

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

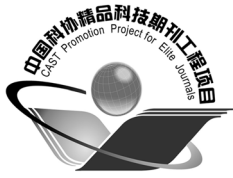


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第52卷 第3期

Vol.52 No.3



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

目 次

综述与评论

- 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究····· 蔡祖聪 张金波 黄新琦等 (469)
- 土壤裂隙及其优先流研究进展····· 张中彬 彭新华 (477)

研究论文

- 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征····· 温磊磊 郑粉莉 沈海鸥等 (489)
- 青藏高原永冻土活动层厚度预测指标集的建立及制图····· 陈吉科 赵玉国 赵 林等 (499)
- 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化····· 杨子江 邴海健 周 俊等 (507)
- 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究····· 廖 丹 于东升 赵永存等 (517)
- 河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征····· 曹祥会 雷秋良 龙怀玉等 (528)
- 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征····· 付同刚 陈洪松 王克林 (538)
- 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究····· 杨玉峥 林 青 王松禄等 (547)
- 化学转化法测定水体中硝酸盐的氮氧同位素比值····· 王 曦 曹亚澄 韩 勇等 (558)
- ¹³C脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响 ···· 刘 萍 江春玉 李忠佩 (567)
- 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响····· 慈 恩 王莲阁 丁长欢等 (576)
- 施入¹⁵N标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用 ····· 赵 伟 梁 斌 周建斌 (587)
- 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响····· 鲁艳红 廖育林 周 兴等 (597)
- 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响····· 冀建华 侯红乾 刘益仁等 (607)
- 高粱分泌硝化抑制物对羟基苯丙酸与质子泵的关系研究····· 周金泉 张明超 魏志军等 (620)
- 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究 ····· 曹晨亮 王 卫 马义兵等 (628)
- 钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响····· 郑东方 许嘉阳 许自成等 (637)
- 桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响····· 张 凯 郑 华 陈法霖等 (646)
- 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响····· 杨航宇 刘艳梅 王廷璞 (654)
- 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响····· 矫丽娜 李志洪 殷程程等 (665)
- 链霉菌JD211对水稻幼苗促生作用及土壤细菌多样性的影响 ····· 王世强 魏赛金 杨陶陶等 (673)

研究简报

- 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价····· 贡 璐 张雪妮 冉启洋 (682)
- 铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响····· 郑芸芸 李忠意 李九玉等 (690)
- 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化····· 夏 昕 石 坤 黄欠如等 (697)
- 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征····· 王合云 李红丽 董 智等 (706)

信息

- 2015国际土壤年 ····· (696)

封面图片：稻田裂隙二维与三维图像（由张中彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201407130353

^{13}C 脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响*

刘 萍^{1, 2} 江春玉¹ 李忠佩^{1, 2†}

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 通过盆栽试验, 设置两种施氮水平 (50 mg kg⁻¹和100 mg kg⁻¹) 处理 (分别记为N50和N100), 采用四次 ^{13}C 脉冲标记对不同生育期 (分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期) 水稻光合产物碳在水稻-根际土壤系统中的分配特征进行定量研究。结果表明, 不同施氮水平下, N100处理的水稻地上部生物量显著高于N50处理 ($p < 0.05$); 生长后期N50处理促进根的生长, 根冠比增加。N100处理四次脉冲标记总累积 ^{13}C 量达265.5 mg, 较N50处理高出39%, 分配到土壤中的 ^{13}C 量高出46%, 说明适当增施氮肥, 不仅可以提高作物产量, 还能增加作物输入土壤的有机碳量。水稻早期光合碳主要运往地下部 (21.7% ~ 52.7%), 灌浆期地下部分配比例大大降低 (7.50% ~ 8.90%)。两种施氮水平下, 四次脉冲标记累积吸收的光合 ^{13}C 在植株和土壤中的分配比例大致相同, 累积吸收的光合碳约72%在植株地上部, 28%分配到地下部 (根系7.21% ~ 7.71%和根际土壤20.3% ~ 21.2%)。

关键词 ^{13}C 脉冲标记; 根际沉积; 水稻; 氮素水平

中图分类号 S154.4 **文献标识码** A

光合碳的运输和分配是“大气-植物-土壤”系统碳循环的重要环节, 也是土壤有机碳的主要来源^[1]。光合产物碳主要通过根际沉积的形式输入土壤, 包括根系分泌物、死亡根系和作物残体等^[2]。大量研究表明, 光合碳向根际土壤环境中的分配受到多种因素的影响, 植物品种^[3]、生长时期^[4]、气候条件、土壤类型、土地利用方式^[5-7]等的不同, 均将造成光合产物碳分配比例的显著变化。

近年来, 稳定性同位素技术的发展使得定量研究光合产物碳的去向成为可能。 ^{13}C 稳定性同位素标记方法由于具有无放射性、标记均匀、安全可靠等优点, 被广泛应用于研究土壤有机碳的周转^[8]。研究主要集中在光合产物碳在作物地上和地下部的分布, 研究对象主要包括玉米^[4-6]、小麦^[7]、大麦、水稻^[9-10]和大豆等作物。研究表明, 禾谷类作物向地下部转运20% ~ 30%的光合碳, 其中1/2

留在根系中, 1/3为根系呼吸和微生物呼吸消耗, 其余碳被转化为土壤微生物碳和有机质^[11]。目前, 碳稳定性同位素人工标记方法主要分为连续标记法和脉冲标记法, 与连续标记相比, 脉冲标记费用低、设备和环境条件要求简单, 通过一次性注入标记物可以量化区分根系分泌的有机碳和土壤固有的有机碳, 定量研究光合碳的分配和转运^[12]。

