

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/trxb201406040265

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^{1, 2} 梁斌^{1, 3} 周建斌^{1†}

(1 西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 渭南市农业技术推广中心, 陕西渭南 714000)

(3 青岛农业大学资源环境学院, 山东青岛 266109)

摘要 采用盆栽试验和短期矿化培养相结合的方法, 研究了施入¹⁵N标记氮肥(+N)及其与秸秆配施(+1/2N+1/2S)在3种长期(19年)不同培肥土壤(即: No-F, 长期不施肥土壤; NPK, 长期施用NPK化肥土壤; MNPK, 长期有机无机肥配施土壤)中的残留及其矿化和作物吸收特性。结果表明, 第一季小麦收获后, +1/2N+1/2S处理下三供试土壤和+N处理下的NPK和MNPK土壤残留肥料氮(残留¹⁵N)中有82.6%~95.1%以有机态存, 而+N处理下No-F土壤残留¹⁵N有47.7%以矿质态存在。经过28 d矿化培养后, 与NPK土壤相比, MNPK土壤氮素净矿化量显著增加, 增幅为39%~49%; NPK和MNPK土壤残留肥料氮(残留¹⁵N)矿化量为1.23~1.90 mg kg⁻¹, 占总残留¹⁵N的2.78%~5.53%, 均显著高于No-F土壤。与+N处理相比, +1/2N+1/2S处理显著提高了3供试土壤氮素净矿化量, 但两施肥处理对NPK和MNPK土壤残留¹⁵N矿化量无显著影响。+N处理下No-F土壤残留¹⁵N的利用率为20%, 显著高于NPK(9%)和MNPK(12%)土壤。两种施肥处理下, MNPK土壤残留¹⁵N的利用率均显著高于NPK土壤。短期培养期间土壤氮素矿化量和第二季小麦生育期作物吸氮量呈显著性正相关, 而残留¹⁵N矿化量和第二季小麦吸收残留¹⁵N量间无显著性相关关系。长期有机无机配施可以提高土壤残留肥料氮的矿化量及有效性。

关键词 长期培肥土壤; ¹⁵N标记; 残留¹⁵N; 氮素矿化

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

施用氮肥对提高作物产量, 保证粮食安全发挥了巨大作用, 据估计, 全球近一半人口的食物来源于氮肥的施用^[1-3]。中国是人口大国, 氮肥的施用农业生产中的作用更为突出。自1980年以来, 我国氮肥用量由934.2万吨增加至2012年的2399.9万吨左右^[4]。但由于多方面原因, 我国农业生产中氮肥利用率尚较低, 水稻、小麦和玉米的氮肥利用率分别仅为28.3%、28.2%和26.1%, 明显低于发达国家水平^[5]。未被作物吸收利用的氮肥, 一部分发生损失进入水体或大气, 一部分残留在土壤中。据研究, 残留在土壤中的氮肥约占氮肥用量的20%~51%^[6-8], 且残留肥料氮多以有机态氮存在^[9-10]。随着氮肥用量的增加, 一季作物收获后残留在土壤中肥料氮的数量会进一步增加。因此,

研究残留氮肥在土壤中的矿化特性和后季利用情况具有重要的实践意义。

国内外学者关于土壤氮素矿化进行了较多的研究^[11-13], 明确了土壤氮素的矿化受土壤水热条件^[14]、pH、有效碳、氮含量^[15]、质地及培养时间等因素影响^[16]。长期有机无机配施改变了土壤的物理、化学和生物学特性^[17], 从而影响土壤氮素的矿化^[12, 18-19]。关于残留肥料氮的生物有效性, 国内外学者进行了不少研究^[20-22], 但结果不尽相同。有研究表明, 残留肥料氮利用率较低, 如德国西北地区采用¹⁵N标记法研究表明, 残留肥料氮利用率为3%~4%^[23]。新西兰田间微区试验表明, 残留肥料氮在后三季小麦中的利用率为1%~5%^[9]。我国华北平原¹⁵N示踪法田间

*国家自然科学基金项目(31372137)及国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD15B04)资助

†通讯作者, Tel: 029-87082793; E-mail: jbzhou@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 赵伟(1984—), 女, 河北晋州人, 博士研究生, 主要从事植物营养调控方面研究。E-mail: wei12327@163.com

收稿日期: 2014-06-04; 收到修改稿日期: 2014-09-03

微区结果表明, 残留肥料氮在第二季的利用率为5%~10%^[8]。也有研究表明, 残留肥料氮生物有效性较高, 在英国东部3个试验田进行的¹⁵N标记试验表明, 四个残效季共有约16%的残留肥料氮被作物吸收, 55%残留肥料氮仍残留在土壤中^[24]。Ju等^[25]研究华北平原小麦-玉米轮作模式下小麦收获后残留尿素氮的去向, 发现其在随后两季的利用率为11%~21%。Sebilo等^[26]新近研究表明, 硝态氮肥施入土壤后当季利用率在45%~50%之间, 之后30年的年平均利用率在0.3%~0.5%之间, 氮肥的累积利用率在61%~65%之间; 30年后仍有12%~15%以有机态残留在土壤中, 说明氮肥的残效较过去认为的要长。因此, 一季作物收获后土壤残留肥料氮的矿化及利用特性是值得研究的重要问题, 而关于我国黄土地区施用氮肥在长期不同培肥土壤中的残留及其矿化和利用的研究尚鲜见报道。因此, 本研究以长期施肥定位试验3种不同培肥土壤为研究对象, 研究了施入¹⁵N标记氮肥及其与秸

