[2]在田间试验中测得菜地氮肥利用率仅14.6%~42.5%, 残留率超过50%。尹睿等^[3]研究发现, 稻田改种蔬菜后土壤 NH_4^+ -N含量较原先上升了21倍, NO_3^- -N上升了22倍。残留肥料氮在土壤中发生硝化反应, 成为推动土壤酸化的主要原因^[4-5]。而酸化土壤将抑制蔬菜作物的生长, 降低产量, 减少蔬菜对氮素的吸收, 从而降低化肥氮的利用效率, 造成恶性循环。土壤酸化的危害性不仅在于其对当前农业和生态环境的影响, 更重要的是受其影响的土地面积及其对农业和环境的影响程度均将随时间的增加而迅速增加^[5]。早在2004年, 刘付程等^[6]研究发现该地

区85%以上的典型土壤pH较第二次土壤普查时要低, 平均降幅达0.56个单位; 而常熟和吴县地区的土壤pH下降了约1.0个单位^[7]。本研究供试土壤采自江苏宜兴, 为湖白土, 土壤速效氮含量为 54.71 mg kg^{-1} , pH为5.32, 而该区同样土壤类型稻田土壤速效氮含量仅为 16.79 mg kg^{-1} ^[8], 参考pH范围在 6.10 ± 0.37 ^[9]。与稻田土壤相比, 虽然速效氮含量并未超过 150 mg kg^{-1} 的富足标准, 但已高出3倍, 且土壤酸化明显。由此可见, 太湖地区土壤酸化呈现不断加速趋势已是不争事实。减少土壤氮素残留, 提高肥料氮利用率, 是缓解土壤酸化的关键步骤。

利用生物质热裂解炭化(生物炭)还田, 最早是以实现土壤碳封存为目的被提出^[10], 其在农业生产上的应用仍在起步状态。秸秆炭还田不同于秸秆直接还田, 生物炭稳定的理化性质、丰富的孔隙结构及其对氮化合物强大的吸附效果^[11-12], 可有效调控土壤中的速效氮; 它的石灰性能够有效调

* 江苏省农业科技自主创新项目(CX(13)3039)、水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-004)和江苏省太湖水环境综合治理科研课题(20130209)资助

[†] 通讯作者, E-mail: njxuelihong@gmoip.com

作者简介: 俞映惊(1986—), 女, 江苏南京人, 硕士, 助理研究员, 主要从事面源污染相关研究。E-mail: 171816196@qq.com

收稿日期: 2014-06-16; 收到修改稿日期: 2014-09-26

节土壤pH,适用于酸化土壤的改良;与此同时,生物炭作为碳源进入土壤,影响着土壤中的氮素循环^[13-14]。已有研究表明,生物炭对森林土壤氮矿化具有促进作用^[15-16],但对农田土壤氮转运的作用结果却并不统一^[17-18];对农作物产量的影响结论也不一致^[19]。现有研究主要针对贫瘠土壤的改良, Jia对菜地生物炭的研究主要针对温室气体的排放^[20],而将生物炭应用于氮素冗余土壤环境,研究其对氮素利用及转运的研究并不多见;对生物炭添加条件下氮素利用率、尤其是连续多季连续种植的综合利用率研究更是寥寥。通过利用生物炭的吸附性和石灰性^[12],本研究以酸化菜地土壤为研究对象,以小白菜为供试作物,通过添加生物炭处理来研究其对蔬菜产量、氮素的吸收利用转化及土壤速效氮、土壤pH等影响,探索生物炭添加能否促进作物对氮素的吸收、调节土壤氮素转运并缓解酸化,以期为生物炭在酸化菜地土壤上的应用提供科学支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与供试作物

供试土壤取自太湖地区江苏省宜兴市大浦镇漳渎村。土壤类型为湖白土,曾多年种植水稻,后改种蔬菜并耕作超过三年。土壤基本理化性质如下: pH5.32、有机质30.26 g kg⁻¹、全氮1.83 g kg⁻¹、速效氮54.71 mg kg⁻¹、铵态氮10.68 mg kg⁻¹、硝态氮44.03 mg kg⁻¹、有效磷(Olsen-P)73.04 mg kg⁻¹、速效钾52.13 mg kg⁻¹。供试作物为小白菜(pakchoi, *Brassica chinensis* L.)。

