

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 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/trxb201408190410

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^{1, 2} 曹卫东^{1, 3†} 白金顺¹ 高菊生^{1, 4} 黄晶^{1, 4}
曾闹华¹ 常单娜^{1, 2} 志水胜好⁵

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

(2 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

(3 青海大学青海省农林科学院, 西宁 810016)

(4 中国农业科学院衡阳红壤实验站, 湖南祁阳 426182)

(5 筑波大学生命环境系, 日本筑波县 305-8572)

摘要 以进行了31年的双季稻-冬绿肥长期定位试验的红壤性水稻土为对象, 研究了长期冬种绿肥条件下土壤微生物生物量特性的季节变化, 为阐释冬绿肥措施在稻田生态系统土壤碳氮转化中的作用机制提供理论基础。试验包括双季稻-紫云英 (RRV)、双季稻-冬油菜 (RRP)、双季稻-黑麦草 (RRG) 及双季稻-冬闲 (RRF) 4个处理, 在典型时期 (绿肥盛花期、绿肥翻压后、早稻成熟期、晚稻收获后) 采集土壤样品, 分析土壤微生物生物量碳氮及微生物商等方面的变化。结果表明, 3种冬绿肥均提高了土壤微生物生物量碳 (SMBC)、微生物生物量氮 (SMBN) 和微生物商, 在土壤性质相对稳定的晚稻收获后均显著高于对照处理, 全年平均值也多显著高于对照处理。豆科绿肥紫云英对 SMBC 和 SMBN 的提高作用最显著, 晚稻收获后相对冬闲分别提高了 21.12% 和 98.45%, 全年平均值分别提高了 15.92% 和 36.49%。取样时期对 SMBC、SMBN 和微生物商有较大的影响, 但变化趋势基本一致, 即绿肥翻压前后无明显变化, 早稻成熟期降至最低, 至晚稻收获后再次上升。SMBC/SMBN 比值在不同绿肥处理间差异不大, 但有明显的季节变化, 早稻成熟期较高而晚稻收获后降低。因此, 南方稻田冬种绿肥后土壤微生物特性明显改善, 冬种绿肥是提升稻田土壤肥力的高效措施。

关键词 绿肥; 红壤稻田; 微生物生物量碳; 微生物生物量氮; 微生物商

中图分类号 S142 **文献标识码** A

利用绿肥是提供作物养分、保障粮食产量的传统农业措施。我国各种耕作制度下存在着大量季节性闲置耕地, 并且不同区域有着多样的气候环境和种植制度, 适宜间作、轮作、混作等多种种植方式, 发展绿肥具有很大潜力^[1]。大量研究表明, 种植绿肥压青还田能够使土壤化学及生物学性状等发生改变^[2-4], 增加土壤有机质含量, 保持和改善土壤结构, 减少速效养分尤其是氮的损失, 并为后作作物提供一定氮源及其他养分^[5]。同时, 绿肥能够增加地表覆盖、减少土壤侵蚀^[6-7]。

土壤微生物生物量能够影响土壤有机质矿化及养分循环, 常被用作指示农业系统中因土壤管理和环境变化而引起的土壤理化性状变化的早期指示指标^[8-10]。虽然土壤微生物生物量碳 (SMBC) 仅占土壤总碳的 1%~4%, 土壤微生物生物量氮 (SMBN) 仅占土壤全氮的 2%~7%, 但土壤微生物生物量碳、氮却是土壤中最活跃的碳库和氮库之一^[11], 是土壤肥力的指示性指标, 农业生态系统的养分有效性和生产力很大程度上依赖于微生物生物量及其活性^[12], 因此, 研究土壤微生物生物量

* 公益性行业 (农业) 科研专项 (201103005)、中国农业科学院科技创新工程、国家农作物种质资源平台运行服务项目资助

† 通讯作者, E-mail: caoweidong@caas.cn

作者简介: 高嵩涓 (1988—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事绿肥作物及其环境化学、分子生态学效应研究。

E-mail: gaosj10@163.com

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-11-03

碳、氮是了解土壤响应环境影响的重要手段。不同的耕作制度、作物种类及管理措施对土壤微生物生物量、微生物固定作用及土壤养分有不同的影响^[11-12]。大量研究表明，种植翻压绿肥能够通过改变土壤环境和提供碳源、氮源而影响土壤微生物活性，并且能够改变其群落组成和功能，增加微生物多样性，影响微生物对碳源的利用情况^[2-3, 13-16]。