秆氮配施对土壤氮素及残留肥料氮矿化和利用的影响, 旨在为合理调控土壤氮素供应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自国家黄土土壤肥力与肥料效益长期监测基地肥料田间定位试验。该基地位于陕西省杨凌区(34°17'51" N, 108°00'48" E), 属温带大陆性季风气候, 海拔524 m, 年均气温13℃, 年均降水量630 mm左右, 主要集中在7—9月, 年蒸发量1 400 mm, 冬春易旱。土壤类型为褐土类, 垆土亚类, 红油土属。肥料田间定位试验始于1990年, 采用小麦-玉米轮作, 一年两熟制度。小麦和玉米季施肥情况见文献[27]。

供试土壤于2009年10月采自上述定位试验的3个处理: 不施肥(N₀-F)、施用氮磷钾化肥(NPK)及有机无机配施(MNPK), 其基本理化

表1 长期不同培肥土壤的基本理化性质

Table 1 Basic properties of soils after 19 years different fertilization managements

土壤 Soil	有机碳 Organic C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	矿质态氮 Mineral N (mg kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
No-F	7.7 ± 0.2	1.0 ± 0.01	5.6 ± 1.8	1.6 ± 0.9	184.8 ± 11.2
NPK	10.5 ± 0.3	1.3 ± 0.00	13.3 ± 2.3	24.6 ± 0.7	327.2 ± 32.0
MNPK	16.5 ± 0.5	2.0 ± 0.03	29.1 ± 7.8	138.4 ± 8.2	423.1 ± 2.2

注: No-F、NPK和MNPK分别代表长期(19年)不施肥土壤、长期施用化肥土壤和长期有机无机配施土壤。下同 Note: No-F, NPK and MNPK stands for soils from three different treatments of a long-term (19 years) fertilization experiment, i.e. no fertilizer, inorganic NPK fertilizers, and organic manure plus inorganic NPK fertilizers, respectively. The same below

性质见表1。

1.2 试验设计

盆栽试验: 研究因素包括上述3个长期不同培肥土壤及不同施肥处理两个因素, 其中不同施肥处理分别为: (1) CK, 不施肥对照; (2) 单施氮肥处理(+N), 土中施入100 mg N kg⁻¹ ¹⁵N标记的尿素; (3) 秸秆氮肥配施处理(+1/2N+1/2S), 施氮量为N 100 mg kg⁻¹, 其中50 mg kg⁻¹来源于¹⁵N标记的尿素, 50 mg kg⁻¹来源于玉米秸秆。使用的¹⁵N标记尿素的丰度为19.85%, 玉米秸秆有机碳及全氮含量分别为430.0及9.8 g kg⁻¹。采用完全随机设计, 共9个处理, 重复4次。称土1.3 kg, 加入

相应氮肥后充分混匀, 装入塑料盆中。于2009年11月9日播种小麦, 每盆播13粒, 出苗后间苗至10株, 于2010年5月31日收获, 收获后土壤样品过2 mm筛, 风干保存。

2010年10月22日, 将上述盆栽试验同处理土壤混匀, 进行第二季盆栽试验, 重复3次, 各处理均不再施用氮肥。每盆播种小麦13粒, 出苗后留苗10株。于2011年5月18日收获, 采小麦整株样品, 按根系、茎秆和籽粒3部分分开, 测定各部位样品全氮含量及¹⁵N丰度。同时用直径1 cm土钻采集土壤样品, 每盆采3钻的混合样, 测定土壤全氮、矿质态氮及晶格固定态铵含量及其¹⁵N丰度。

短期矿化培养试验^[15]：称取相当于10 g烘干土的上述第一季收获后风干土样（过2 mm筛），装入培养瓶，用称重法维持土壤水分为田间持水量的70%，放入25℃的培养箱中培养28 d，重复3次。用2 mol L⁻¹ KCl浸提（水土比10:1），流动分析仪测定培养前、后土壤矿质态氮（NO₃⁻-N和NH₄⁺-N）含量及其¹⁵N丰度，培养后矿质态氮含量减去培养前矿质态氮的含量为土壤氮净矿化量。

1.3 分析方法

土壤全氮用开氏法测定；植物样全氮采用硫酸-双氧水消煮，开氏定氮法测定；土壤矿质态氮用0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄浸提（水土比4:1），滤液中铵态氮和硝态氮通过流动分析仪测定，矿质态氮含量为两者之和^[28]。晶格固定态铵采用Silva-Bremner方法^[29]测定，并保存滴定后样品，待测其¹⁵N丰度。

植物和土壤全氮中¹⁵N丰度利用同位素比率质谱仪测定；土壤矿质态氮和晶格固定态铵中¹⁵N丰度，采用Sebilo等^[30]提出的铵扩散法制备¹⁵N丰度待测样，然后利用同位素比率质谱仪测定。¹⁵N丰度的测定在加利福尼亚大学戴维斯分校稳定性同位素分析室完成。