1.2 试验设计与田间管理

采用盆栽试验,在江苏省农业科学院基地设施大棚内进行。试验设置4个处理:添加生物炭及化肥氮处理(BC+U)、单施化肥氮处理(U)、单加生物炭处理(BC)及空白处理(N0),每个处理设6个重复,随机排列。生物炭为小麦秸秆炭,450℃煅烧,比表面积7.37 m² g⁻¹、孔容0.01 cm³ g⁻¹、孔径6.25 nm、总碳503.1 mg g⁻¹、总氮12.52 mg g⁻¹、铵态氮3.02 mg kg⁻¹、硝态氮1.82 mg kg⁻¹。化肥氮采用普通尿素。采用塑料长方盆(28 cm × 15 cm × 10 cm),每盆装土2 kg,对应处理生物炭在初始季前按照1%比例拌入土壤,各处理磷钾肥施用量相同,按P₂O₅ 150 kg hm⁻²、K₂O 100 kg hm⁻²

做底肥一次性施入。试验共开展5季,分为化肥氮添加(第一至三季)及氮素消耗(第四至五季)两个阶段。第一阶段对应处理每季连续添加化肥氮;第二阶段所有处理均不再添加肥料氮。白菜撒播,出苗后第7、14天两次间苗保证每盆株数均为20,第15天按照N 100 kg hm⁻²施用尿素溶液(仅前三季),第35天收获。试验始于2013年6月下旬,第五季结束点为2014年3月下旬。

1.3 样品采集与分析

叶菜生长情况的测定:收获前一天进行叶片的SPAD值测量,每盆选取全展叶10片,使用叶绿素测定仪(日本SPAD-502)分别测量3点,读取数值求平均,作为该处理代表值。收获时取小白菜整株样品,分别称量整株、根系及地上部分鲜重。部分鲜样用液氮保存,用于测定硝酸盐及氨基酸含量。其余部分烘干(60℃烘至恒重),计算含水量,得到作物生物量,然后研磨过100目筛,测定氮素含量。地上部分鲜重作为产量,整株干重作为该处理小白菜该季生物量,根冠比=地下部分干重/地上部分干重 × 100%。

小白菜氮累积量、硝酸盐含量及氨基酸含量的测定:小白菜氮素含量采用凯氏定氮法^[21]测定。小白菜氮素含量与生物量的乘积即该季小白菜的氮累积量。硝酸盐及氨基酸含量测定均取用鲜样,液氮研磨,硝酸盐含量采用GB/T5009.33-2010食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定方法,氨基酸含量采用茚三酮法测定。

土壤速效氮的测定:单季小白菜收获后,每盆土壤混匀后,取部分土壤鲜样,采用2 mol L⁻¹ KCl溶液浸提、振荡^[23],取上层清液用流动分析仪测定其中NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量,并同步105℃烘干测定各土壤样品含水量,计算最后的土壤速效氮含量。

1.4 数据计算与处理

小白菜氮肥利用率的计算^[22]:

氮肥表观利用率(Nitrogen recovery efficiency)(%) = [(施氮处理小白菜氮累积量 - 不施氮处理小白菜氮累积量) / 施氮量] × 100%

氮肥农学利用率(Agronomic nitrogen utilization efficiency)(kg kg⁻¹) = (施氮处理小白菜产量 - 不施氮处理小白菜产量) / 施氮量

采用Microsoft Excel软件对数据进行统计、制图;采用SPSS中Duncan法对数据进行差异显著性

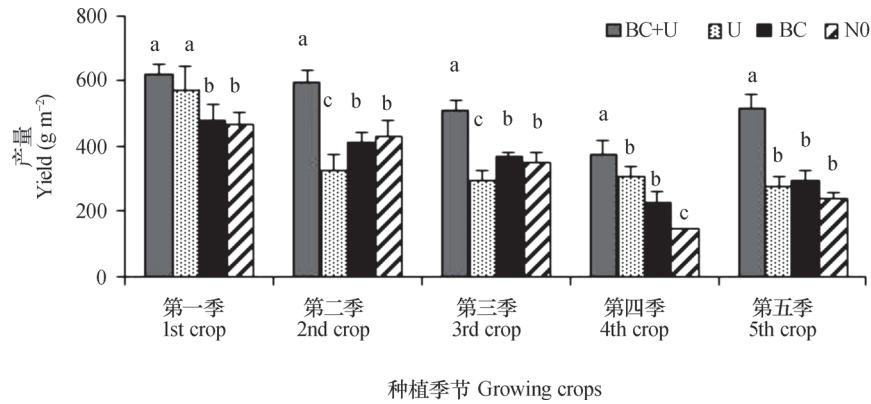
分析 ($p < 0.05$)。

2 结 果

2.1 生物炭添加对小白菜产量及形态的影响

肥料氮添加仅在试验第一季显著增加了产量，此后2季连续添加肥料氮处理产量明显下降，甚至显著低于无氮处理（图1）。生物炭的添加促进了产量，尤其是在施氮的条件下，其第二、三季的产