我国南方稻区存在大量冬闲田，利用冬闲田种植绿肥能够充分利用稻区冬闲耕地及水热资源。研究表明，我国南方红壤稻区在双季稻制度中加入冬绿肥，能够提升土壤肥力，提高水稻产量，是一种高效的轮作方式^[17-18]，为促进农业可持续发展提供了一种合理有效的耕作制度^[19]。在水稻生长的不同阶段，温度、降水等气象条件及稻田土壤干湿状况均有很大变化，与不同的耕作、管理措施共同影响着土壤微生物特性的年度变化。红壤稻区长期种植翻压绿肥对土壤微生物生物量碳氮等性状的影响如何、有关微生物性状在稻田不同阶段的变化怎样，文献报道较少。虽然杨曾平等^[20]研究了长期冬种绿肥对稻田土壤微生物生物量碳氮的影响，但并未涉及阶段性变化特征，长期冬绿肥条件下稻田土壤中微生物生物量碳氮特征随水稻生长的变化并不明确。为此，以进行了31年的双季稻-冬绿肥长期定位试验的红壤性水稻土为对象，研究了土壤微生物生物量特性在稻田典型时期的变化特征，以期揭示长期冬种绿肥对稻田土壤肥力及可持续生产能力的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验位于湖南省祁阳市的中国农业科学院红壤试验站内，地理位置为东经111°52′、北纬26°45′，海拔150 m，年均温度18.3℃。本研究中2013年4个取样时期所在月份3、4、7、10月的日均最高气温分别为15℃、22℃、35℃和24℃，日均最低气温分别为9℃、15℃、26℃和16℃。>10℃的积温5 600℃，多年平均降水量1 250 mm，无霜期约300 d，年日照1 610~1 620 h。

1.2 供试材料

供试土壤为第四季红色黏土发育的水稻土，土壤质地为壤质黏土，土壤中黏土矿物主要以高岭石为主。长期定位试验开始前（1982年）土壤pH为

6.5，有机质含量为20.1 g kg⁻¹，全氮、全磷、全钾含量分别为0.94、0.66、11.5 g kg⁻¹，碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为156、7.2和176 mg kg⁻¹。

供试绿肥作物分别为紫云英（*Astragalus sinicus* L.）、油菜（*Brassica napus* L.）和黑麦草（*Lolium multiflorum*）。2013年度水稻品种为：早稻金优974，晚稻金优207，均为早熟品种。

1.3 试验设计

试验采用“双季稻-绿肥”轮作种植模式，设4个处理，分别为双季稻-紫云英（RRV）、双季稻-油菜（RRP）、双季稻-黑麦草（RRG）及双季稻-冬闲（RRF）。各小区为随机区组排列，重复3次，小区面积37.5 m²（2.5 m×15.0 m），小区之间用深60 cm水泥埂隔开。

绿肥播种量分别为紫云英37.5 kg hm⁻²、油菜7.5 kg hm⁻²、黑麦草15.0 kg hm⁻²。各处理除不同绿肥措施外，其余田间管理均一致，具体为：绿肥作物不施肥，于晚稻收割前10~15 d将种子撒播于田间，次年早稻移栽前15 d左右全部翻压还田。所有处理水稻施肥量相同，早晚稻施肥量分别为N 153 kg hm⁻²、P₂O₅ 84 kg hm⁻²、K₂O 129 kg hm⁻²，分基肥和追肥2次撒施，基肥在水稻移栽前1 d施入，追肥在移栽后6~10 d作为返青分蘖肥一次施入。基肥施用三元（14-14-14）复合肥600 kg hm⁻²；追肥为尿素和KCl，施用量为N 69 kg hm⁻²、K₂O 45 kg hm⁻²。早稻插植规格为20 cm×20 cm，晚稻为20 cm×25 cm。水稻收获后，所有处理稻草移走不还田。

2013年3月28日对绿肥作物测产，3月30日翻压绿肥、翻压后即灌水，4月25日移栽早稻，7月13日收获早稻，7月17日移栽晚稻，10月5日收获晚稻。2013年绿肥翻压量（鲜质量）、干物质量及干物质养分含量见表1。本年度RRV、RRP、RRG、RRF处理的早稻产量分别为7 653、7 769、7 449、5 680 kg hm⁻²，晚稻产量分别为4 693、4 151、4 356、3 520 kg hm⁻²。

1.4 样品采集与分析

共采集4次样品，分别是绿肥盛花期（3月29日，S1，绿肥翻压前1 d）、绿肥翻压后（4月21日，S2，绿肥翻压后21 d）、早稻成熟期（7月11日，S3，早稻收获前4 d）及晚稻收获后（10月8日，S4，晚稻收割后3 d）。其中S1和S4时期土壤处于落干状态，S2和S3时期土壤处于淹水状态。取

表1 绿肥鲜草产量及干物质养分含量

Table 1 Biomass yields and nutrient contents of dry matter of green manures in 2013