1.4 数据处理

土壤总残留肥料氮、矿质态残留肥料氮、晶格态残留肥料氮和作物吸收的肥料氮（*F*）的计算如下：

$$F=C \times {}^{15}F \quad (1)$$

式中，*C*为土壤全氮、矿质态氮、晶格态氮和植物氮含量；¹⁵*F*为土壤全氮、矿质态氮、晶格态氮和植物氮中的原子百分超。

残留有机态氮（*R_o*）的计算如下：

$$R_o=R-R_m-R_f \quad (2)$$

式中，*R*为土壤总残留肥料氮；*R_m*为以矿质态残留的肥料氮；*R_f*为以晶格态残留的肥料氮。

文中数据用SAS Version 8.1 for Windows进行方差分析，LSD法进行多重比较。

2 结果

2.1 长期不同培肥土壤残留肥料氮数量及形态

第一季小麦收获后，+N处理下No-F、NPK和MNPk土壤残留肥料氮分别为53.3、36.1和29.4 mg kg⁻¹，且各处理间差异显著（表2）。No-F土

壤47.7%残留肥料氮以矿质态氮存在，48.3%以有机态存在；而NPK和MNPk土壤均约94%残留肥料氮以有机态存在，矿质态氮仅为1.6%~4.1%（表2）。+1/2N+1/2S处理下No-F、NPK和MNPk土壤肥料氮的残留量分别为36.5、34.4和31.0 mg kg⁻¹，即化肥氮施用量的73.0%、68.8%和61.9%残留在土壤中，各处理间差异显著，且肥料氮残留率均显著高于相应土壤的+N处理；+1/2N+1/2S处理下三供试土壤有机态残留肥料氮占总残留肥料氮的82.6%~95.1%，可见残留肥料氮主要以有机态氮存在（表2）。

残留肥料氮以晶格固定态铵形态存在量在0.40~2.75 mg kg⁻¹之间，占总残留量的0.53%~7.54%，且无论氮肥处理如何，MNPk土壤以晶格固定态残留肥料氮量均显著低于NPK和No-F土壤（表2）。

2.2 长期不同培肥土壤及残留肥料氮的矿化

MNPk土壤氮素净矿化量显著高于NPK土壤，NPK土壤又显著高于No-F土壤（*p* < 0.05）（图1）。与CK处理和+N处理相比，+1/2N+1/2S处理显著提高NPK和MNPk土壤氮素净矿化量，增加幅度在25%~39%之间；与CK处理相比，+N处理对NPK和MNPk土壤氮素矿化无显著影响，但使No-F土壤氮素净矿化量降低（图1）。

培养期间NPK和MNPk土壤残留肥料氮矿化量为1.23~1.90 mg kg⁻¹，占土壤残留肥料氮的2.78%~5.53%，显著高于No-F土壤（图2）。+1/2N+1/2S处理残留肥料氮矿化量有高于+N处理的趋势，但差异不显著。No-F土壤中，+1/2N+1/2S处理残留肥料氮矿化量为1.01 mg kg⁻¹，而+N处理发生了肥料氮的损失或固持（图2）。

2.3 作物对残留肥料氮的吸收

第二季小麦吸氮量表现为MNPk>NPK>No-F，且不同处理间差异显著（*p* < 0.05）。与+N处理相比，+1/2N+1/2S处理显著提高MNPk土壤小麦吸氮量，而对NPK土壤小麦吸氮量无显著影响。+N处理显著提高No-F土壤小麦吸氮量（表3）。

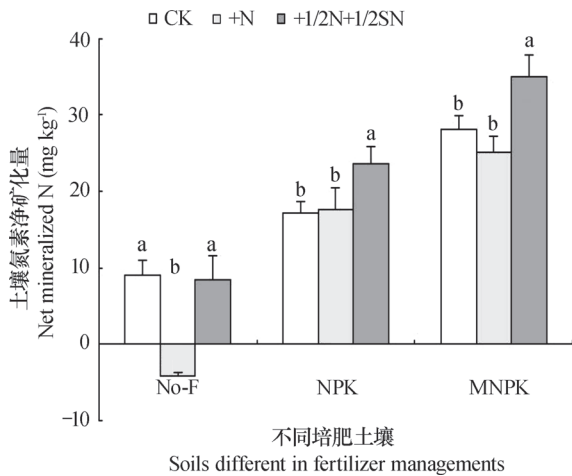
+N处理中，No-F土壤小麦收获期吸收¹⁵N量分别为10.65 mg kg⁻¹，显著高于NPK和MNPk土壤；No-F、NPK和MNPk土壤残留肥料氮的利用率分别为20.0%、9.1%和12.4%，不同处理间差异显著

表2 不同施肥处理对长期不同培肥土壤残留肥料氮形态和数量的影响

Table 2 Effects of fertilization management on forms and quantity of residual fertilizer N in soils different in long-term fertilization pattern

施肥处理 ¹⁾ Fertilization management	土壤 Soil	总残留肥料氮 Total residual ¹⁵ N (mg kg ⁻¹)	残留有机态氮 ¹⁵ N in organic form		残留矿质态氮 ¹⁵ N in mineral form		残留晶格态氮 ¹⁵ N in fixed form	
			含量	比例 ²⁾	含量	比例	含量	比例
			Content	Percentage	Content	Percentage	Content	Percentage
			(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(%)
+N	No-F	53.3 ± 3.8a	25.8 ± 4.9b	48.3 ± 1.3	25.4 ± 1.2a	47.7 ± 0.3	2.1 ± 0.1a	4.0 ± 0.0
	NPK	36.1 ± 2.4b	34.0 ± 2.4a	94.2 ± 1.0	0.7 ± 0.0b	1.9 ± 0.0	1.5 ± 0.1b	4.1 ± 0.1
	MNPK	29.4 ± 0.9c	27.8 ± 0.9b	94.5 ± 1.0	1.2 ± 0.0b	4.1 ± 0.0	0.4 ± 0.0c	1.4 ± 0.0
+1/2N+1/2S	No-F	36.5 ± 0.2a	30.1 ± 0.7b	82.6 ± 3.7	3.6 ± 0.4a	9.9 ± 2.1	2.8 ± 0.3a	7.5 ± 1.4
	NPK	34.4 ± 0.9b	32.3 ± 0.7a	93.8 ± 0.8	1.0 ± 0.1b	2.9 ± 0.1	1.1 ± 0.2b	3.3 ± 0.2
	MNPK	31.0 ± 0.3c	29.1 ± 0.1b	95.1 ± 0.4	1.4 ± 0.2b	4.4 ± 0.6	0.2 ± 0.0c	0.5 ± 0.1