水稻是我国亚热带地区主要的粮食作物, 水稻土是我国南方重要的耕地土壤资源。氮素作为植物生长的必需营养元素, 与植物的光合作用过程密切相关, 因此也是作物产量的重要养分限制因子^[13]。施用氮肥对光合产物碳在植物-土壤系统中分配的影响因作物和土壤性质而异^[14-15]。但是, 目前有关施肥对光合碳在植物-土壤系统中分配动态影响的研究仍较薄弱。本研究以红壤水稻土为对象, 应用 ^{13}C 稳定性同位素脉冲标记法定量研

*国家自然科学基金项目 (41171233) 和中国科学院战略性先导科技专项 (XDB15020102) 资助

†通讯作者, E-mail: zhpli@issas.ac.cn

作者简介: 刘 萍 (1990—), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事土壤生物化学和土壤有机碳转化研究。E-mail: liuping@issas.ac.cn

收稿日期: 2014-07-13; 收到修改稿日期: 2014-11-24

究不同生育期光合产物碳在水稻植株、根和根际土壤中的分配动态,初步明确不同施氮量水平对光合产物碳分布的影响,结果对于深入认识土壤碳循环过程机制及制订维持土壤有机碳稳定与平衡的管理措施有重要的科学意义。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤样品采自中国科学院鹰潭农业生态试验站附近大田0~15 cm耕层土壤。该区年平均降水量1 789 mm,年蒸发量1 318 mm,年平均气温为17.6 °C,无霜期在258 d左右,属亚热带湿润季风气候区。土壤为发育自第四纪红黏土的水稻土。2013年3月选择代表性田块,通过多点采样形成混合样品。样品经风干,挑去细根和石块等,磨细过10 mm筛备用。供试土壤基本理化性质为:pH5.57,有机碳20.87 g kg⁻¹,全氮2.17 g kg⁻¹,全磷0.69 g kg⁻¹,全钾6.8 g kg⁻¹。供试水稻品种为金早47。

1.2 试验设计

盆栽试验采用直径20 cm、高20 cm的塑料盆,每盆装过10 mm筛的风干土5 kg。尿素、钙镁磷肥和氯化钾作为基肥混入土中,氮肥设置N50(50 mg kg⁻¹)和N100(100 mg kg⁻¹)两个处理,磷钾用量分别为P₂O₅ 55 mg kg⁻¹和K₂O 90 mg kg⁻¹。为了测定不同生育期¹³C脉冲标记光合产物碳净输入量,设置实验组(M)和对照组(CK),其中实验组为每个生育期均进行脉冲标记,对照组不进行脉冲标记。实验组和对照组的差值为脉冲标记输入¹³C总量,相邻的两个生育期¹³C量差值为不同生育期光合产物碳净输入量。

将水稻种子用10%过氧化氢表面消毒30 min,清水洗净,去掉漂浮的种子,用镊子种入瓷盘中育苗。待苗长至10~15 cm后移苗,每盆移植3株。试验过程中及时添加水分以满足水稻生长,播种时间为2013年4月10日。

1.3 ¹³C脉冲标记

标记方法参照文献[16]。标记在特制的透明有机玻璃箱(长×宽×高:105 cm×70 cm×100 cm)内进行(图1),玻璃箱顶部装有2个小型风扇,并留有温度计和四个滴定管插孔。分别在分蘖期(P1)、拔节期(P2)、抽穗期(P3)

和灌浆期(P4)各标记一次。标记选择晴天上午8:30~12:30或下午13:00~17:00进行。

每次标记步骤如下:(1)将栽植水稻的塑料桶放入标记箱的底座上,并放置四个300 ml的烧杯,其中两个放置Ba¹³CO₃(¹³C丰度为99%)各5.3 g,2个放置Ba¹²CO₃各5.3 g;(2)将有机玻璃箱放在底座槽内,向底座槽内注冷水密封,启动风扇。让水稻在有机玻璃箱内先光合15 min以提高¹³CO₂的吸收;(3)标记时先用黑布遮住整个有机玻璃箱,通过特制的滴定管向装有Ba¹³CO₃的一个烧杯中注入2 mol L⁻¹ HCl溶液200 ml,产生800 μl L⁻¹的¹³CO₂,反应5 min后,将黑布打开,让水稻在有机玻璃箱内进行光合作用;(4)标记45 min后重复步骤(3),向装有Ba¹³CO₃的另一个烧杯注入HCl溶液,最后两次向装有Ba¹²CO₃的烧杯中注入HCl产生¹²CO₂,这样可达到较好的标记效果;(5)标记结束后,取下有机玻璃箱,通风一段时间后将水稻放回原位。标记过程中用冰块将温度控制在28~37 °C。



图1 ¹³C脉冲标记装置

Fig.1 ¹³C pulse labeling device

1.4 样品采集与分析

在每次标记后的第10天和水稻成熟收获期(P5)选择对照和连续标记的水稻各3盆,将地上部植株用去离子水洗净后,放入70 °C烘箱内烘干,磨碎过0.154 mm筛备用;采用抖根法获得根际土壤,挑出根系,烘干后过0.154 mm筛备用。