处理 Treatment	鲜草产量 Fresh biomass yields (kg hm ⁻²)	干物质质量 Dry biomass (kg hm ⁻²)	全碳 Total C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	C/N
RRV	12 006	1 533	433	23.2	1.5	13.0	18.6
RRP	6 563	1 174	408	10.3	1.2	17.6	39.6
RRG	15 679	2 759	408	16.3	1.5	28.8	25.0

注: RRV、RRP和RRG分别代表双季稻-紫云英、双季稻-冬油菜和双季稻-黑麦草处理 Note: RRV, RRP and RRG represent for rice-rice-milk vetch, rice-rice-winter rape and rice-rice-ryegrass, respectively

样时用不锈钢土钻在每个小区内采用五点取样法取0~20 cm耕层土壤,剔除石砾和植物残体等杂物,带回实验室4℃冷藏备用。

土壤总有机碳(TOC)测定采用重铬酸钾容量法-外加热法^[21]。SMBC、SMBN测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法^[22]。过滤后提取液用总碳/总氮分析仪(德国Jena multi N/C 2100)测定试液中的总碳、总氮。

1.5 数据处理方法

$$SMBC = E_c / k_{EC}$$

式中, E_c 为熏蒸与未熏蒸土壤总有机碳的差值; k_{EC} 为转换系数,取值0.45^[23]。

$$SMBN = E_n / k_{EN}$$

式中, E_n 为熏蒸与未熏蒸土壤总氮的差值; k_{EN} 为转换系数,取值0.54^[24]。

微生物商为土壤微生物生物量碳与土壤总有机碳比值,即SMBC/TOC。

试验数据采用Microsoft Excel 2007和SAS8.1软件进行整理和统计分析,方差分析多重比较采用LSD法,在 $p < 0.05$ 水平下检验差异显著性。Sigmaplot10.0作图。

2 结果

2.1 长期冬种绿肥下稻田土壤微生物生物量碳及微生物商

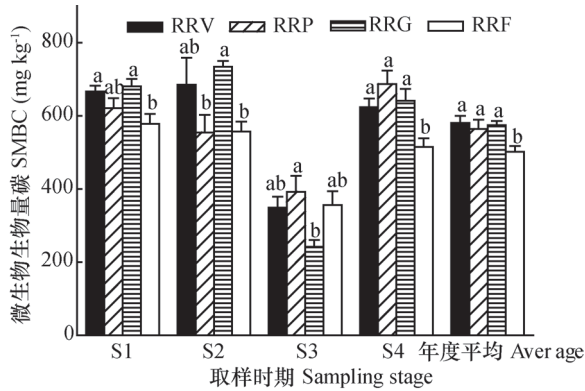
图1是双季稻-冬绿肥轮作体系典型时期的SMBC含量。总体而言,长期冬种绿肥后,SMBC有明显提高,不同绿肥处理间的SMBC差异不大。3个绿肥处理RRV、RRP、RRG的SMBC全年平均分别为604.6、549.4、580.2 mg kg⁻¹,相对RRF分别提高了15.92%、12.43%和14.62%,差异显著。

SMBC含量在绿肥翻压前后变化不大,两阶段各处理平均值分别为636.5和632.7 mg kg⁻¹,S3阶段下降至334.9 mg kg⁻¹,在S4阶段又上升至与绿肥翻压后相当,平均值为616.6 mg kg⁻¹。不同处理在S2及S3阶段无明显规律,但在S1及S4阶段绿肥各处理的SMBC较RRF处理有较大提高,除S1阶段的RRP处理外,其余均达到显著性差异水平。其中在土壤性质相对稳定的S4时期,RRV、RRP、RRG处理相对RRF分别提高了21.12%、33.48%和24.67%。

图2表明,微生物商在各时期的变化与SMBC十分相似,不同时期各处理间的差异也与SMBC一致。本试验中的土壤微生物商在1.73%~4.52%之间波动,3个绿肥处理RRV、RRP、RRG的全年平均值分别为3.61%、3.66%、3.61%,均显著高于对照的全年平均水平(3.13%)。与SMBC一致,S1和S4时期,绿肥处理表现出明显较高的微生物商。微生物商能更灵敏地指示土壤有机碳的转化,因此,结合SMBC及微生物商的规律可以明确认为,长期冬种绿肥促进稻田土壤碳素转化,提高土壤肥力的可持续性。