量较单施氮肥处理增加了70%以上。停止肥料氮添加后，单施氮肥处理的产量几乎维持在第三季的水平，无氮处理的产量略有下降，较第一季降低了30%左右，而BC处理产量较最初产量水平差异不显著，较N0处理分别增加了48%和32%，甚至较U处理增加了39%和25%。最值得一提的是生物炭与肥料氮共同添加的BC+U处理，在连续2季不施氮肥后，依然能够保持该处理最初的产量水平，较U处理产量高出近一倍。



注：BC+U：添加生物炭及化肥氮处理；U：单施化肥氮处理；BC：单加生物炭处理；N0：空白处理；下同
Note: BC+U: Application of biochar and urea. U: Application of urea only. BC: Application of biochar only. N0: Nothing applied. The same below

图1 连续五季种植不同处理小白菜产量（鲜重）变化

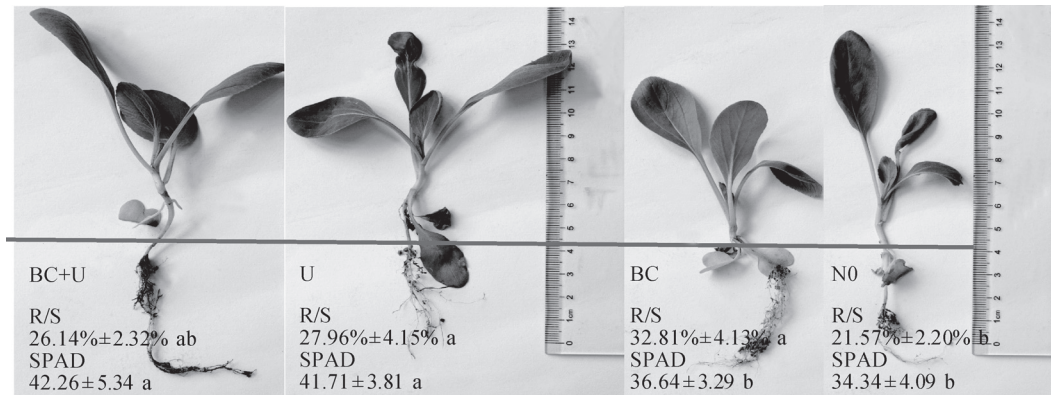
Fig. 1 Variation of yield (fresh weight) of pakchoi during the 5 croppings relative to treatment

如图2所示，无肥料氮条件下，添加生物炭显著促进了小白菜根系的生长，BC处理根冠比超过32%，4个处理中最高，N0处理最低，不足22%。肥料氮添加时，生物炭对根系生长的促进作用不显著。叶片SPAD值反映的是叶片的绿度，与叶绿素含量和氮素含量密切相关，生物炭添加在有无肥料

氮情况下均未对SPAD值造成显著影响。

2.2 生物炭添加对小白菜氮吸收及贮存形态的影响

小白菜氮素累积量的变化趋势与产量一致（图3），且差异更为显著。肥料氮与生物炭共同添加对小白菜氮累积的促进作用显著，BC+U处理的氮素累积量在各种植季均显著高于其他处理。虽然，



注：图中数据为前三季收获期的数据 Note: Data cited are from the first three croppings

图2 生物炭与肥料氮作用下的小白菜叶片SPAD值及根冠比（R/S）

Fig. 2 Leaf SPAD and root-shoot ratio (R/S) of pakchoi relative to treatment

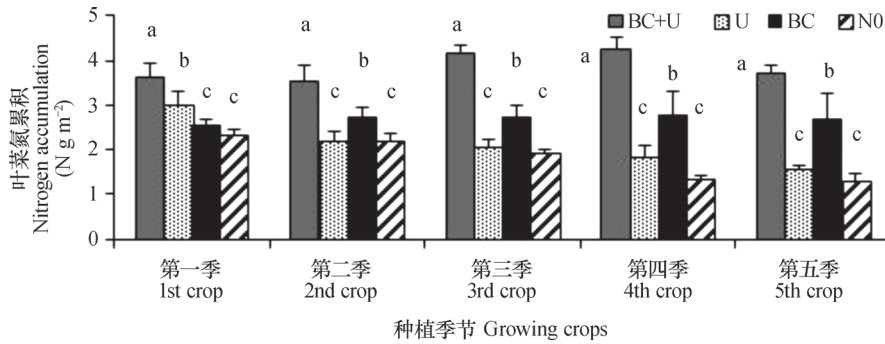


图3 连续五季种植不同处理小白菜氮积累量变化

Fig. 3 Nitrogen accumulation in pakchoi of the five croppings relative to treatment