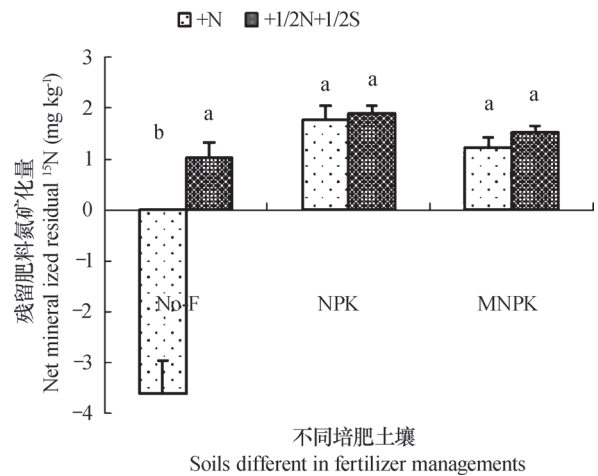
注：1) +N和+1/2N+1/2S分别代表单施氮肥和秸秆氮肥配施处理。2) 表示残留各形态氮占总残留肥料氮的百分比。表中数据为平均值 ± 标准差 (n=4)，同一列中不同小写字母表示差异显著 (p < 0.05)。下同 Note: 1) +N and +1/2N+1/2S stands for N treatments, i.e., 100 mg kg⁻¹ urea-¹⁵N, and 50 mg kg⁻¹ urea-¹⁵N + corn stalk equivalent to 50 mg kg⁻¹ N. 2) Percentage of total residual fertilizer N. Values are means ± SD (n=4). Values with different lowercase letters within the same column are significantly different at p < 0.05. The same below



注：同一培肥土壤中不同小写字母表示差异显著 (p < 0.05)
Note: Values with different lowercase letters within the same fertilizer treatment are significantly different at p < 0.05

图1 不同施肥处理对长期不同培肥土壤氮素净矿化量的影响

Fig. 1 Effect of fertilization management on the net N mineralization rate in soils different in long-term fertilization managements



注：同一培肥土壤中不同小写字母表示差异显著 (p < 0.05)
Note: Values with different lowercase letters within the same fertilizer treatment are significantly different at p < 0.05

图2 不同施肥处理对长期不同培肥土壤残留肥料氮矿化量的影响

Fig. 2 Effects of fertilization management on net mineralization rate of residual ¹⁵N in soils different in long-term fertilization managements

(p < 0.05) (表3)。+1/2N+1/2S处理下，MNPK土壤小麦吸收¹⁵N量和残留肥料氮利用率均显著高于NPK和No-F土壤 (表3)。

从图3可以看出，+1/2N+1/2S处理下三供试土壤和+N处理下的NPK和MNPK土壤第二季小麦吸收肥料氮主要来自残留有机态氮的矿化，而+N处

表3 不同施肥处理对长期不同培肥土壤小麦吸氮量的影响

Table 3 Effect of fertilization management on N uptake by wheat in soils different in long-term fertilization managements

施肥处理 Fertilization management	土壤 Soil	总吸氮量 Total N uptake (mg kg ⁻¹)	吸收 ¹⁵ N量 ¹⁵ N uptake (mg kg ⁻¹)	残留肥料氮利用率 RNUE (%)
+N	No-F	27.88 ± 0.13c	10.65 ± 0.58a	19.97 ± 1.09a
	NPK	36.93 ± 0.88b	3.29 ± 0.07b	9.10 ± 0.20c
	MNPK	63.42 ± 4.60a	3.24 ± 0.08b	12.40 ± 0.32b
+1/2N+1/2S	No-F	25.02 ± 0.93c	3.21 ± 0.13b	8.80 ± 0.35b
	NPK	44.93 ± 1.06b	3.01 ± 0.02c	9.24 ± 0.07b
	MNPK	78.74 ± 2.07a	3.72 ± 0.09a	12.01 ± 0.31a

注：表中数据为平均值 ± 标准差 (n=3)，同一列中不同小写字母表示差异显著 (p < 0.05) Note: Values are means ± SD (n=3). Values with different lowercase letters within the same column are significantly different at p < 0.05