水稻植株、根和土壤的全碳含量采用重铬酸钾容量法测定;土壤、水稻根、茎和叶的δ¹³C‰值用同位素质谱仪(Flash-2000 Delta V

ADVADTAGE) 测定。

1.5 数据计算与处理

一般情况下, 自然土壤或植物的自然丰度用 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 值来表示, 其计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = (R_{\text{样品}}/R_{\text{PDB}} - 1) \times 1000$$

式中, $R_{\text{样品}} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{样品}}$, $R_{\text{PDB}} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{PDB}}$, 为 0.011 237 2。

由 $R_{\text{样品}}$ 值和样品的全碳含量 (g kg^{-1}), 可以计算样品中 ${}^{13}\text{C}$ 量 (g kg^{-1}):

$${}^{13}\text{C}_{\text{样品}} = \text{土壤全碳} \times R_{\text{样品}} / (1 + R_{\text{样品}})$$

$${}^{13}\text{C} \text{ 标记净输入量} = {}^{13}\text{C}_{\text{标记样品}} - {}^{13}\text{C}_{\text{未标记样品}}$$

数据处理与分析采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 20。

2 结 果

2.1 施氮水平对水稻生物量的影响

两种施氮水平下, 水稻分蘖期 (P1)、拔节期 (P2)、抽穗期 (P3)、灌浆期 (P4) 和成熟期 (P5) 的生物量见表 1。除分蘖期 (P1) 外,

同一生育期标记组和对照组的水稻地上部生物量均表现为 N100 处理显著高于 N50 处理 (表 1)。随着生育期的增长, N100 处理对水稻地上部生长的促进作用越显著。整个生育期内, 标记组 N100 处理水稻地上部生物量达到了每盆 62.05 g, 与 N50 处理的 47.82 g 相比, 增长了约 30%。N100 处理的水稻根部生物量均高于 N50 处理, 不同生育期增长了约 6.8% ~ 50.1%。水稻根冠比随生育期的延长而减小, N50 处理在生长后期平均根冠比高于 N100 处理, 说明氮素不足时, 水稻促进根的生长来加强对养分的吸收。

2.2 不同生育期水稻植株和土壤中 ${}^{13}\text{C}$ 浓度变化

水稻植株和根中的 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 值均在分蘖期最大, N50 和 N100 处理水稻地上部分别达到 927‰ 和 1 216‰ (表 2), 根中 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 分别为 771‰ 和 695‰; 抽穗期最低, 其他生育期 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化不大, 地上部约为 621‰ ~ 671‰, 根中约为 559‰ ~ 676‰。但根际土壤中的 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 值随水稻生育期的进行而逐渐升高, 并且除分蘖期外 N100 处理均高于 N50 处理。

表 1 不同施氮水平下水稻不同生育期生物量

Table 1 Biomass of rice relative to growth period and nitrogen application rate (g plot^{-1})

项目 Item	处理 Treatment	生育期 Growth period				
		P1	P2	P3	P4	P5
地上部 Aboveground	N50 CK	3.59 ± 0.11a	22.08 ± 0.83b	40.22 ± 1.14b	49.89 ± 0.98b	49.26 ± 3.81b
	N100 CK	3.96 ± 0.37a	26.05 ± 0.85a	53.23 ± 2.09a	62.11 ± 2.17a	64.53 ± 0.54a
	N50 M	3.45 ± 0.14a	23.46 ± 0.87b	39.97 ± 0.59b	48.38 ± 1.12b	47.82 ± 1.65b
	N100 M	3.21 ± 0.30a	26.99 ± 1.08a	50.28 ± 1.01a	62.36 ± 1.26a	62.05 ± 2.42a
根部 Root	N50 CK	1.15 ± 0.05b	4.41 ± 0.53b	6.10 ± 0.23b	6.06 ± 0.05b	6.00 ± 0.08a
	N100 CK	1.54 ± 0.10a	6.62 ± 0.54a	7.32 ± 0.02a	7.84 ± 0.38a	7.43 ± 0.10a
	N50 M	1.26 ± 0.02b	5.01 ± 0.67b	5.24 ± 0.31c	6.12 ± 0.00b	7.04 ± 1.03a
	N100 M	1.43 ± 0.12ab	5.35 ± 0.24b	7.52 ± 0.05a	6.79 ± 0.61b	7.14 ± 0.61a
根冠比 Root-shoot ratio	N50 CK	0.320	0.200	0.152	0.121	0.122
	N100 CK	0.389	0.254	0.138	0.126	0.115
	N50 M	0.365	0.213	0.131	0.127	0.147
	N100 M	0.445	0.198	0.149	0.109	0.115

注: CK 为对照处理, M 为 ${}^{13}\text{C}$ 标记处理。P1: 分蘖期, P2: 拔节期, P3: 抽穗期, P4: 灌浆期, P5: 成熟期。同一列中不同字母表示不同施氮水平间差异显著 ($p < 0.05$) Note: CK stands for control, M for ${}^{13}\text{C}$ -marked treatment. P1: tillering stage, P2: jointing stage, P3: heading stage, P4: filling stage, P5: mature stage. In each column, different letters following the data indicate significant difference between different nitrogen levels ($p < 0.05$)

表2 不同生育期标记水稻植株和根际土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值Table 2 $\delta^{13}\text{C}$ of marked rice plants and rhizosphere soil relative to growth stage (%)