初始季U处理产量数据并未较BC+U处理产生显著差异,但其氮积累量已低于16%以上,达显著水平;且自第二季起U处理氮积累量显著低于无肥料氮添加的BC处理,略高于N0处理。无肥料氮条件下,N0处理的氮积累量逐季下降显著,第五季时仅为初始季的55%,而生物炭添加使小白菜氮积累水平连续5季保持在一个较为稳定的水平。由此可见,生物炭对小白菜连续多季种植具有维持氮积累量在适当水平的作用,而单纯性连续添加肥料氮,氮素积累水平下降迅速。

如图4所示,连续种植条件使得小白菜(鲜重)硝酸盐含量下降显著,下降趋势随种植季度的

增多而增大。无肥料氮添加条件下,生物炭添加显著增加了小白菜中硝酸盐水平,自第二季起,BC处理较N0处理高12%~44%。而肥料氮添加条件下,前三季单纯施氮处理(U处理)小白菜硝酸盐含量较高于有生物炭添加的BC+U处理,后两季停止肥料氮后,差异不显著;停止肥料氮添加后,U处理硝酸盐水平下降迅速,与BC处理数值接近。氨基酸的变化趋势与硝酸盐相反,整体呈现上升趋势。生物炭添加显著提高了小白菜的氨基酸含量,BC+U处理较U处理氨基酸含量提高了20%~34%,BC较N0提高了20%~63%。

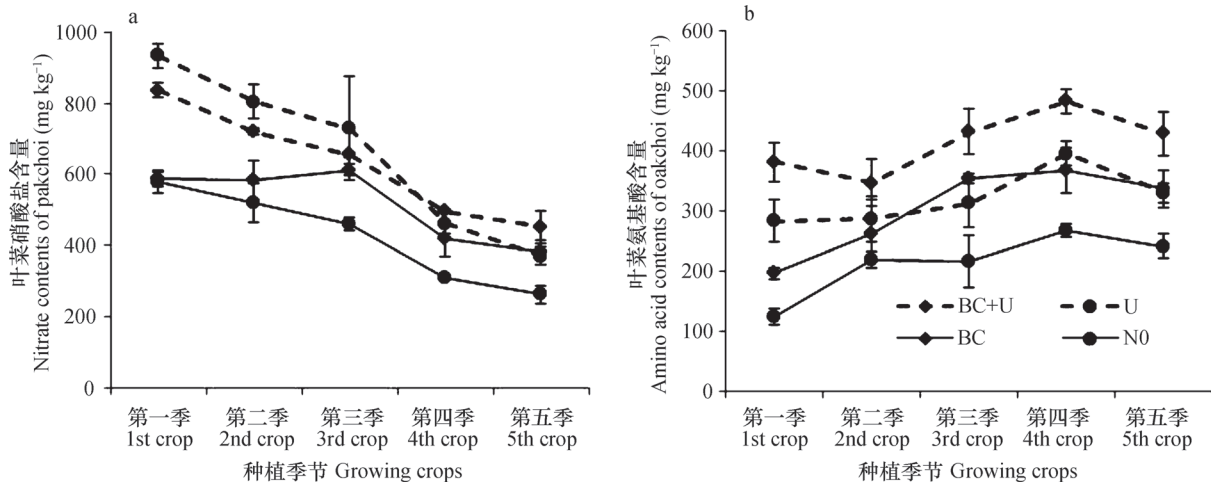


图4 小白菜(鲜样)多季硝酸盐(a)及氨基酸(b)含量变化

Fig. 4 Variation of nitrate (a) and amino acid (b) contents in pakchoi (fresh) of the 5 croppings relative to treatment

2.3 生物炭添加对肥料氮利用率的影响

从表1可以看出,蔬菜的肥料利用率总体较低,表观利用率在0.01%~22%之间,真实反映了当前苏南地区菜地实际生产情况。生物炭添加对肥料氮利用率提升效果显著(表1),连续种植5季

的综合利用率为33.9%,为U处理的6.4倍。另一方面,单纯施氮处理(U处理)的农学利用率自第二季起出现负值,即肥料氮的连续添加,抑制了小白菜对氮的利用,产量出现低于空白(N0处理)的现象,而表观利用率并未全为负值,说明其吸收的

表1 肥料氮添加处理当季及多季氮利用率

Table 1 Apparent nitrogen recovery and agronomic nitrogen utilization efficiency of pakchoi with urea addition in different growing crops

种植季节 Growing crops	氮肥表观利用率		氮肥农学利用率	
	Apparent nitrogen recovery efficiency (%)		Agronomic nitrogen utilization efficiency (kg kg ⁻¹)	
	BC+U	U	BC+U	U
第一季 1st crop	12.85 ± 2.33a	6.99 ± 2.13b	1.31 ± 0.16a	0.88 ± 0.35a
第二季 2nd crop	13.32 ± 2.43a	0.01 ± 0.97b	1.66 ± 0.23a	-1.04 ± 0.20b
第三季 3rd crop	22.22 ± 1.10a	1.37 ± 0.98b	1.66 ± 0.10a	-0.60 ± 0.04b
整个实验周期 Total	33.93 ± 2.20a	5.30 ± 1.39b	3.48 ± 0.20a	-0.15 ± 0.14b