2.2 长期冬种绿肥下稻田土壤微生物生物量氮

由图3可知,绿肥翻压前后SMBN变化不大,同样在早稻成熟期最低(各处理平均值37.1 mg kg⁻¹),S1、S2、S3三个时期各处理间未见显著差异。但到了S4阶段,SMBN急剧上升并显著高于其他时期,各处理平均值为125.4 mg kg⁻¹;同时绿肥各处理明显提高了SMBN含量,与RRF处理差异显著,尤其是RRV处理,在此时期相对RRF提高了98.45%。在晚稻收获后土壤落干且温度较低时土壤性质处于稳定状态,表明绿肥有明显的提高SMBN的作用。RRV、RRP、RRG处理SMBN全年平均值分别为99.1、83.6、87.7 mg kg⁻¹,相对RRF



注：1) 同一取样时期内字母不同代表处理间在 $p < 0.05$ 水平下差异显著。2) S1为绿肥盛花期，S2为早稻移栽前，S3为早稻成熟期，S4为晚稻收获后。下同 Note: 1) Different letters in the figure represent significant differences ($p < 0.05$) between different treatments at the same sampling stage. 2) S1, flowering stage of winter green manure crop; S2, after the incorporation of green manure; S3, mature stage of early rice; S4, after the harvest of late rice. The same below

图1 不同时期各处理土壤微生物生物量碳含量

Fig. 1 Seasonal variation of soil microbial biomass carbon relative to treatment

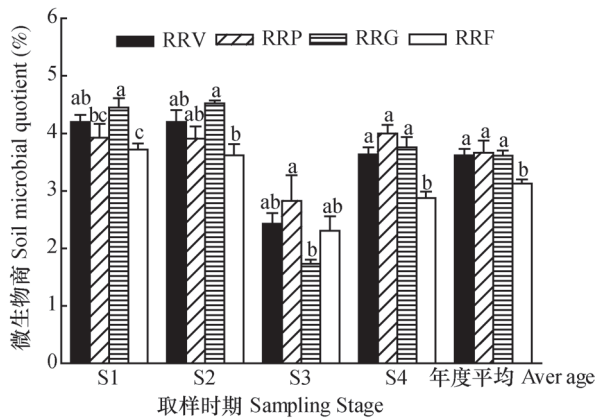


图2 不同时期各处理土壤微生物商

Fig. 2 Seasonal variation of soil microbial quotient relative to treatment

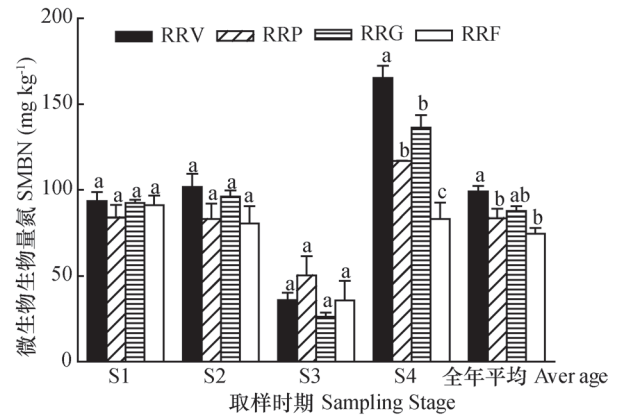


图3 不同时期各处理土壤微生物生物量氮含量

Fig. 3 Seasonal variation of soil microbial biomass nitrogen relative to treatment

分别提高了36.49%、15.12%和20.80%，以RRV对SMBN的提高作用最明显，其中RRV处理显著高于RRF及RRP处理，说明豆科绿肥因其固氮能力而在稻田土壤氮素营养中具有重要作用。

2.3 长期冬种绿肥下稻田土壤微生物生物量碳氮比

表2是各时期土壤微生物生物量碳氮比。从全年平均看，各处理间没有明显差异，均值均在7左右。但不同阶段，绿肥处理对土壤微生物生物量碳氮比有一定影响，翻压前（S1阶段）3个绿肥处理的微生物生物量碳氮比显著高于RRF处理，S4阶段RRF处理显著高于RRV及RRG处理，说明长期冬种绿肥可能对土壤微生物群落结构有一定改变。此外，微生物生物量碳氮比在不同阶段有较大波动。其中绿肥翻压前后（S1和S2阶段）各处理微生物生物量碳氮比值较为相近，到S3阶段土壤微生物生物量碳氮比明显升高（平均值8.96），S4阶段又降至较低水平（平均值5.18），表明稻田在淹水条件下土壤微生物可能以碳氮比值较高的真菌为主，而在落干状态下则以碳氮比值较低的细菌为主。