项目 Item	处理 Treatment	生育期 Growth period				
		P1	P2	P3	P4	P5
地上部 Aboveground	N50	927 ± 212ab	659 ± 35a	533 ± 15a	627 ± 51a	655 ± 72a
	N100	1 216 ± 187a	621 ± 29a	489 ± 16a	671 ± 72a	655 ± 23a
根部 Root	N50	771 ± 163b	676 ± 217a	558 ± 85a	567 ± 71a	597 ± 156a
	N100	695 ± 311b	595 ± 106a	535 ± 15a	559 ± 82a	637 ± 23a
根际土壤 Rhizosphere soil	N50	-4.75 ± 4.20c	0.70 ± 2.17b	12.50 ± 1.00b	14.30 ± 3.15b	17.50 ± 2.67b
	N100	-9.60 ± 3.38c	3.56 ± 2.97b	20.30 ± 8.42b	26.30 ± 8.01b	31.50 ± 7.01b

注：不同字母表示同列数据间差异显著 ($p < 0.05$)。下同 Note: Different letters indicate significant differences in same column ($p < 0.05$). The same below

根据 $\delta^{13}\text{C}\%$ 值和全碳含量, 分别计算标记和未标记水稻植株及根际土壤的 ^{13}C 浓度, 两者差值为 ^{13}C 脉冲标记处理净输入的光合 ^{13}C 浓度 (表3)。整个生育期水稻地上部净输入的 ^{13}C 浓度范围为 2.31 ~ 5.55 g kg^{-1} , 根中 ^{13}C 浓度范围为 2.41 ~ 2.82 g kg^{-1} , 而根际土壤中仅为 0.004 ~ 0.014 g kg^{-1} 。两种施氮水平的水稻地上部植株的 ^{13}C 浓度均呈现先下降后上升的趋势, 均在抽穗期达到最低值, 一方面是光合作用产物向地下部分的转移, 另一方面是植株生长的稀释作用, 而生长后期光合产物主要用于籽粒的生长, 因此又呈上升趋势。分蘖期水稻地上部 ^{13}C 浓度为整个生育期浓度最高, N100处理显著高于N50处理, 达到 5.55 g kg^{-1} , 高出约 32.5%。其他生育期两种施氮水平地上部 ^{13}C 浓度差异不显著。水稻根和根际土壤中 ^{13}C 浓度差异均不显著,

生长前期N50处理高于N100处理, 灌浆期和成熟期表现为N100高于N50处理。

2.3 不同生育期光合 ^{13}C 在水稻-土壤系统中的分配

结合水稻生物量和净输入 ^{13}C 浓度, 可以估算每个生育期输入水稻地上部植株、根系和根际土壤的 ^{13}C 量 (mg) (表4)。两种施氮水平下, 均为拔节期净吸收 ^{13}C 总量最高 (77.52 ~ 84.40 mg), 抽穗期和灌浆期相差不大, 分蘖期最少, 仅 22.80 ~ 26.37 mg。施氮量为 50 mg kg^{-1} 时, 不同生育期脉冲标记吸收的 ^{13}C 量表现为拔节期 > 抽穗期 > 灌浆期 > 分蘖期, 施氮量为 100 mg kg^{-1} 时表现为拔节期 > 灌浆期 > 抽穗期 > 分蘖期, 并且N100处理每个时期分配到水稻植株和根中的 ^{13}C 总量均高于N50处理, N100处理四次脉冲标记累积固定的 ^{13}C 总量达 265.5 mg, 较N50处理 (191.6 mg) 高出 39%。N50

表3 不同生育期标记进入水稻植株和根际土壤的 ^{13}C 浓度Table 3 ^{13}C concentration in rice plants and rhizosphere soil by labeling relative to growth stage (g kg^{-1})

项目 Item	处理 Treatment	生育期 Growth period				
		P1	P2	P3	P4	P5
地上部 Aboveground	N50	4.19 ± 0.93b	3.20 ± 0.13a	2.45 ± 0.16a	2.85 ± 0.18ab	3.06 ± 0.31a
	N100	5.55 ± 0.83a	2.99 ± 0.15a	2.31 ± 0.23a	3.05 ± 0.32a	3.04 ± 0.09a
根部 Root	N50	2.45 ± 0.44c	2.65 ± 0.67a	2.71 ± 0.43a	2.41 ± 0.32b	2.59 ± 0.70a
	N100	2.44 ± 0.97c	2.64 ± 0.30a	2.47 ± 0.07a	2.82 ± 0.30ab	2.74 ± 0.14a
根际土壤 Rhizosphere soil	N50	0.005 ± 0.003d	0.006 ± 0.001b	0.012 ± 0.005b	0.010 ± 0.001c	0.010 ± 0.006b
	N100	0.004 ± 0.001d	0.007 ± 0.001b	0.012 ± 0.004b	0.013 ± 0.002c	0.014 ± 0.002b

表4 不同生育期标记进入水稻植株和根际土壤的 ^{13}C 量

Table 4 Amounts of ^{13}C entering rice plants and rhizosphere soil by labeling relative to growth stage (mg)