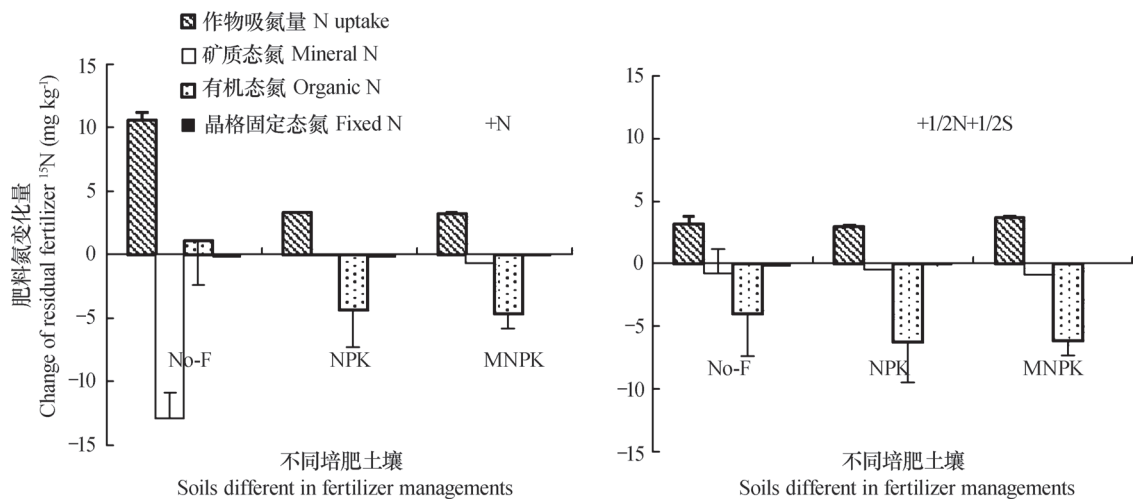


图3 不同施肥处理对长期不同培肥土壤残留肥料氮在第二季变化情况影响

Fig. 3 Effect of fertilization management on change in residual ¹⁵N in soils different in long-term fertilization managements during the second growing season

理下的No-F土壤第二季小麦吸收的肥料氮主要来自于残留的矿质态氮，这与该处理第一季小麦收获后土壤残留氮素主要以矿质态残留为主（表2）有关。

2.4 土壤氮素净矿化量与小麦吸收氮间的关系

矿化培养期间土壤氮素净矿化量与小麦吸氮量呈显著性正相关，相关系数分别为0.75（图4）；残留肥料氮的矿化量与第二季小麦吸收肥料氮量间无显著性相关关系。

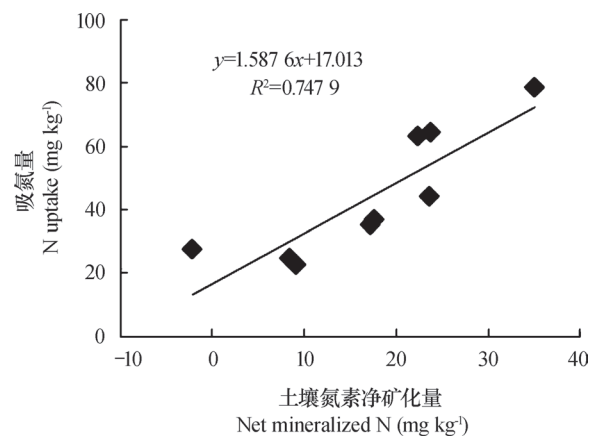


图4 短期矿化培养土壤氮素净矿化量与盆栽小麦吸氮量的相关关系

Fig. 4 Relationship of N uptake by wheat in the pot experiment with net soil N mineralization rate during the short incubation period

3 讨论

3.1 长期不同培肥土壤肥料氮残留特性

本研究表明，第一季作物收获后，+N处理

No-F土壤残留肥料氮量显著高于NPK和MNPK土壤,且50%以上以矿质态存在,而NPK和MNPK土壤以矿质态存在的残留肥料氮量均低于5%(表2),这是由于长期不施肥,导致No-F土壤养分失衡(表1),影响了作物对肥料氮吸收和土壤微生物对肥料氮的固持^[31]。多数研究表明,正常条件下施入土壤的氮肥主要以有机态残留^[10, 32-33],这与本试验NPK和MNPK土壤结果一致。一些研究发现,当施氮量过高时,残留肥料氮以矿质态氮残留量将增加^[3, 25]。+1/2N+1/2S处理三供试土壤残留肥料氮均主要以有机态存在,以矿质态残留的肥料氮仅为2.9%~9.8%,这与施用的有机物料C/N高,促进了氮素固定有关,这与其他学者的研究结果一致^[34-35]。可见,一季作物收获后残留在土壤中的肥料氮多以有机态形式存在,若土壤肥力低,以矿质态残留肥料氮的比例会有所增加。

第一季作物收获后, MNPK土壤以晶格态残留的肥料氮显著低于NPK和No-F土壤(表2)。Liang等^[36]室内培养试验也表明, MNPK土壤对施入 NH_4^+ -N的晶格固定量也显著低于NPK和No-F土壤。长期有机无机配施土壤晶格固定铵的能力下降的原因可能有:(1)长期有机无机配施增加了土壤速效钾含量(表1), K^+ 和 NH_4^+ 竞争固定位点^[37-38],从而降低土壤对 NH_4^+ 的固定;(2)MNPK土壤有机质含量高,有机物覆盖晶格固定位点,阻塞晶层内外离子进出通道的闭塞,使铵离子难以进入层间位置^[39]; (3)长期有机无机配施可改变土壤中黏土矿物的组分^[40],也可能是造成MNPK土壤晶格固定能力低的原因之一。

3.2 长期不同培肥措施对氮素矿化特性的影响

本研究表明,长期有机无机配施土壤氮素净矿化量显著高于长期单施化肥土壤(图2),与多数研究结果一致^[11, 18-19]。这与长期有机无机配合施用提高了土壤有机质含量^[17]和土壤微生物生物量碳、氮^[41]有关。与+N处理相比,+1/2N+1/2S处理显著提高三不同培肥土壤氮素净矿化量,这与该处理第一季小麦生长期间增加有机物投入,为微生物提供了更多碳源,促进土壤微生物的生长繁殖,增加其对氮素的固持有关^[42]。可见长期配施有机肥可以提高土壤供氮能力;施用碳氮比高的作物秸秆虽然减少了当季作物对氮素的吸收^[27],但提高了土壤对下季作物的供氮能力。