表2 不同时期各处理土壤微生物生物量碳氮比

处理 Treatment	取样时期 Sampling stage				全年平均 Average
	S1	S2	S3	S4	
RRV	7.15 ± 0.22a	6.71 ± 0.39a	9.93 ± 1.12a	3.79 ± 0.23c	6.89 ± 0.35a
RRP	7.45 ± 0.34a	6.69 ± 0.12a	8.13 ± 0.82a	5.87 ± 0.31ab	7.04 ± 0.25a
RRG	7.37 ± 0.07a	7.66 ± 0.35a	9.38 ± 1.06a	4.76 ± 0.46bc	7.29 ± 0.24a
RRF	6.36 ± 0.13b	7.07 ± 0.64a	8.40 ± 0.86a	6.30 ± 0.54a	7.03 ± 0.27a

注：平均值 ± 标准误。同一取样时期字母不同代表不同处理间 $p < 0.05$ 水平下差异显著 Note: Means ± SE. Different letters in the table represent significant differences ($p < 0.05$, LSD test) between treatments at the same sampling stages

3 讨论

3.1 长期冬种绿肥改变土壤微生物生物量碳、氮特征

SMBC占微生物干物质的40%~50%，是反映土壤微生物生物量大小的指标，其容量受环境条件及施肥、耕作、栽培等农艺措施的影响，并对土壤条件十分敏感，可灵敏指示有机碳变化，也是土壤有效养分重要的源和汇^[25]。SMBN的活性及消长变化是土壤氮素循环的本质内容，其含量约20~200 mg kg⁻¹，是土壤有机态氮中最活跃的部分^[25-26]。

杨曾平等^[20]对南方红壤性水稻土长期双季稻-冬绿肥种植制度下晚稻收获后的土壤微生物特性进行了分析，发现与冬闲处理相比，长期种植翻压绿肥处理的微生物种群数量、微生物生物量碳、微生物生物量氮等均有所提高。上述结论与本研究中晚稻收获后SMBC、SMBN含量有一致的趋势，表明长期冬种绿肥能够提高土壤SMBC和SMBN含量，以紫云英处理效果最显著，且SMBC和SMBN变化趋势基本相似。豆科绿肥紫云英效果最显著可能是由于紫云英的固氮作用增加了土壤氮素的供应，为微生物生长提供了更多氮源，促进了微生物的生长。同时，由于晚稻收获后土壤处于相对稳定状态，此时期的土壤各指标能更真实地反映长期冬种绿肥条件下土壤环境的变化，本研究中3种绿肥在S4时期均显著提高了SMBC及SMBN含量，表明在南方红壤稻田中冬种绿肥对提高土壤肥力、改善土壤质量有重要意义。有机物料种类不同，对SMBN含量的影响也有差异，有机物料的氮素比例（氮的质量分数）、碳源有效性等均是影响土壤SMBN含量高低的重要因子^[27]，因此不同有机物料对SMBC及SMBN影响的不同，在本研究中则表现为不同种类绿肥在提高土壤微生物生物量特性上的表现不尽相同。

土壤微生物商较单一的微生物生物量和有机碳更能反映人为干扰对农田生态系统的影响，是土壤有机质变化的灵敏指示指标，能有效指示有机物质施入土壤后微生物生物量碳转化的效率、土壤碳素损失等^[28-29]。土壤中微生物商值一般为1%~4%^[29]，本研究中各处理土壤微生物商平均值为3.58%，其中RRV及RRG处理绿肥翻压前后微生物商值均大于4%。杨曾平等^[20]研究认为，在

南方红壤性水稻土中双季稻-冬绿肥耕作制度下土壤微生物商介于3.67%~4.55%之间，冬种绿肥显著提高土壤微生物商，并以RRV处理最高的研究结果，与本研究结果互相印证。相对于不同时期变化不明显且处理间没有显著差异的土壤有机质含量^[30]，冬种绿肥显著提高了土壤SMBC含量及微生物商，说明绿肥的加入促进了土壤有机碳向更容易被微生物和作物利用的形态转化，从而提高土壤养分有效性。因此，绿肥能够促进土壤中物质与能量的转化，对土壤肥力和质量的可持续发展有积极作用。

3.2 土壤微生物生物量碳、氮在不同阶段的动态变化

绿肥翻压前后、早稻成熟期及晚稻收获后4个时期是双季稻-冬绿肥轮作体系中的典型时期。在本研究中，SMBC、SMBN及微生物商的整体规律一致，均为绿肥翻压前后无明显变化，早稻成熟期最低，晚稻收获后又上升。