项目 Item	处理 Treatment	各生育期 ^{13}C 总量 ^{13}C amount of each growth period				累积 ^{13}C 量 Accumulated ^{13}C amount
		P1	P2	P3	P4	
地上部 Aboveground	N50	14.45 ± 2.04d	60.71 ± 2.19c	22.61 ± 1.64d	40.20 ± 0.25d	138.0 ± 6.1c
	N100	17.81 ± 0.39c	63.04 ± 3.72c	35.58 ± 1.84c	73.64 ± 1.68b	190.1 ± 7.6b
根部 Root	N50	3.08 ± 0.44e	10.16 ± 1.47d	0.95 ± 0.93f	0.57 ± 0.76g	14.76 ± 3.60f
	N100	3.49 ± 0.75e	10.62 ± 0.50d	4.42 ± 1.19e	0.62 ± 1.10g	19.15 ± 3.54f
根际土壤 Rhizosphere soil	N50	5.27 ± 0.84e	6.65 ± 0.65d	23.54 ± 0.16d	3.37 ± 0.53f	38.83 ± 2.18e
	N100	5.07 ± 0.33e	10.74 ± 0.43d	35.15 ± 0.34c	5.34 ± 0.58e	56.30 ± 1.68d
总量 Total amount	N50	22.80 ± 3.32b	77.52 ± 4.31b	47.10 ± 2.73b	44.14 ± 1.54c	191.6 ± 11.9b
	N100	26.37 ± 1.47a	84.40 ± 4.65a	75.15 ± 3.37a	79.60 ± 3.36a	265.5 ± 12.8a

处理根际土壤中的 ^{13}C 量在分蘖期高于N100水平, 其他生育期均低于N100处理。

计算各组分 ^{13}C 量的分配比例(表5)。两种施氮水平下, 各生育期水稻净吸收的 ^{13}C 分配比例具有较大差异, 大部分留在地上部, 其中灌浆期最大, 约占91.1%~92.5%; 分配到根中的 ^{13}C 比例随生育期进行而降低, 占

0.78%~13.5%; 根际土壤中的分配比例在抽穗期达最高(46.8%~50.0%), 灌浆期最低(6.71%~7.63%)。但两种氮素处理下水稻整个生育期累积的 ^{13}C 在植株和土壤中的分配比例大致相同, 四次标记吸收的光合碳约72%在植株地上部, 28%分配到地下部(根系7.21%~7.72%和根际土壤20.3%~21.2%)。

表5 不同生育期水稻光合碳分配比例

Table 5 Distribution ratio of photosynthetic carbon of rice plants relative to growth stage (%)

处理 Treatment		生育期 Growth period				
		P1	P2	P3	P4	P5
N50	地上部 Aboveground	63.4	78.3	48.0	91.1	72.0
	地下部 Underground	36.6	21.7	52.0	8.90	28.0
	根部 Root	13.5	13.1	2.02	1.29	7.71
	根际土壤 Rhizosphere soil	23.1	8.58	50.0	7.63	20.3
N100	地上部 Aboveground	67.5	74.7	47.3	92.5	71.6
	地下部 Underground	32.5	25.3	52.7	7.50	28.4
	根部 Root	13.2	12.6	5.88	0.78	7.21
	根际土壤 Rhizosphere soil	19.2	12.7	46.8	6.71	21.2

3 讨论

水稻是稻田生态系统中的主要生产者, 以根际沉积的形式将部分光合作用固定的有机物输入土壤

中, 在稻田碳循环中起重要作用, 施肥会直接影响水稻对土壤有机碳的贡献。氮是作物体内许多重要有机化合物的组分, 例如蛋白质、核酸、叶绿素、酶、维生素、生物碱和一些激素等均含有氮素, 氮

素也是遗传物质的基础^[17]。因此氮是限制水稻生长和形成产量的首要因素。本研究中,同一生育期,施氮100 mg kg⁻¹处理的水稻生物量均显著高于施氮50 mg kg⁻¹处理,高氮条件给植株提供了充足的营养,从而促进水稻生长,进而影响植株的光合作用强度。本研究两种施氮水平下,施氮100 mg kg⁻¹更有利于水稻的生长,水稻光合同化量和输入根际土壤的光合碳量均显著高于施氮50 mg kg⁻¹。齐鑫和王敬国^[7]研究三种施氮水平(施氮量0、150和300 mg kg⁻¹)下冬小麦不同生育期光合碳在植株-土壤系统中的分配,收获时N150处理的地上部和地下部生物量均显著高于N0和N300处理,并且分配到根和土壤中的光合碳比例均高于其他两个处理,说明氮肥不足和过量施氮均会影响植物生长和光合碳的分配^[18]。

N100处理各个生育期脉冲标记净吸收的¹³C量均高于N50处理,但是光合碳在地下部的分配因生育期而发生较大的变化,与N100处理相比,N50处理灌浆期提高了分配到地下的光合碳比例,这是作物适应胁迫环境的一种生理反应机制^[19]。在水稻生长前期,光合碳向根系和土壤中分配的比例高于灌浆期,抽穗期单次脉冲标记吸收的光合¹³C向地下部转运比例最高,达到50.0%~52.7%,籽粒是水稻主要的同化产物去向,因此灌浆期仅有很少的碳向地下部转运。Lu等^[20]研究发现,水稻分蘖期地上部分配到的光合碳量为45%~52%,到成熟期则增加至78%~90%,而同时地下部根系所分配的碳量则从28%下降至2%,但积累量不断增加,这与本研究基本一致。本研究基于两种氮素水平通过生育期脉冲标记,只针对每个生育期脉冲标记输入水稻植株以及根际土壤存留的这一部分光合产物碳的分布进行定量研究,在一定程度上能够体现植物新吸收的光合碳在不同生育期分布的动态变化,生育期最后的累积光合碳量能够合理估算光合产物碳的分布特征。不同生育期水稻的光合速率不尽相同,分蘖期水稻生长旺盛,光合速率较快,但是由于水稻植株较小,吸收的¹³C量并不多,在稻穗接近成熟时光合速率下降。不同生育期,本研究红壤水稻土条件下,两种氮素水平处理累积的¹³C在植株-土壤中的分配比例基本一致。谭立敏等^[21]对分蘖期水稻植株的研究发现,五种氮素水平(N 10~60 mg kg⁻¹)下标记¹³C含量在地上部、根系和土壤中的比例分别为67.6%~71.2%、

