

# 小麦-玉米轮作体系下氮肥对长期不同施肥处理土壤氮含量及作物吸收的影响\*

梁 斌<sup>1,2</sup> 赵 伟<sup>1,2</sup> 杨学云<sup>1,2</sup> 周建斌<sup>1,2†</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 以长期不同施肥处理土壤为对象, 研究了不同施肥土壤中施用氮肥后土壤氮素含量、微生物固持及释放和作物吸收及利用特性。结果表明, 施用氮肥显著增加长期不施肥土壤(NF)矿质氮含量, 对长期施用化肥土壤(NPK)和有机无机配施土壤(MNPK)矿质态氮含量无显著影响; 施用氮肥对 NF 中土壤微生物生物量氮(SMBN)含量无显著影响, 使拔节期 NPK 和 MNPK 中 SMBN 含量分别增加了 4.3 倍和 0.8 倍。从小麦拔节期到开花期, NPK 和 MNPK 中土壤微生物生物量氮含量分别显著降低 51% 和 56%。小麦收获时 NPK 和 MNPK 土壤氮肥的利用率分别为 36% 和 45%; 而 NF 土壤所施入的氮素几乎未被小麦吸收利用, 但在玉米季有 34% 被吸收。小麦收获时, NF 土壤施入的氮肥有 50% 以上淋溶至土壤 30 cm 以下土层, 施肥也显著提高了 NPK 土壤 30~50 cm 土层硝态氮含量, 但施用氮肥对 MNPK 土壤 0~100 cm 剖面硝态氮含量无显著影响。说明长期有机无机配施增强了土壤氮素的缓冲能力, 协调了土壤氮素固持与作物吸氮间的关系, 为提高氮素利用率, 减少氮素对环境影响的有效手段。

**关键词** 不同施肥土壤; 矿质氮; 土壤微生物生物量氮; 氮素吸收; 氮肥利用率

**中图分类号** S158.3 **文献标识码** A

20 世纪 60 年代以来, 为了满足粮食的需求, 化肥施用量增加, 尤其是氮肥施用量从 1961 年的  $1.16 \times 10^7$  t 增加到 2006 年的  $1.04 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>。化肥的大量施用, 导致土壤质量退化<sup>[1-2]</sup>、环境污染等问题<sup>[3-5]</sup>。目前全球人口还在不断增加, 对粮食的刚性需要有增无减, 如何协调好粮食生产安全与生态环境保护的关系是世界各国关注的重大问题。

不同养分的平衡供应是提高土壤肥力, 增加粮食产量, 减少肥料对环境的影响, 实现双赢目的的有效手段<sup>[6]</sup>。养分平衡不仅包括植物所需化学营养元素的平衡, 还包括土壤微生物所需能源物质和营养物质的平衡。有机物料与无机化肥配施是达到土壤养分平衡的重要措施<sup>[7-8]</sup>。土壤微生物对氮素的固持和释放是协调土壤氮素保蓄与供应的主要机理之一。Yevdokimov 等<sup>[9]</sup>研究表明, 土壤微生物生物量氮(SMBN)是植物氮素的重要来源。Zhou 等<sup>[10]</sup>的研究也指出, 土壤中微生物生物量氮含量和

作物吸氮量显著正相关。Sugihara 等<sup>[11]</sup>也表示, 土壤微生物生物量氮可以为作物生长提供氮源。短期的盆栽<sup>[12-14]</sup>和田间试验<sup>[11]</sup>研究表明, 加入有机物料之后增加了土壤微生物对氮素的固持, 减少了土壤矿质氮含量, 进而减少了氮素损失<sup>[13, 15-16]</sup>。但也有研究指出, 有机物料的施用在短期内降低作物氮素利用率和产量<sup>[12, 17-18]</sup>。关于长期有机无机配施后对施入土壤氮素的固持、释放及作物吸收和损失的研究较少<sup>[19]</sup>。

长期有机无机配施不仅显著提高土壤有机碳、全氮等含量<sup>[20-21]</sup>, 而且提高包括土壤微生物生物量、可溶性有机物等活性有机物的含量<sup>[22-24]</sup>, 这无疑会影响土壤对氮素的固持与释放。因此, 本文以长期不同施肥处理土壤为对象, 研究了氮肥在不同肥力土壤中的固持、释放及作物吸收特性, 旨在揭示长期有机无机配施对土壤氮素的固持、供应及损失的影响。