本研究关注从绿肥盛花期到晚稻收获，土壤环境经历了从低温落干到高温淹水再到低温落干的过程，土壤温度和水分等环境条件的不同可能是导致不同时期微生物生物量特性动态变化的主要原因。有研究认为，不同耕作方式的冬小麦田，土壤含水量与土壤温度等变量共同导致了SMBC的动态变化，是影响SMBC时间分布的主要因素^[31]。SMBC受土壤含水量影响很大，适宜的土壤含水量有助于增加土壤微生物的种群数量，但超出田间持水量时，土壤微生物会随土壤含水量的增加而减少^[32]。淹水条件下微生物生理活动受到氧可获得性的限制，长期积水会抑制微生物的生长与活性^[33-34]。绿肥翻压后，大量新鲜有机体的腐解会对土壤微生物产生激发作用，但本试验中绿肥翻压前后微生物生物量变化不大，可能是由于绿肥翻压后的淹水环境对微生物活性的抑制掩盖了绿肥腐解引起的激发作用。早稻成熟期各处理SMBC、SMBN和微生物商均显著低于其他时期，可能是由于在此时期，大量土壤养分被作物吸收利用，转化为地上部生物量，同时根系活动及高温、淹水的土壤环境可能会对微生物生长产生抑制作用。其中RRG处理在此时期表现出了不同的趋势，其SMBC、SMBN及微生物商均低于其他绿肥处理及冬闲对照。一方面，此时期土壤环境的不稳定性会影响微生物的活性和数量；另一方面，黑麦草的自

身特性, 如生长过程中产生的根系分泌物, 可能会对土壤环境及微生物生长产生影响。晚稻收获后, 土壤性质及微生物群落均处于相对稳定状态, 是研究冬种绿肥长期效应的最佳时期。本研究中SMBC和微生物商在S4阶段上升至与绿肥翻压前相当水平, 而SMBN在S4阶段显著高于其他3个阶段, 可能是由于此时期低温落干的土壤状况有利于微生物对氮素的固定。同时在S4时期冬种绿肥对SMBC、SMBN和微生物商的提升作用相对其他时期更为显著, 说明长期冬种绿肥是一种能够对土壤微生物性状的产生长远影响的种植制度。

3.3 长期冬种绿肥影响土壤微生物群落结构

SMBC/SMBN经常被用于描述微生物的群落结构信息, 较高的SMBC/SMBN表示土壤微生物中真菌占较大比重, 较低时则通常意味着细菌占主导地位^[35]。从土壤或其他环境样本中分离出来的微生物中, 真菌的C/N值一般在7~12之间, 细菌在3~6之间^[25]。本试验中除晚稻收获后样品, 土壤微生物生物量碳氮比多大于7, 可能由于在淹水条件下, 稻田土壤中微生物以真菌为主。不同绿肥种类间微生物生物量碳氮比有一定差异但不同时期的变化趋势不同, 说明不同绿肥制度能够对稻田土壤微生物群落结构产生一定的影响, 但其具体变化很难从单一的微生物生物量碳氮比的变化进行说明。SMBC/SMBN的年度变化趋势与微生物生物量碳氮基本相反, 即在绿肥盛花期及晚稻收获后土壤处于落干状态时较低, 而在高温淹水的早稻生长季则较高, 这种变化趋势说明土壤水分状况等土壤环境因素对微生物群落结构有很大影响, 在高温淹水条件下红壤稻田可能为真菌性土壤, 而在土壤落干时是细菌性土壤。

3.4 长期冬种绿肥改善土壤微生物生物量特性的生物学意义

绿肥作物与双季稻轮作种植后的水稻产量显著高于冬闲对照, 绿肥作物紫云英、油菜和黑麦草处理年均水稻产量(1982—2008年)分别为10.8、10.2和10.0 t hm⁻² a⁻¹, 较冬闲对照分别提高27.2%、20.5%和18.1%^[17]。本研究年度(2013年), 紫云英、油菜和黑麦草处理早、晚稻总产量分别为12.3、11.9和11.8 t hm⁻² a⁻¹, 较冬闲对照分别提高34.2%、29.6%和28.3%, 表明冬种绿肥在培肥地力、提高作物产量上有重要作用。高菊生等^[17]通过对本试验1982—2007年土壤有机质及活

性有机质变化的分析, 说明长期冬种绿肥提高了土壤总的活性有机质含量, 本研究从土壤微生物生物量变化的角度解释了冬种绿肥在当地双季稻种植制度中的增产机制及其土肥意义。结合上述研究及分析, 可以认为长期冬种绿肥后水稻的增产机制之一可能是冬种绿肥改善了土壤微生物特性, 增加了活性有机质含量, 进而提高了土壤综合肥力水平。

4 结 论

我国南方稻区长期双季稻-冬绿肥种植体系中, 紫云英、油菜、黑麦草3种绿肥处理均提高SMBC、SMBN及微生物商, 尤其是在晚稻收获后土壤处于相对稳定阶段时, 三个绿肥处理与冬闲处理间均达到显著差异, 其中豆科绿肥紫云英对SMBC及SMBN的作用最显著。SMBC、SMBN及微生物商在不同时期的变化趋势一致, 均为绿肥翻压前后无明显变化、早稻成熟期最低、至晚稻收获后再次上升。总体上, 南方稻区冬种绿肥后, 土壤微生物生物量特性明显改善, 表明稻田冬绿肥是提高作物产量、改善土壤质量的有效手段。