11.9%~21.2%和10.3%~18.3%。Lawlor^[22]也发现不同氮素水平下,土壤、根系和地上部中¹³C含量在水稻-土壤系统中所占的比例基本一致,均为15%、15%和70%。可见氮素水平的高低主要通过影响作物的生长而改变光合产物碳的积累量,对水稻-土壤系统中光合碳的分配比例影响较小。

光合作用产物通过根际沉积作用输入土壤,生育期内光合碳主要集中在根际及其附近区域,为根际微生物利用成为微生物碳中的一部分,或以有机质形式储藏于土壤库中^[23]。本研究表明,脉冲标记的光合碳有38.83~56.30 mg进入根际土壤,占积累量的20.3%~21.2%。杨兰芳和蔡祖聪^[24]采用自然丰度法研究发现玉米根际沉积碳对土壤有机碳的贡献为4%~25%。根际是微生物代谢的活跃区域,光合碳在根际区的分配和转化是碳循环研究的重点^[25-26]。植物光合作用和土壤呼吸共同驱动碳的土壤生物地球化学循环,这一进程主要由微生物推动,并且根际碳为微生物利用的比例会随着生育期及周围生态环境明显改变,其作用机制有待进一步研究。

4 结论

施氮量100 mg kg⁻¹的水稻地上部生物量显著高于施氮量50 mg kg⁻¹处理($p < 0.05$),并且四次脉冲标记累积¹³C总量高出39%,分配到土壤中的¹³C量高出46%,说明适当增施氮肥,不仅可以提高作物产量,还能促进土壤有机碳的积累。水稻早期光合碳主要运往地下部(21.7%~52.7%),灌浆期分配比例大大降低(7.50%~8.90%)。两种氮素水平下,光合碳在植株和土壤中的分配比例大致相同,累积吸收的光合碳约72%在植株地上部,28%分配到地下部(根系7.21%~7.71%和根际土壤20.3%~21.2%)。

参考文献

- [1] Dannenberg S, Conrad R. Effect of rice plants on methane production and rhizospheric metabolism in paddy soil. *Biogeochemistry*, 1999, 45 (1): 53—71
- [2] 申建波, 张福锁, 毛达如. 根际微生态系统中的碳循环. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7 (2): 232—240. Shen J B, Zhang F S, Mao D R. Carbon cycling in rhizosphere microecological system (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7 (2):

- 232—240
- [3] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163 (4) : 421—431
- [4] 何敏毅, 孟凡乔, 史雅娟, 等. 用 ^{13}C 脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入. *环境科学*, 2008, 29 (2) : 446—453. He M Y, Meng F Q, Shi Y J, et al. Estimating photosynthesized carbon distribution and inputs into belowground in a maize soil following ^{13}C pulse-labeling (In Chinese). *Environmental Science*, 2008, 29 (2) : 446—453
- [5] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 用 ^{13}C 脉冲标记方法研究施肥与地膜覆盖对玉米光合碳分配的影响. *土壤学报*, 2013, 50 (5) : 948—955. An T T, Wang J K, Li S Y, et al. Effect of fertilization and plastic film mulching on distribution of photosynthetically fixed carbon in maize: Explored with ^{13}C pulse labeling technique (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5) : 948—955
- [6] 杨兰芳, 蔡祖聪, 祁士华. 氮肥用量对玉米不同生育期光合产物运往地下的影响. *作物学报*, 2006, 32 (12) : 1802—1808. Yang L F, Cai Z C, Qi S H. Effects of nitrogen rate on assimilate transportation to underground at different maize growing stages (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32 (12) : 1802—1808
- [7] 齐鑫, 王敬国. 应用 ^{13}C 脉冲标记方法研究不同施氮量对冬小麦净光合碳分配及其向地下输入的影响. *农业环境科学学报*, 2008, 27 (6) : 2524—2530. Qi X, Wang J G. Distribution and translocation of assimilated C pulse-labeled with ^{13}C for winter wheat (*Triticum aestivums* L.), as affected by nitrogen supply (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27 (6) : 2524—2530
- [8] 沈其荣, 殷士学, 杨超光, 等. ^{13}C 标记技术在土壤和植物营养研究中的应用. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6 (1) : 98—105. Shen Q R, Yin S X, Yang C G, et al. Application of ^{13}C labeling technique to soil science and plant nutrition (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6 (1) : 98—105
- [9] 李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 等. 水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征. *环境科学*, 2013, 34 (4) : 1568—1575. Li M M, Nie S A, Chen X J, et al. Distribution characteristics of rice photosynthesized carbon in soil aggregates of different size and density (In Chinese). *Environmental Science*, 2013, 34 (4) : 1568—1575
- [10] 聂三安, 周萍, 葛体达, 等. 水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ^{14}C 连续标记法. *环境科学*, 2012, 33 (4) : 1346—1351. Nie S A, Zhou P, Ge T D, et al. Quantifying rice photo-assimilated carbon input into soil organic carbon pools following continuous ^{14}C labeling (In Chinese). *Environmental Science*, 2012, 33 (4) : 1346—1351
- [11] Gregory P J, Atwell B J. The fate of carbon in pulse-labelled crops of barley and wheat. *Plant and Soil*, 1991, 136 (2) : 205—213
- [12] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 等. 作物生育期内光合碳在地下部的分配及转化. *生态学杂志*, 2008, 27 (8) : 1393—1399. Jin J, Wang G H, Liu X B, et al. Allocation and transformation of photosynthetic carbon in belowground part of crops during their growth period (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 (8) : 1393—1399
- [13] 陈雅君, 闫庆伟, 张璐, 等. 氮素与植物生长相关研究进展. *东北农业大学学报*, 2013, 44 (4) : 144—148. Chen Y J, Yan Q W, Zhang L, et al. Research progress on nitrogen and plant growth (In Chinese). *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44 (4) : 144—148
- [14] Jin J, Wang G H, Liu J D, et al. Seasonal allocation of photosynthetically fixed carbon to the soybean-grown Mollisols in Northeast China. *Crop and Pasture Science*, 2011, 62 (7) : 563—570
- [15] 乔云发, 韩晓增, 赵兰坡. 长期定量施肥对玉米光合碳分配的影响. *水土保持学报*, 2010, 24 (4) : 208—212. Qiao Y F, Han X Z, Zhao L P. The respond of photosynthetic carbon allocation of maize to long-term fertilization (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (4) : 208—212
- [16] 尹云锋, 杨玉盛, 高人, 等. 植物富集 ^{13}C 标记技术的初步研究. *土壤学报*, 2010, 47 (4) : 790—793. Yin Y F, Yang Y S, Gao R, et al. A preliminary study on phyto-enrichment ^{13}C labeling technique (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (4) : 790—793
- [17] 潘瑞炽. *植物生理学*. 北京: 高等教育出版社, 2007: 30—31. Pan R C. *Plant physiology* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2007: 30—31
- [18] Wang G L, Liu F. Carbon allocation of Chinese pine seedlings along a nitrogen addition gradient. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334: 114—121
- [19] Stewart D P C, Metherell A K. Carbon (^{13}C) uptake and allocation in pasture plants following field pulse-labelling. *Plant and Soil*, 1999, 210 (1) : 61—73
- [20] Lu Y H, Watanabe A, Kimura M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded rice

- soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16 (4): 321—328
- [21] 谭立敏, 吴昊, 李卉, 等. 不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ^{13}C 连续标记法. *环境科学*, 2014, 35 (5): 1933—1938. Tan L M, Wu H, Li H, et al. Input and distribution of rice photosynthesized carbon in the tillering stage under different nitrogen application following continuous ^{13}C labeling (In Chinese). *Environmental Science*, 2014, 35 (5): 1933—1938
- [22] Lawlor D W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production systems. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53 (370): 773—787
- [23] 连腾祥, 王光华, 于镇华, 等. 植物光合碳在根际土壤中的微生物转化与SIP技术. *土壤与作物*, 2013, 2 (2): 77—83. Lian T X, Wang G H, Yu Z H, et al. Microbial turnover of photosynthetic carbon in the rhizosphere and SIP technology (In Chinese). *Soil and Crop*, 2013, 2 (2): 77—83
- [24] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响. *环境科学学报*, 2006, 26 (2): 280—286. Yang L F, Cai Z C. Effects of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26 (2): 280—286
- [25] 王智平, 陈全胜. 植物近期光合碳分配及转化. *植物生态学报*, 2005, 29 (5): 845—850. Wang Z P, Chen Q S. Recently photosynthesized carbon allocation and turnover: A minor review of the literature (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (5): 845—850
- [26] 刘微, 吕豪豪, 陈英旭, 等. 稳定碳同位素技术在土壤-植物系统碳循环中的应用. *应用生态学报*, 2008, 19 (3): 674—680. Liu W, Lv H H, Chen Y X, et al. Application of stable carbon isotope technique in the research of carbon cycling in soil-plant system (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (3): 674—680

QUANTITATIVE RESEARCH ON EFFECTS OF NITROGEN APPLICATION RATE ON DISTRIBUTION OF PHOTOSYNTHETIC CARBON IN RICE-SOIL SYSTEM USING ^{13}C PULSE LABELING TECHNIQUE

Liu Ping^{1, 2} Jiang Chunyu¹ Li Zhongpei^{1, 2†}

(1 State Key Laboratory of soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Transport and distribution of photosynthetic carbon is an important part of carbon recycling in the “atmosphere-plant-soil” system, but also the main source of soil organic carbon. The development of stable isotope technology enables quantitative research on allocation of photosynthetic carbon. The ^{13}C stable isotope labeling technique, featuring zero radioactivity, uniformly marking, safety and reliability, has been widely used in studies on cycling of organic carbon in soil. As an essential nutrient element for plant growth, nitrogen is closely related to the process of photosynthesis of plants. The effect of nitrogen fertilization on the distribution of photosynthetic carbon in plant-soil system may vary with the crop and soil properties. However, so far no much has been reported in this aspect. The ^{13}C stable isotope labeling technique was adopted in this study on law of the distribution of photosynthetic carbon in the plant-soil system using paddy red soil as object. The research on effect of N application rate on distribution of photosynthetic carbon has some important scientific significance to understanding in-depth mechanism of soil carbon recycling and formulating management measures to maintain stability and balance of soil organic carbon. A pot experiment, designed to have two nitrogen treatments, N50 and N100, (50 mg kg^{-1} and 100 mg kg^{-1}) and two groups, one labeled 4 times with ^{13}C pulse and the other not, was conducted to quantitatively study