\* 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD89B02)、国家自然科学基金项目(40571087)和西北农林科技大学创新团队项目资助

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

作者简介: 梁 斌(1983—), 男, 山东昌乐人, 博士研究生, 主要从事植物营养调控与环境方面研究。E-mail: liangbin@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2011-07-12; 收到修改稿日期: 2011-12-10

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

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。监测基地位于陕西省杨陵区(34°17'51"N, 108°00'48"E), 该地区属温带大陆性季风气候, 海拔 524 m, 年均气温 13℃, 年均降水量 632 mm, 主要集中在 7 月至 9 月, 年蒸发量 1 400 mm, 冬春易旱。土壤类型为褐土类, 壤土亚类, 红油土属, 土壤质地为粉砂黏壤土。该试验田始建于 1990 年, 试验开始时耕层土壤基本理化性状为: 有机碳 6.3 g kg<sup>-1</sup>, 全氮 0.8 g kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.6 g kg<sup>-1</sup>, 全钾 22.8 g kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 61.3 mg kg<sup>-1</sup>, 有效磷 9.57 mg kg<sup>-1</sup>, 速效钾 191 mg kg<sup>-1</sup>, 土壤容重 1.3 g cm<sup>-3</sup>。采用小麦-玉米一年两熟轮作制度。

本试验涉及的施肥处理包括: (1) 长期(19 年)不施肥(NF); (2) 长期施用化肥(NPK); (3) 长期有机无机配施(MNPK)。小区面积为 196 m<sup>2</sup> (14 m × 14 m)。每年在小麦种植前, NPK 处理化学氮、磷、钾肥施用量分别为 N 165 kg hm<sup>-2</sup>, P 58 kg hm<sup>-2</sup> 和 K 69 kg hm<sup>-2</sup>, 在玉米小喇叭口期 NPK 处理追施 N 188 kg hm<sup>-2</sup>, P 25 kg hm<sup>-2</sup> 和 K 78 kg hm<sup>-2</sup>, 其中氮肥为尿素, 钾肥为硫酸钾、磷肥为过磷酸钙。MNPK 处理在小麦种植前施用牛廐肥, 总施氮量与

NPK 处理相同, 但是其中 70% N 素来源于牛廐肥, 化肥提供 30% (牛廐肥中的 P 和 K 未计入施肥量), 磷肥和钾肥的施用与 NPK 处理相同, 未考虑通过有机肥带入的 P 和 K 养分; 在玉米生长季节, MNPK 处理的施肥量与 NPK 处理相同。

### 1.2 微区试验设计

试验采用裂区设计, 主处理为三种长期不同施肥土壤, 即 NF、NPK 和 MNPK 处理土壤, 其 0 ~ 20 cm 土层基本理化性质见表 1; 副处理为施用氮肥(+N) 和不施氮肥处理(-N), 重复 3 次。采用土柱微区试验方法, 所用 PVC 管长 63 cm, 内径为 24.5 cm。试验开始时(2009 年小麦种植前) 将 PVC 管的 60 cm 打入主处理相应试验小区中, 3 cm 留在地表之上。将 +N 处理土柱内 0 ~ 15 cm 土层土壤取出, 按 N 165 kg hm<sup>-2</sup> 的量混入尿素后回填到原来土柱, -N 处理不施氮肥。除氮肥之外, 土柱内其他化肥施用与本文 1.1 节所述的 NF、NPK 和 MNPK 处理相同。

### 1.3 作物田间培肥管理

小麦于 2009 年 10 月 18 日播种, 播种量为每土柱 30 粒, 等小麦出苗后间苗至 20 株。玉米于 6 月 18 日播种, 每土柱播 3 粒, 出苗后间苗至 1 株。玉米拔节期在 NPK 和 MNPK 处理的所有土柱中按 N 188 kg hm<sup>-2</sup>, P 25 kg hm<sup>-2</sup> 和 K 78 kg hm<sup>-2</sup> 追施磷酸氢钙、尿素和硫酸钾, NF 处理内土柱不追肥。