氮素并未转化成产量，而是累积在叶片中，这也是图4中U处理小白菜硝酸盐含量较高的原因。综合五季整体氮肥利用率数据，可见，生物炭添加对小白菜利用肥料氮具促进作用，而盲目连续单纯性施氮会严重影响小白菜对氮的利用。

2.4 生物炭添加对土壤速效氮含量的影响

从表2可以看出，肥料氮添加增加了土壤中速效氮的含量，单纯施氮处理（U处理）连续添加三季后土壤速效氮含量由55 mg kg⁻¹上升至118 mg kg⁻¹，并未显示持续增加趋势；停止肥料氮投入后，U处理速效氮含量显著下降。而生物炭添加处理

（U+C）较好地维持了土壤速效氮水平，停止肥料氮投入两季后，保持在40 mg kg⁻¹水平上下。无肥料氮添加处理（BC及N0处理）土壤速效氮含量低于20 mg kg⁻¹，无生物炭条件下（N0处理）呈不断下降趋势。

肥料氮添加条件下，NO₃⁻-N所占速效氮比例较大。不添加肥料氮处理前两期，NH₄⁺-N是土壤速效氮的主要形态；连续种植多季后，土壤速效氮形态以NO₃⁻-N为主。生物炭增加了土壤速效氮中NO₃⁻-N的含量比例，该趋势在无肥料氮添加条件下更为明显。

表2 不同处理各种植季土壤速效氮含量及硝态氮比例

Table 2 Readily available nitrogen (N) content and proportion of NO₃⁻-N in the soil relative to treatment and cropping

种植季节 Growing crops	BC+U		U		BC		N0	
	速效氮 ^① (mg kg ⁻¹)	硝态氮比例 ^② (%)	速效氮 ^① (mg kg ⁻¹)	硝态氮比例 ^② (%)	速效氮 ^① (mg kg ⁻¹)	硝态氮比例 ^② (%)	速效氮 ^① (mg kg ⁻¹)	硝态氮比例 ^② (%)
第一季 1st crop	98.73 ± 9.49a	61.92	100.56 ± 2.26a	69.11	14.45 ± 0.57b	34.64	13.10 ± 0.17b	19.40
第二季 2nd crop	99.19 ± 9.48b	60.56	118.57 ± 5.62a	42.55	13.40 ± 0.54c	37.23	11.16 ± 0.14c	18.81
第三季 3rd crop	103.16 ± 1.64b	62.68	115.50 ± 8.22a	61.43	19.73 ± 0.70c	71.82	9.98 ± 0.77d	40.14
第四季 4th crop	45.83 ± 0.40a	91.37	28.27 ± 1.63b	87.72	17.83 ± 1.05c	86.80	4.94 ± 0.24d	60.73
第五季 5th crop	39.80 ± 4.36a	94.87	11.06 ± 0.50b	83.41	17.66 ± 1.10c	89.44	5.69 ± 0.41d	74.10

①Readily available N, ②Proportion of NO₃⁻-N

3 讨论

3.1 生物炭添加对小白菜氮素利用效率及形态的影响

小白菜大量施用肥料氮在太湖流域非常普遍^[1, 24], 在经济利益驱动下, 每年连续多茬种植加剧恶化了过量施用肥料氮带来的土壤酸化等环境问题^[25]。而生物炭添加则能有效缓解土壤酸化的趋势^[12]。根据本研究结果, 第三季试验结束时, U处理pH已由初始5.32下降至4.61, 而BC+U处理pH为5.12, 显著高于U处理(表3)。目前菜地普遍使用尿素作为肥料氮源, 尿素施入土壤后水解成为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 在好氧条件下发生硝化反应, 每产生1 mol $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 伴随2 mol H^+ 的释放($\text{NH}_4^+ + 3/2 \text{O}_2 = \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$; $\text{NO}_2^- + 1/2 \text{O}_2 = \text{NO}_3^-$), 而作物吸收硝态氮时仅消耗1 mol H^+ , 仍有1 mol H^+ 残留在土壤中, 从而导致土壤酸化, 由此可见, 单纯施用肥料