参 考 文 献

- [1] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考. 中国土壤与肥料, 2009 (4) : 1—3. Cao W D, Huang H X. Ideas on restoration and development of green manure in China (In Chinese) . Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009 (4) : 1—3
- [2] Elfstrand S, Hedlund K, Mårtensson A. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring. Applied Soil Ecology, 2007, 35 (3) : 610—621
- [3] Selvi R V, Kalpana R. Potentials of green manure in integrated nutrient management for rice—A review. Agricultural Reviews, 2009, 30 (1) : 40—47
- [4] Thorup-Kristensen K, Magid J, Jensen L S. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. Advances in Agronomy, 2003, 79: 227—302
- [5] Becker M, Ladha J K, Ali M. Green manure technology: Potential, usage and limitations. A case study for lowland rice. Plant and Soil, 1995, 174 (1/2) : 181—194
- [6] Chandra R, Rana N S, Kumar S, et al. Effects of sugarcane residue and green manure practices in sugarcane-ratoon-wheat sequence on productivity,

- soil fertility and soil biological properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2008, 54 (6) : 651—664
- [7] Ventura W, Watanabe I. Green manure production of *Azolla microphylla* and *Sesbania rostrata* and their long-term effects on rice yields and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 15 (4) : 241—248
- [8] Brookes P C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19 (4) : 269—279
- [9] Jordan D, Kremer R J, Bergfield W A, et al. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19 : 297—302
- [10] Trasar-Cepeda C, Leiros C, Gil-Sotres F, et al. Towards a biochemical quality index for soils: an expression relating several biological and biochemical properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26 (2) : 100—106
- [11] Balota E L, Colozzi-Filho A, Andrade D S, et al. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38 (1) : 15—20
- [12] Friedel J K, Munch J C, Fischer W R. Soil microbial properties and the assessment of available soil organic matter in a haplic luvisol after several years of different cultivation and crop rotation. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28 (4/5) : 479—488
- [13] Bernard E, Larkin R P, Tavantzis S, et al. Compost, rapeseed rotation, and biocontrol agents significantly impact soil microbial communities in organic and conventional potato production systems. *Applied Soil Ecology*, 2012, 52 : 29—41
- [14] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68 : 252—262
- [15] Ye X F, Liu H E, Li Z, et al. Effects of green manure continuous application on soil microbial biomass and enzyme activity. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37 (4) : 498—508
- [16] Zhang X X, Gao J S, Gao Y H, et al. Long-term rice and green manure rotation alters the endophytic bacterial communities of the rice root. *Microbial Ecology*, 2013, 66 : 917—926
- [17] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响. *生态学报*, 2011, 31 (16) : 4542—4548. Gao J S, Cao W D, Li D C, et al. Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (16) : 4542—4548
- [18] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响. *作物学报*, 2013, 39 (2) : 343—349. Gao J S, Xu M G, Dong C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (2) : 343—349
- [19] 聂军, 廖育林, 彭科林, 等. 湖南省绿肥作物生产现状与展望. *湖南农业科学*, 2009 (2) : 77—80. Nie J, Liao Y L, Peng K L, et al. The status and outlook of green manure crops production in Hunan Province (In Chinese). *Hunan Agricultural Sciences*, 2009 (2) : 77—80
- [20] 杨曾平, 高菊生, 郑圣先, 等. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响. *土壤*, 2011, 43 (4) : 576—583. Yang Z P, Gao J S, Zheng S X, et al. Effects of long-term winter planting-green manure on microbial properties and enzyme activities in reddish paddy soil (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (4) : 576—583
- [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] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 1976, 8 (3) : 209—213
- [23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19 (6) : 703—707
- [24] 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. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, 17 (6) : 837—842
- [25] Bonde T A, Schnurer J, Rosswall T. Microbial biomass as a fraction of potentially mineralizable nitrogen in soils from long-term field experiments. *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20 (4) : 447—452
- [26] 沈其荣. 土壤生物态氮研究进展. 北京: 北京农业大学出版社, 1992. Shen Q R. Advances of soil biological nitrogen (In Chinese). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1992
- [27] Ocio J A, Brookes P C, Jenkinson D C. Field incorporation of straw and its effects on soil microbial