矿化培养期间,无论施肥情况如何, MNPK和

NPK土壤残留肥料氮的矿化量均显著($p < 0.05$)高于No-F土壤,这与小麦收获后MNPK和NPK土壤残留肥料氮多为有机态氮有关(表2)。很多研究也表明,第一季作物收获后,残留肥料氮主要以有机态存在^[7, 43]; Shen等^[44]研究表明,作物收获后肥料氮有19%~34%以微生物氮残留在土壤中。本研究中,第一季作物收获后, NPK和MNPK土壤微生物量氮的含量均高于No-F土壤^[27],肥料氮被微生物固持相对也高,同时由于可矿化氮主要来自构成微生物组分的氨基酸态氮和氨基糖态氮^[11, 16],所以培养期间矿化出来的残留肥料氮也较多。

3.3 长期不同培肥措施对残留肥料氮吸收的影响

+N处理下No-F土壤残留肥料氮的利用率显著高于NPK和MNPK土壤,这主要与No-F土壤残留肥料氮48%以矿质态存在(图1),易被下季作物吸收有关。Ju等^[25]研究也表明,当施氮量高时,残留肥料氮有11%~24%以矿质态存在,其在第二季的利用率为11%~16%。英国东部研究也表明,以矿质态残留的肥料氮后季利用率高^[3]。本研究中,两种施肥处理下, MNPK土壤(12%)残留肥料氮的利用率均显著高于NPK土壤(9%),且吸收的肥料氮主要来自于残留有机态氮的矿化(图4),这可能由于长期有机无机配合施用提高了土壤有效磷、钾含量^[45]和微生物生物量碳、氮^[41],改善了土壤物理性质^[17],从而提高了残留有机态氮的矿化和第二季作物吸收。

本研究发现,+1/2N+1/2S处理下三供试土壤和+N处理下的NPK和MNPK土壤第二季小麦吸收的肥料氮主要来自有机态残留氮的矿化,说明以有机态残留在土壤中肥料氮在下一季作物生长期可以逐渐释放。与NPK土壤相比, MNPK土壤残留肥料氮的利用率较高,说明有机肥与化肥长期配施可以提高残留肥料氮的有效性。第一季小麦收获后土壤残留肥料氮的矿化量与第二季小麦吸收的 ^{15}N 量之间无显著性相关关系,这可能与本研究采用盆栽试验方法,第一季作物对氮肥吸收量相对较高,导致土壤残留肥料氮低、矿化量少,而作物吸收氮主要来自土壤有关。Sebilo等^[26]采用渗漏池法研究表明,氮肥施入土壤30年后仍有12%~15%的肥料氮以有机态残留在土壤中,说明残留肥料氮的矿化和利用是一个较漫长的过程。目前,不少报道强调,我国氮肥的当季利用率在30%左右,似乎未被当季

作物利用的氮肥均发生了损失。由本研究及其他学者的研究结果可以看出, 未被当季作物利用的氮素约有三分之一的残留在土壤中, 并非发生损失; 这些残留的肥料氮可以被后茬作物逐渐利用。同时, 由于本文的结果是在盆栽试验条件下获得的, 种植密度高, 水热条件好, 所以残留氮的后效应远高于田间, 因此有必要进一步采用田间试验研究不同农田生态系统残留肥料氮的利用特性, 以科学评价施用氮肥的去向及可能带来的营养及生态环境效应。

4 结 论

一季作物收获后约有三分之一的肥料氮残留在土壤, 配施秸秆显著增加了肥料氮在土壤中的残留比例; 残留肥料氮主要以有机态氮存在于土壤。残留肥料氮在第二季作物生长期可以逐渐矿化; 长期施肥处理尤其长期有机无机配施显著提高土壤氮素矿化量和作物吸收量, 同时还显著提高残留肥料氮的利用率。

参 考 文 献

- [1] 鲁彩艳, 马建, 陈欣, 等. 不同施肥处理对连续三季作物氮肥利用率及其分配与去向的影响. 农业环境科学学报, 2010, 29 (2) : 400—406. Lu C Y, Ma J, Chen X, et al. Effect of N-fertilization on the use efficiency, distribution and fate of labeled ¹⁵N fertilizer in soil-plant systems over three continuous crop cultivations (In Chinese) . Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29 (2) : 400—406
- [2] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究 1. 冬小麦生长季肥料氮的去向. 核农学报, 2002, 16 (6) : 397—402. Ju X T, Pan J R, Liu X J, et al. The fate of nitrogen fertilizer in winter wheat growth season under high soil fertility condition (In Chinese) . Acta Agriculture Nucleatae Sinica, 2002, 16 (6) : 397—402
- [3] Bhogal A, Rochford A D, Sylvester-Bradley S. Net changes in soil and crop nitrogen in relation to the performance of winter wheat given wide-ranging annual nitrogen applications at Ropsley, UK. Journal of Agricultural Science, 2000, 135: 139—149
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2013. National Bureau of Statistics of China. China statistics yearbook (In Chinese) . Beijing: China Statistics Press, 2013
- [5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45 (5) : 914—924. Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5) : 914—924
- [6] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. PNAS, 2009, 106 (9) : 3041—3146
- [7] Glendining M J, Poulton P R, Powlson D S, et al. Fate of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to spring barley grown on soils of contrasting nutrient status. Plant and Soil, 1997, 195 (1) : 83—98
- [8] Jia S L, Wang X B, Yang Y M, et al. Fate of labeled urea-¹⁵N as basal and topdressing applications in an irrigated wheat-maize rotation system in North China Plain: I Winter wheat. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90 (3) : 331—346
- [9] Kumar K, Goh K M. Recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to winter wheat and perennial ryegrass crops and residual ¹⁵N recovery by succeeding wheat crops under different crop residue management practices. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 62 (2) : 123—130
- [10] Glendining M J, Poulton P R, Powlson D S, et al. Availability of the residual nitrogen from a single application of ¹⁵N-labelled fertilizer to subsequent crops in a long-term continuous barley experiment. Plant and Soil, 2001, 233 (2) : 231—239
- [11] 徐阳春, 沈其荣. 有机肥和化肥长期配合施用对土壤及不同粒级供氮特性的影响. 土壤学报, 2004, 41 (1) : 87—93. Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term combined application of manure and chemical fertilizer on supplying characters of nitrogen in soil and soil particle fractions (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (1) : 87—93
- [12] 艾娜, 周建斌, 杨学云, 等. 长期施肥及撂荒对土壤氮素矿化特性及外源硝态氮转化的影响. 应用生态学报, 2008, 19 (9) : 1937—1943. Ai N, Zhou J B, Yang X Y, et al. Effects of long-term fertilization and fallowing on soil nitrogen mineralization and exogenous NO₃⁻-N transformation (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (9) : 1937—1943
- [13] 巨晓棠, 边秀举, 刘学军, 等. 旱地土壤氮素矿化参数与氮素形态的关系. 植物营养与肥料学报, 2000, 6 (3) : 251—259. Ju X T, Bian X J, Liu X J, et al. Relationship between soil nitrogen mineralization parameter with several nitrogen forms (In Chinese) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6 (3) :