氮是导致土壤酸化的重要因素^[4-5]。

由于本研究供试土壤本身呈酸性, 因此连续添加尿素氮后土壤酸化更加明显, 植物生长受到显著影响。本研究试验表明, 单纯氮添加处理的小白菜自第二季起植株体内氮素吸收量明显下降(图3), 氮肥农学利用率出现负值(表1), 产量降低了30%以上(图1)。然而通过生物炭的改善, 土壤酸化状况得到一定的缓解, 小白菜生长明显好转, 与单纯添加肥料氮(U处理)相比, BC+U处理在5个种植季均显著提高了小白菜的产量, 这也得到前期研究结果的支持^[13]。此外, 相对于肥料氮处理, 生物炭添加降低了小白菜硝酸盐含量(约10%左右), 并提高了氨基酸含量(20%~38%)(图4)。表明生物炭添加不仅提高了小白菜对肥料氮的吸收利用效率以及产量, 还影响了叶片中氮素的贮存形态(硝酸盐和氨基酸)。

小白菜为喜硝作物, 主要吸收土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 供

表3 不同处理添加化肥氮试验前后土壤pH的变化

Table 3 Soil pH before and after the experiment in treatments applied with urea

初始土壤pH Original pH of soil	第三季结束时土壤pH Soil pH after 3rd crop			
	BC+U	U	BC	NO
5.32 ± 0.26	5.12 ± 0.21ab	4.61 ± 0.39b	5.42 ± 0.33a	5.17 ± 0.47ab

植物生长需求^[26]。因此, 单纯施用化肥氮在促进小白菜生长的同时, 也提高了小白菜中硝酸盐含量。而人体摄入的硝酸盐85%~90%来自于蔬菜^[27], 通过生物炭添加可在不影响小白菜产量的前提下降低小白菜体内硝酸盐含量, 进而减少硝酸盐积累可能对人体健康的危害。研究显示作物根系对阳离子的吸收能随pH升高而加速, 阴离子则相反^[28]。添加生物炭后, 土壤酸化过程被缓解, 因此对硝酸根离子的吸收也减缓, 使得小白菜体内硝酸盐含量与单纯施氮条件相比呈现下降趋势。氨基酸作为小白菜体内氮素的另一贮存形式, 不仅来自于对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的直接吸收同化, 也来自于体内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的同化还原。同时, 氨基酸循环还是传输地上部分氮需求信息的主要方式^[29]。生物炭添加带来的小白菜氨基酸含量增加和硝酸盐含量下降, 可能是因为促进了体内硝态氮向铵态氮的转化, 同时也与土壤环境pH的变化具有一定的关联性。

3.2 生物炭添加对高肥料氮投入下土壤速效氮的影响

试验土壤为太湖地区稻田改菜地土壤(种植蔬菜三年以上), 初始土壤速效氮含量为54.71 mg kg^{-1} , 而该地区同样土壤类型用于水稻种植的土壤速效氮含量仅为16.79 mg kg^{-1} ^[8]。经连续3季的肥料氮添加后, 土壤速效氮含量增加至100 mg kg^{-1} , 相比于原水稻土壤, 菜地利用方式极大增加了土壤氮素通过径流和淋溶向环境迁移的风险, 而本试验的化肥施用量已远低于当地平均水平。胡志平等^[30]对上海地区菜地氮素流失量调查显示, 化肥氮施用量在360~400 kg hm^{-2} 时, 流失氮量占总施氮量的28.1%~37.7%, 即有70 kg hm^{-2} 氮进入水体。施用化肥氮条件下, 生物炭添加在第二、三季降低了10%以上的土壤速效氮残留(表2), 这与生物炭较大的比表面积与较强的吸附能力有关^[12]。值得注意的是, 生物炭对氮素的吸附主要作用于具有正

电荷的 NH_4^+-N 。本研究结果发现生物炭添加增加了土壤中 NO_3^--N 含量的比例(表2),这与前人得出的生物炭添加会显著促进酸性土壤硝化反应发生的研究结论^[18]相符。但生物炭是否有可能增加氮素的淋溶风险,还有待进一步地研究。

4 结 论

生物炭添加维持了连续五季耕作小白菜的产量及氮素累积量,减缓了化肥氮施用带来的土壤pH下降及产量损失,降低了小白菜的硝酸盐含量,增加了氨基酸含量,有效提升了肥料氮利用率,控制了化肥氮施用条件下土壤速效氮含量的激增。生物炭对小白菜生长及肥料氮利用率的提高效果得以证实,但因其对硝化反应具促进作用,其对菜地土壤氮素流失淋溶的影响尚不明确。