表 1 长期不同施肥处理土壤基本理化性质

Table 1 Soil properties after 19-year fertilization management

试验土壤代码 Experiment soil code	有机碳 Soil organic C (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	矿质态氮 Mineral N (mg kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )
NF	8.5 ± 0.5	0.92 ± 0.01	5.6 ± 1.8	1.4 ± 0.6	166.6 ± 4.6
NPK	10.6 ± 0.3	1.21 ± 0.01	13.3 ± 2.3	49.2 ± 1.9	243.8 ± 38.0
MNPK	13.6 ± 0.3	1.52 ± 0.04	29.1 ± 7.8	80.9 ± 10.3	322.4 ± 35.1

### 1.4 样品采集及方法

2009 年 10 月试验开始至 2010 年 10 月试验结束, 在小麦拔节期(ET)、开花期(FT)、收获期(HT) 和玉米收获期采集小麦地上部植株样品和玉米整株(包括根系)样品, 测定其全氮含量。在采小麦植株样的同时, 用土钻(直径 2 cm) 采集土壤样品(0 ~ 15 cm), 每土柱采两钻得混合样, 测定土壤微生物量氮和矿质态氮含量。小麦和玉米收获后按 10 cm 一层采集土柱内 0 ~ 100 cm 土壤剖面样品, 测定土壤硝态氮含量。

土壤微生物生物量氮采用氯仿熏蒸浸提法测定<sup>[25]</sup>; 硝态氮采用 0.5 mol L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提(水土比 4:1), 流动分析仪测定; 植物样全氮采用硫酸-双氧水消煮, 开氏定氮法测定<sup>[26]</sup>。

氮素携出量是指在作物各生长期间地上部吸收的氮素总量(玉米包括根系吸收的氮素量), 其计算公式为:

$$\text{氮素携出量}(\text{kg hm}^{-2}) = \text{地上部干物质重}(\text{g}) \times \text{地上部含氮量}(\text{g kg}^{-1}) \times 10000(\text{m}^3) \times 10^{-6} / \text{微区面积}(\text{m}^2)$$

氮肥利用率是指施入的氮肥被作物吸收利用的百分率,采用差值法计算,公式为:

氮肥利用率(%) = (施氮微区氮素携出量 - 不施氮微区氮素携出量) × 100 / 施氮量

### 1.5 数据处理

图表中的数据为3次重复的平均值 ± 标准差,用 SAS Version 8.1 for Windows 做方差分析,如果差异显著( $p < 0.05$ ),用 LSD 法进行多重比较。

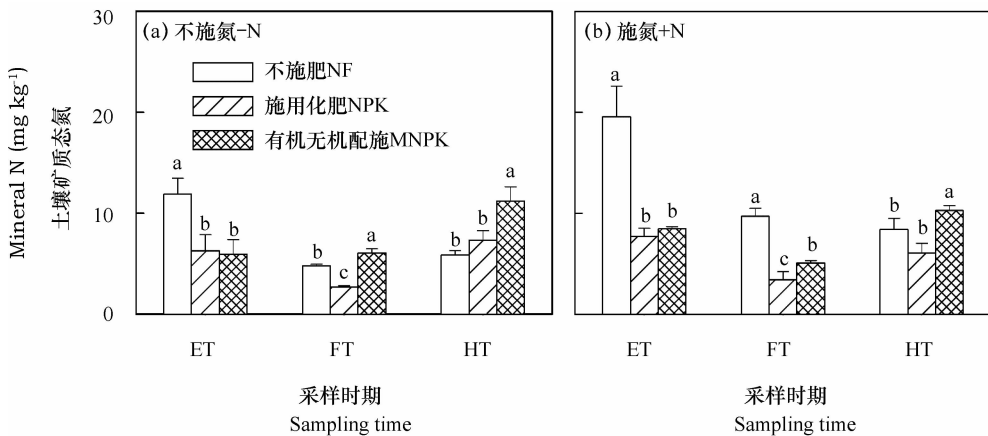
## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥对长期不同施肥土壤矿质态氮含量的影响

在未施氮处理中,小麦拔节期 NF 土壤矿质氮含量最高,分别为 NPK 和 MNPK 土壤的 1.9 和 2.0 倍,差异达显著水平;开花期 NF、NPK 和 MNPK 土壤矿质态氮含量分别为:4.8、2.7 和 6.0 mg kg<sup>-1</sup>,两两间差异显著;收获期 MNPK 土壤矿质态氮含量显著高于 NF 和 NPK 土壤(图 1a)。