law of the distribution of photosynthetic carbon in the rice-rhizosphere system at different growth stages (tillering, jointing, heading and filling stage). Based on the difference between the two groups in amount of ^{13}C , the amount of ^{13}C taken up by rice was calculated. It was found that the aboveground biomass of rice in Treatment N100 was significantly higher than that in Treatment N50 treatment ($p < 0.05$) and in the labeled group, it reached 62.05 grams per pot in the former and 47.82 grams per pot in the latter, a 30% difference; The root biomass of rice in Treatment N100 was also higher than that in Treatment N50. In the late rice growing period, root growth was enhanced in Treatment N50, increasing the root-shoot ratio. The $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ in either shoots and roots reached a maximum at the tillering stage. In shoots it reached 927‰ and 1216‰ in Treatments N50 and N100, respectively, and in roots it did 771‰ and 695‰, respectively. The value was the lowest at the heading stage, and did not vary much between the other growth stages, It varied in the range of 621‰ ~ 671‰ in the shoots and 559‰ ~ 676‰ in the roots. $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ in rhizosphere soil increased gradually with rice growth, and was higher in Treatment N100 than in Treatment N50 in all the growth period except for the tillering stage. Throughout the entire growing period, the net ^{13}C input into the shoots varied in the range of 2.31 ~ 5.55 g kg⁻¹ and that into the roots in the range of 2.41 ~ 2.82 g kg⁻¹, but the concentration of ^{13}C in the rhizosphere soil was only in the range of 0.004 ~ 0.014 g kg⁻¹. After four times of pulse labeling, the total cumulative amount of ^{13}C in the rice plants in Treatment N100 reached 265.5 mg, 39% higher than 191.6 mg in Treatment N50, and 46% higher than the amount in the rhizosphere soil. In the early rice growing season, photosynthetic carbon of rice was mainly transported to the underground part (21.7% ~ 52.7%), but the proportion dropped sharply (7.50% ~ 8.90%) at the filling stage. The nitrogen treatments were more or less the same in distribution ratio of cumulative photosynthetic ^{13}C in plant and soil, approximately 72% in the shoots and 28% in the underground part (root 7.21% ~ 7.71% and rhizosphere soil 20.3% ~ 21.2%). Appropriate nitrogen fertilization can increase not only crop yield, but also the amount of organic carbon crop transports to the soil. When nitrogen is insufficient, rice enhances its root growth to absorb nutrients. The distribution ratio of photosynthetic carbon input in rice-rhizosphere system varies with the rice growth stage. Nitrogen application promotes growth of the crop, thus increasing accumulation of photosynthetic carbon, but does not have much effect on distribution ratio of the photosynthetic carbon in the rice-soil system throughout the rice growing period.

Key words ^{13}C pulse labeling; Rhizodeposition; Rice; Nitrogen levels

(责任编辑: 陈德明)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens Cai Zucong, Zhang Jinbo, Huang Xinqi, et al. (475)
 A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow...Zhang Zhongbin, Peng Xinhua (488)

Research Articles

- Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. (498)
 Construction of an index set for predicting thickness of active layer of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and for mapping Chen Jike, Zhao Yuguo, Zhao Lin, et al. (506)
 Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo Glacier foreland of Gongga Mountain Yang Zijiang, Bing Haijian, Zhou Jun, et al. (515)
 Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors Liao Dan, Yu Dongsheng, ZhaoYongcun, et al. (526)
 Spatio-temporal variation of soil temperature and soil moisture regime in Hebei Province Cao Xianghui, Lei Qiuliang, Long Huaiyu, et al. (536)
 Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin (546)
 Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River Yang Yuzheng, Lin Qing, Wang Songlu, et al. (556)
 Determination of nitrogen and oxygen isotope ratio of nitrate in water with a chemical conversion method Wang Xi, Cao Yacheng, Han Yong, et al. (565)
 Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using ¹³C pulse labeling technique Liu Ping, Jiang Chunyu, Li Zhongpei (574)
 Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields Ci En, Wang Liange, Ding Changhuan, et al. (585)
 Residual of applied ¹⁵N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jianbin (595)
 Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. (605)
 Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system Ji Jianhua, Hou Hongqian, Liu Yiren, et al. (618)
 Relationship between exudation of nitrification inhibitor MHPP and plasma membrane proton pump of sorghum root Zhou Jinquan, Zhang Mingchao, Wei Zhijun, et al. (527)
 Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field Cao Chenliang, Wang Wei, Ma Yibing, et al. (635)
 Effects of interaction between potassium and humic acid on index of organic potassium salt in flue-cured tobacco Zheng Dongfang, Xu Jiayang, Xu Zicheng, et al. (645)
 Impacts of replacement of *Pinus* with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities Zhang Kai, Zheng Hua, Chen Falin, et al. (653)
 Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert areas Yang Hangyu, Liu Yanmei, Wang Tingpu (663)
 Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation Jiao Lina, Li Zhihong, Yin Chengcheng, et al. (671)
 Effect of *Streptomyces* JD211 promoting growth of rice seedlings and diversity of soil bacteria Wang Shiqiang, Wei Saijin, Yang Taotao, et al. (681)

Research Notes

- Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang (689)
 Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice rootsZheng Yunyun, Li Zhongyi, Li Jiuyu, et al. (695)
 The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization Xia Xin, Shi Kun, Huang Qianru, et al. (705)
 Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. (712)

Cover Picture: Two dimensional and three dimensional images of soil cracks in paddy field (by Zhang Zhongbin)

《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 3 期 2015 年 5 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 3 May, 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