参 考 文 献

- [1] 李俊良, 陈新平, 李晓林, 等. 大白菜氮肥施用的产量效应、品质效应和环境效应. 土壤学报, 2003, 40 (2): 261—266. Li J L, Chen X P, Li X L, et al. Effect of N fertilization on yield, nitrate content and N apparent losses of Chinese cabbage (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (2): 261—266
- [2] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 露地蔬菜的氮肥效应与氮素去向. 核农学报, 2008, 22 (3): 343—347. Cao B, He F Y, Xu Q M, et al. Nitrogen use efficiency and fate of N fertilizers applied to open field vegetables (In Chinese). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22 (3): 343—347
- [3] 尹睿, 张华勇, 黄锦法, 等. 保护地菜田与稻麦轮作田土壤微生物学特征的比较. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (1): 57—62. Yin R, Zhang H Y, Huang J F, et al. Comparison of microbiological properties between soils of rice-wheat rotation and vegetable cultivation (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10 (1): 57—62
- [4] Matson P A, McDowell W H, Townsend A R, et al. The globalization of n deposition: Ecosystem consequences in tropical environments. *Biogeochemistry*, 1999, 46 (1/3): 67—83
- [5] 徐仁扣. 某些农业措施对土壤酸化的影响. 农业环境保护, 2002, 21 (5): 385—388. Xu R K. Soil acidification as influenced by some agricultural practices (In Chinese). *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21 (5): 385—388
- [6] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. 地理研究, 2004, 23 (1): 63—70. Liu F C, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial and temporal variability of soil acidity in typical areas of Taihu Lake region (In Chinese). *Geographical Research*, 2004, 23 (1): 63—70
- [7] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧. 太湖流域土壤肥力演变及原因分析. 土壤, 2006, 38 (1): 106—109. Sun R J, Wang D J, Lin J H. Evolution of soil fertility in Taihu region and its causes (In Chinese). *Soils*, 2006, 38 (1): 106—109
- [8] 卢伟伟, 施卫明. 养猪场处理尾水灌溉对太湖地区水稻土硝酸根异化还原为铵的影响. 土壤学报, 2012, 49 (6): 1120—1127. Lu W W, Shi W M. Potential of dissimilatory nitrate reduction to ammonium in paddy soils in the Taihu Lake region as affected by irrigation with tail water from pig rearing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (6): 1120—1127
- [9] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 等. 近20年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素. 第四纪研究, 2004, 24 (2): 236—242. Zhang Q, Li L Q, Pan G X, et al. Dynamics of topsoil organic carbon of paddy soils at Yixing over the last 20 years and the driving factors (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2004, 24 (2): 236—242
- [10] Lehmann J. A handful of carbon. *Nature*, 2007, 447 (7141): 143—144
- [11] Hina K, Bishop P, Arbestain M, et al. Producing biochars with enhanced surface activity through alkaline pretreatment of feedstocks. *Soil Research*, 2010, 48: 606—617
- [12] Lehmann J. *Amazonian dark earths: Origin, properties, management*. Springer, 2003
- [13] Steiner C, Glaser B, Gerales Teixeira W, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171 (6): 893—899
- [14] Ding Y, Liu Y, Wu W, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 213: 47—55
- [15] Berglund L, DeLuca T, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in scots pine forests. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 (12): 2067—2073
- [16] DeLuca T, MacKenzie M, Gundale M, et al. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests. *Soil Science Society of America*

- Journal, 2006, 70 (2) : 448—453
- [17] Dempster D, Gleeson D, Solaiman Z, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant and Soil*, 2012, 354 (1/2) : 311—324
- [18] Zhao X, Wang S, Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: Laboratory incubation and column leaching studies. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 (3) : 471—482
- [19] van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 2010, 327 (1/2) : 235—246
- [20] Jia J, Li B, Chen Z, et al. Effects of biochar application on vegetable production and emissions of N₂O and CH₄. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58 (4) : 503—509
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [22] Dobermann A R. Nitrogen use efficiency - State of the art. Frankfurt, Germany: IFA International Workshop on Enhanced Efficiency Fertilizers, 2005
- [23] Jalil A, Campbell C, Jame Y, et al. Assessment of two chemical extraction methods as indices of available nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (6) : 1954—1960
- [24] 陆扣萍, 闵炬, 李蒙, 等. 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素淋失的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (4) : 706—712. Lu K P, Min J, Li M, et al. Effect of nitrogen fertilizer application rates on annual nitrogen leaching loss from protected vegetable production system in Tai Lake region, China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (4) : 706—712
- [25] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (1) : 1-8. Yang L Z, Shi W M, Xue L H, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (1) : 1—8
- [26] 王朝辉, 田霄鸿, 李生秀. 叶类蔬菜的硝态氮累积及成因研究. *生态学报*, 2001, 21 (7) : 1136—1141. Wang Z H, Tian X H, Li S X. The cause of nitrate accumulation in leafy vegetables (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (7) : 1136—1141
- [27] 沈明珠, 翟宝杰, 东惠茹, 等. 蔬菜硝酸盐累积的研究——I. 不同蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐含量评价. *园艺学报*, 1982, 9 (4) : 41—48. Sheng M Z, Zhai B J, Dong H R, et al. Studies on nitrate accumulation in vegetable crops (In Chinese). *Acta Horticulturae Sinica*, 1982, 9 (4) : 41—48
- [28] 李春俭. 高级植物营养学. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. Li C J. Mineral nutrition of higher plants (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2008
- [29] Imsande J, Touraine B. N demand and the regulation of nitrate uptake. *Plant Physiology*, 1994, 105 (1) : 3
- [30] 胡志平, 郑祥民, 黄宗楚, 等. 上海地区不同施肥方式氮磷随地表径流流失研究. *土壤通报*, 2007, 38 (2) : 310—313. Hu Z P, Zheng X M, Huang Z C, et al. Nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in farmland in Shanghai (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (2) : 310—313