- 251—259
- [14] 沈玉芳, 李世清, 邵明安. 半湿润地区土垫早耕人为土不同土层氮矿化的水温效应研究. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (1) : 8—14. Shen Y F, Li S Q, Shao M A. Effects of temperature and water condition on soil nitrogen mineralization of different layers in Eum-Orthic Anthrosols of sub-humid area (In Chinese) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13 (1) : 8—14
- [15] 张树兰, 杨学云, 吕殿青, 等. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响. 生态学报, 2002, 22 (12) : 2147—2153. Zhang S L, Yang X Y, Lü D Q, et al. Effect of soil moisture, temperature and different nitrogen fertilizers on nitrification (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (12) : 2147—2153
- [16] Mengel K. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. Plant and Soil, 1996, 181 (1) : 83—93
- [17] Edmeades D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66 (2) : 165—180
- [18] 王媛, 周建斌, 杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响. 中国农业科学, 2010, 43 (6) : 1173—1180. Wang Y, Zhou J B, Yang X Y. Effects of different long-term fertilization on the fractions of organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils (In Chinese) . Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (6) : 1173—1180
- [19] 鲁彩艳, 牛明芬, 陈欣, 等. 不同施肥制度培育土壤氮矿化势与供氮潜力. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26 (5) : 773—775. Lu C Y, Niu M F, Chen X, et al. Nitrogen mineralization potentials of meadow brown soil in different fertilization practice (In Chinese) . Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26 (5) : 773—775
- [20] Glendining M J, Powlson D S, Poulton P R, et al. The effects of long-term applications of inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen in the Broadbalk Wheat Experiment. Journal of Agricultural Science, 1996, 127: 347—363
- [21] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效. 中国农业科学, 2007, 40 (9) : 1964—1972. Zhang L J, Ju X T, Zhang F S, et al. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers (In Chinese) . Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40 (9) : 1964—1972
- [22] Petersen J, Thomsen I K, Mattsson L, et al. Estimating the crop response to fertilizer nitrogen residues in long-continued field experiments. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 93 (1) : 1—12
- [23] Sieling K, Beims S. Effects of ^{15}N split-application on soil and fertiliser N uptake of barley, oilseed rape and wheat in different cropping systems. Journal of Agronomy and Crop Science, 2007, 193 (1) : 10—20
- [24] Hart P B S, Powlson D S, Poulton P R, et al. The availability of the nitrogen in the crop residues of winter wheat to subsequent crops. Journal of Agricultural Science, 1993, 121: 355—362
- [25] Ju X T, Liu X J, Pan J R, et al. Fate of ^{15}N -labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain. Pedosphere, 2007, 17 (1) : 52—61
- [26] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. PNAS, 2013, 110 (45) : 18185—18189
- [27] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 氮肥及其与秸秆配施在不同肥力土壤的固持及供应. 中国农业科学, 2012, 45 (9) : 1750—1757. Liang B, Zhao W, Yang X Y, et al. Nitrogen retention and supply after addition of N fertilizer and its combination with straw in the soils with different fertilities (In Chinese) . Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45 (9) : 1750—1757
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2005. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese) . 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [29] Silva J A, Bremner J M. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed ammonium. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30 (5) : 587—594
- [30] Sebilo M, Mayer B, Grably M, et al. The use of the ‘ammonium diffusion’ method for $\delta^{15}\text{N}-\text{NH}_4^+$ and $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ measurements: Comparison with other techniques. Environmental Chemistry, 2004, 1 (2) : 99—103
- [31] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 长期不同施肥对旱地小麦土壤氮素供应及吸收的影响. 中国农业科学, 2012, 45 (5) : 885—892. Liang B, Zhao W, Yang X Y, et al. Effects of long-term different fertilization managements on changes of N in soil and its uptake by wheat on dryland (In Chinese) . Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45 (5) : 885—892
- [32] 彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等. ^{15}N 交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留. 生态学报, 2011, 31 (3) : 858—865. Peng P Q, Qiu S J, Hou H B,