- biomass and soil inorganic N. *Soil Biology & Biochemistry*, 1991, 23 (2): 171—176
- [28] Anderson T H, Domsch K H. Ratio of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21 (4): 471—479
- [29] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30: 195—207
- [30] 高嵩涓. 长期冬绿肥-水稻制度下稻田土壤部分环境化学及分子生态学特征. 北京: 中国农业科学院, 2014. Gao S J. Some environmental chemistry and molecular ecology characteristics as affected by long-term green manures in a red paddy soil in Southern China (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014
- [31] 张明园, 黄光辉, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北冬小麦田土壤微生物生物量碳分布特征的影响. *生态环境学报*, 2011, 20 (3): 409—414. Zhang M Y, Huang G H, Kong F L, et al. Influences of tillage practices on distribution of soil microbial biomass carbon under winter wheat in North China (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20 (3): 409—414
- [32] Killham K. *Soil ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- [33] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件沼泽湿地土壤轻组有机碳与微生物活性动态. *中国环境科学*, 2012, 32 (1): 113—119. Hou C C, Song C C, Li Y C, et al. Light fractions of soil organic carbon and microbial activity dynamics in marshes under different water conditions (In Chinese). *China Environmental Sciences*, 2012, 32 (1): 113—119
- [34] Rinklebe J, Langer U. Microbial diversity in three floodplain soils at the Elbe River (Germany). *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38 (8): 2144—2151
- [35] Campbell C A, Biederbeck V O, Zentner R P, et al. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71: 363—376

LONG-TERM APPLICATION OF WINTER GREEN MANURES CHANGED THE SOIL MICROBIAL BIOMASS PROPERTIES IN RED PADDY SOIL

Gao Songjuan^{1, 2} Cao Weidong^{1, 3†} Bai Jinshun¹ Gao Jusheng^{1, 4} Huang Jing^{1, 4} Zeng Naohua¹
Chang Danna^{1, 2} Shimizu Katsuyoshi⁵

(1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

(3 Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China)

(4 Red Soil Experimental Station in Hengyang, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan 426182, China)

(5 Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki-ken, 305-8572, Japan)

Abstract In South China, application of winter green manure crops into the double rice cropping system has been proved to be a high effective rotation pattern in improving soil environments, soil fertility and rice yields, and is very beneficial to the sustainable agriculture. The effects of long-term application of green manure crops on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and the seasonal fluctuation of soil microbial biomass properties in red paddy soil were still not clear enough. Based on a 31-year long-term field experiment on cultivation of double cropping rice and winter green manure in red paddy soil in South China, soil microbial biomass properties were investigated at different stages, aimed to provide a theoretical basis for deliborating mechanism and effects of winter green manure on transformation of soil carbon and nitrogen in the paddy ecosystem. The long-term field experiment includes 4 treatments, i.e., rice-rice-milk vetch (RRV), rice-rice-winter rape (RRP), rice-rice-ryegrass (RRG) and rice-rice-winter fallow (RRF). Soil samples were collected at 4 different typical stages, i.e., flowering stage of winter green

manure crop (S1), after the incorporation of green manure (S2), mature stage of early rice (S3), and after the harvest of late rice (S4), for analysis of soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN), soil microbial quotient and soil microbial biomass carbon to nitrogen ratio (SMBC/SMBN). The results showed that the cultivation of green manure crops increased the contents of SMBC, SMBN and soil microbial quotient. Especially at the S4 stage, when soil properties were relatively stable, all the green manure treatments were significantly higher than those in the RRF treatment, and similar trends were observed for the annual mean values. The SMBC and SMBN were most influenced by the leguminous green manure milk vetch. Compared with the RRF treatment, they were increased by 21.12% and 98.45%, respectively, at the S4 stage, and by 15.92% and 3.49% for the annual mean values, respectively. The annual average values of soil microbial quotient in RRV, RRP, RRG were 3.61%, 3.66% and 3.61%, respectively, significantly higher than that in RRF treatment (3.13%). Although the SMBC, SMBN and soil microbial quotient were affected by sampling time profoundly, they all showed similar trends at all the 4 sampling stages, i.e., no significant differences between the stage of S1 and S2, down to the lowest level at the S3 stage, and up again at the S4 stage. The SMBC to SMBN ratio did not vary much among different treatments but fluctuated obviously with the sampling stages, i.e., highest at the S3 stage (when soil being flooded) and lowest at the S4 stage (when soil being non-flooded). It could be concluded that soil microbial properties were improved obviously after the long term cultivation of winter green manure crops in red paddy soil in South China, furtherly supporting that the cultivation of winter green manure crops is an effective way for soil fertilizing in red paddy fields.

Key words Green manure; Red paddy soil; Soil microbial biomass carbon; Soil microbial biomass nitrogen; Soil microbial quotient

(责任编辑: 卢 萍)

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



9 770564 392156