EFFECT OF BIOCHAR APPLICATION ON PAKCHOI (*BRASSICA CHINENSIS* L.) UTILIZING NITROGEN IN ACID SOIL

Yu Yingliang Xue Lihong[†] Yang Linzhang He Shiyang Feng Yanfang Hou Pengfu

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract Excessive application of nitrogen (N) fertilizer is a widespread problem in vegetable field in Taihu Lake basin, which would not only cause severe non-point source pollution, but also induce soil acidification, and hinder vegetable growth, too. A number of studies have demonstrated that having a strong N adsorption capacity, biochar is able to affect N recycling in the soil and regulate soil pH in various

ecosystems, but little is known about effects on vegetable soils and vegetable production. In this study, impacts of biochar application on vegetable growth, N absorption N utilization, N transformation, soil readily available N and soil pH are explored. A pot experiment was carried out using acidified garden soil collected from Taihu Lake region and biochar prepared out of wheat straw under 450°C. The experiment was designed to have four treatments: biochar and urea (BC+U), only urea (U), only biochar (BC), and no N fertilizer treatment (N0, control) and 6 replicates for each treatment. Five continuous croppings of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) were planted. For the first three croppings, urea (N 100 kg hm⁻²) was applied into related treatments, i.e. Treatments BC+U and U; and for the following two croppings, no N was applied soil N as designed as N depletion period. Biomass of and N accumulation, nitrate and amino acid contents in pakchoi and dynamics of soil readily available N was measured during the harvest season. Soil pH was determined at the end of the experiment. Results show that application of biochar significantly promoted vegetable growth, and yield of and N accumulation in the vegetable of the 2rd and 3rd cropping was increased by over 70% and 60%, respectively, in Treatment BC+U as compared with that in Treatment U. In the last two croppings without N fertilization, the yield of and the N accumulation in the vegetable in Treatment BC+U still remained quite high, almost twice as high as that in Treatment U, thanks to the presence of biochar in the soil. N application increased nitrate and amino acid contents in the vegetable, while addition of biochar could effectively decrease nitrate content and significantly increase amino acid content in the vegetable. The apparent N recovery rate of chemical N fertilizer is quite low, ranging from 0.01% to 22%. The application of biochar obviously improved N utilization efficiency. The comprehensive average N utilization rate of the five croppings in Treatment BC+U reached 34%, 6.4 times as high as that in Treatment U. Treatment BC+U remarkably lowered the content of soil readily available N left in the soil and the proportion of nitrate-N after the crop was harvested. However, during the N depletion period (the last two croppings), Treatment BC+U still maintained a quite high content of readily available N in the soil, which was much higher than that in Treatment U. Continuous application of N fertilizer put soil pH on a declining trend, while addition of biochar dulled the declining trend effectively. Soil pH in Treatment BC+U was 0.5 higher than that in Treatment U. The findings of the experiment indicate that addition of biochar can optimize nitrogen supply of the soil by regulating nitrogen adsorption and release, stimulate N uptake and transformation by the crop, and uphold high yield of the crop. However, as for long-term impacts of biochar application on soil N recycling and crop growth, more in-depth work needs to be done in future.

Key words Nitrogen utilization efficiency; Soil acidification; Pakchoi; Biochar

(责任编辑: 陈德明)

CONTENTS

Reviews and Comments

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation Shen Lidong (721)

Soil Science and Modern Agriculture

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. (730)
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. (745)
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen (758)
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. (766)
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. (774)

Research Articles

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. (781)
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. (790)
- Research on soil water movement based on stable isotopes Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. (800)
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. (816)
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. (827)
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. (837)
- Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. (847)
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. (857)
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. (867)
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site Li Shiye, Cheng Jiemin (877)
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. (887)
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. (900)
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. (909)
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. (917)

Research Notes

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. (924)
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. (933)
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. (941)
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. (949)
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ¹⁵N in apple orchard Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. (955)

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

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

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