- et al. Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic ¹⁵N cross labeled fertilizers (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (3): 858—865
- [33] Macdonald A J, Poulton P R, Stockdale D S, et al. The fate of residual ¹⁵N-labelled fertilizer in arable soils: Its availability to subsequent crops and retention in soil. *Plant and Soil*, 2002, 246 (1): 123—137
- [34] Han K H, Choi W J, Han G H, et al. Urea-nitrogen transformation and compost-nitrogen mineralization in three different soils as affected by the interaction between both nitrogen inputs. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39 (3): 193—199
- [35] 艾娜, 周建斌, 段敏. 不同有机碳源对施入土壤中不同形态氮素固持的影响. *土壤通报*, 2009, 40 (6): 1337—1341. Ai N, Zhou J B, Duan M. Effects of different organic carbons on nitrate and ammonium immobilization by soil microbial biomass in soil (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 (6): 1337—1341
- [36] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Long-term combined application of manure and NPK fertilizers influenced nitrogen retention and stabilization of organic C in Loess soil. *Plant and Soil*, 2012, 353 (1/2): 249—260
- [37] Nieder R, Benbi D K, Scherer H W. Fixation and defixation of ammonium in soils: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47 (1): 1—14
- [38] 张崇玉, 李生秀. 西部农业土壤固定态铵及影响因素的研究. *干旱地区农业研究*, 2003, 21 (2): 54—58. Zhang C Y, Li S X. The studies on fixed NH₄⁺ and effecting factors on it in soils from west China (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21 (2): 54—58
- [39] Porter L, Stewart B. Organic interferences in the fixation of ammonium by soils and clay minerals. *Soil Science*, 1970, 109 (4): 229—233
- [40] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (6): 1580—1590
- [41] 梁斌, 周建斌, 杨学云. 长期施肥对土壤微生物生物量碳、氮及矿质态氮含量动态变化的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (2): 321—326. Liang B, Zhou J B, Yang X Y. Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen, and mineral nitrogen after a long-term different fertilization (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (2): 321—326
- [42] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素与DCD和有机物料配施条件下氮素的转化和去向. *中国农业科学*, 2002, 35 (2): 181—186. Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Nitrogen transformation and fate in soil under the conditions of mixed application of urea with DCD or different organic materials (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (2): 181—186
- [43] Haynes R. Fate and recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer urea applied to winter wheat in spring in the Canterbury region of New Zealand. *Journal of Agricultural Science*, 1999, 133 (2): 125—130
- [44] Shen S M, Hart P B S, Powlson D S, et al. The nitrogen cycle in the broadbalk wheat experiment: ¹⁵N-labelled fertilizer residues in the soil and in the soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21 (4): 529—533
- [45] Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30: 401—422

RESIDUAL OF APPLIED ¹⁵N FERTILIZER IN SOILS UNDER LONG-TERM DIFFERENT PATTERNS OF FERTILIZATION AND ITS UTILIZATION

Zhao Wei^{1, 2} Liang Bin^{1, 3} Zhou Jianbin^{1†}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University / Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Weinan City Agricultural Technology Promotion Center, Weinan, Shaanxi 714000, China)

(3 College of Resources and Environmental Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract A pot experiment coupled with short term mineralization incubation were conducted to explore characteristics of residual, mineralization and crop uptake of the ¹⁵N-labeled N fertilizer applied alone and/or

together with crop straw in the soils collected from three different treatments of a 19-year fertilizer experiment, i.e. treatment No-F (no fertilization), treatment NPK (long-term NPK fertilization) and treatment MNPK (long-term NPK fertilization plus organic manure). The pot experiment was designed to have two treatments, i.e., treatment +N ($100 \text{ mg kg}^{-1} \text{ urea-}^{15}\text{N}$), and treatment +1/2N+1/2S ($50 \text{ mg kg}^{-1} \text{ urea-}^{15}\text{N}$ + corn stalk equivalent to $50 \text{ mg kg}^{-1} \text{ N}$). Fertilizers were added to the pots separately for the first cropping of wheat in 2009. After the first cropping of wheat was harvest, 82.6% ~ 95.1% of the residual fertilizer N in all the three soils under treatment +1/2N+1/2S and NPK soil and MNPK soil under treatment +N were in organic form; and 47.7% of the residual fertilizer N in the No-F soil under treatment +N was in mineral form. After 28 days of incubation for mineralization, the net N mineralization in MNPK soil increased significantly, by 39% ~ 49% over that in NPK soil. In NPK and MNPK soils, 1.23 to 1.90 mg kg^{-1} of the residual fertilizer N was mineralized, accounting for 2.78% ~ 5.53% of the total residual fertilizer N in the soils. The net mineralization rate of residual fertilizer N in NPK and MNPK soils was significantly higher than that in No-F soil. Compared to treatment +N, treatment +1/2N+1/2S significantly increased net N mineralization rate in the three soils. However, the two treatments did not affect much the mineralization rate of residual fertilizer N in NPK and MNPK soils. In No-F soil under treatment +N, the residual fertilizer N use efficiency (RNUE) reached 20% in the No-F soil significantly higher than that (9%) in NPK and (12%) MNPK soils ($p < 0.05$). The RNUE in MNPK soil was significantly higher than that in NPK soil regardless of N treatment (i.e., +N, or +1/2N+1/2S). N uptake by the second crop of wheat during the vegetative growing period was found to be significantly and positively related to net soil N mineralization rate during the short incubation period, while no significant correlation was observed between residual fertilizer N mineralization rate and amount of residual fertilizer N absorbed by the second cropping of wheat. To sum up, long-term combined application of organic manure and chemical fertilizer can increase the mineralization rate of residual fertilizer N, and hence improve its bioavailability.

Key words Soil under long-term fertilization patterns; ^{15}N labeling; Residual ^{15}N ; N mineralization

(责任编辑: 卢 萍)

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