在施用氮肥处理中,小麦拔节期 NF 土壤矿质态氮含量显著高于 NPK 和 MNPK 土壤,分别为 NPK 和 MNPK 土壤的 2.5 倍和 2.4 倍,NPK 和 MNPK 土壤中矿质态氮含量没有显著差异;开花期 NF 土壤中矿质态氮含量也显著地高于 NPK 和 MNPK 土壤;而到小麦收获期,MNPK 土壤中矿质氮含量显著高于 NF 和 NPK 土壤(图 1b)。与不施氮处理相比,施用氮肥显著增加 NF 土壤矿质氮含量,小麦拔节期、开花期和收获期增幅分别为 65%、103% 和 43% (图 1a,图 1b);施用氮肥对 NPK 和 MNPK 土壤中各采样时期矿质态氮含量无显著影响(图 1a、图 1b)。

无论施氮与否,从拔节期到开花期 NF 土壤矿质氮含量均显著降低,未施氮处理降低 7.1 mg kg<sup>-1</sup>(图 1a),施氮处理降低 9.9 mg kg<sup>-1</sup>(图 1b),分别占拔节期矿质态氮的 60% 和 51%;NPK 土壤矿质氮含量先显著下降后显著上升(图 1a,图 1b);小麦收获期 MNPK 土壤中矿质态氮含量最高,不施氮和施氮处理中分别为开花期的 1.9 倍和 2.0 倍(图 1a,图 1b)。



注:ET、FT、HT代表小麦拔节期、开花期、收获期 Note:ET, FT, and HT stands for elongating, flowering, and harvesting stage of wheat, respectively

图 1 不施氮(a)和施氮(b)处理的长期不同施肥土壤矿质态氮含量

Fig. 1 Mineral N in soils under different long-term fertilization managements without (a) or with (b) application of N during growth of wheat

### 2.2 氮肥对长期不同施肥土壤微生物生物量氮含量的影响

在未施氮处理中,与长期不施肥土壤相比,长期有机无机配施显著增加土壤微生物生物量氮(SMBN)含量,在小麦拔节期、开花期和收获期增幅分别为 211%、67% 和 69% (图 2a);长期施用 NPK 化肥也显著增加小麦开花期和收获期 SMBN 含量,增幅分别为 17% 和 16%,但小麦拔节期 NPK 和 NF

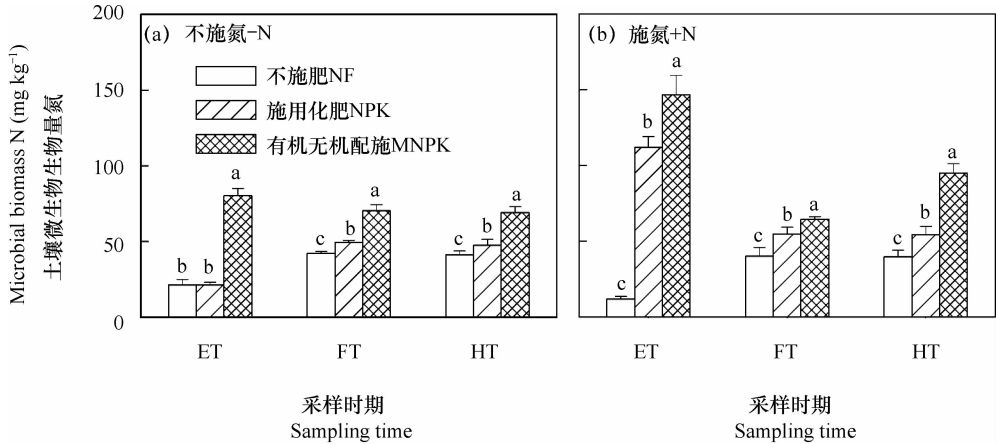
土壤微生物生物量氮含量无显著差异(图 2a)。

在施氮处理中,各采样时期长期不同施肥处理 SMBN 含量的变化趋势均为 MNPK > NPK > NF,两两之间差异达显著水平(图 2b),其中在拔节期,MNPK 和 NPK 的 SMBN 含量分别为 NF 土壤的 6.5 倍和 5.0 倍。在 NF 土壤中施用氮肥显著降低小麦拔节期 SMBN 含量,对其他时期 SMBN 含量无显著影响(图 2);施用氮肥使拔节期 NPK 和 MNPK 的 SMBN

含量分别显著增加了  $90.8 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $66.3 \text{ mg kg}^{-1}$ , 增幅分别为 429% 和 83% (图 2); 除此之外, 施氮也显著增加了小麦收获期 MNPK 的 SMBN 含量 (图 2)。

无论施氮与否, 小麦开花期 NF 的 SMBN 含量均显著地高于拔节期 (图 2); 从小麦拔节期到开花期, 不施氮处理中 NPK 的 SMBN 含量显著增加  $28.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ,

增幅为 133% (图 2a), 但施氮处理中 NPK 的 SMBN 含量显著降低 51% (图 2b); 不施氮处理各生育期 MNPK 的 SMBN 含量无显著变化 (图 2a), 施入氮肥后 MNPK 的 SMBN 含量先下降后上升, 从拔节期到开花期降低  $82.0 \text{ mg kg}^{-1}$ , 降幅为 56%, 开花期到收获期增加  $30.4 \text{ mg kg}^{-1}$ , 增幅为 47% (图 2b)。



注: ET、FT、HT代表小麦拔节期、开花期、收获期 Note: ET, FT, and HT stands for elongating, flowering, and harvesting stage of wheat, respectively

图 2 不施氮 (a) 和施氮 (b) 处理的长期不同施肥土壤微生物生物量氮含量

Fig. 2 Soil microbial biomass N in soils under different long-term fertilization managements without (a) or with (b) application of N during growth of wheat

### 2.3 氮肥对长期不同施肥土壤中作物氮素携出量和氮肥利用率的影响

在不施氮处理中, 小麦拔节期之前 NF、NPK 和 MNPK 土壤小麦氮素携出量差异显著 (图 3a), 其中 NPK 和 MNPK 土壤携出量分别为 NF 土壤的 4.4 倍和 12.2 倍; 从小麦拔节期到开花期不同土壤氮素携出量顺序仍为: MNPK > NPK > NF (图 3a), 两两之间差异显著; 从开花期到收获期 MNPK 和 NF 土壤小麦氮素携出量差异不显著, 均显著低于 NPK 处理氮的携出量。小麦全生育期 NF、NPK 和 MNPK 土壤中氮素携出量分别为  $44.1$ 、 $191.7$  和  $277.5 \text{ kg hm}^{-2}$  (图 3a)。

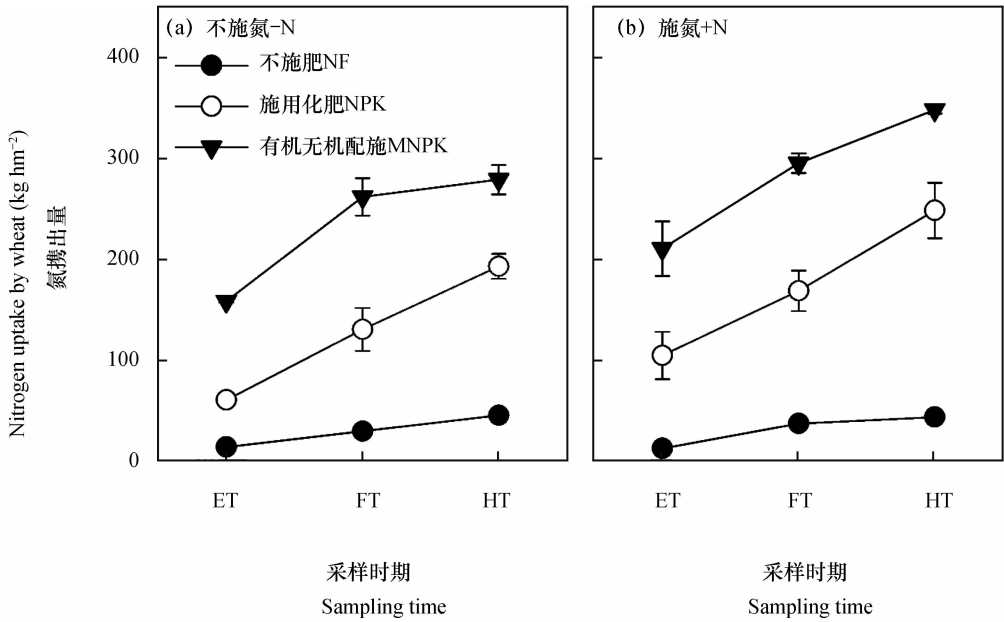
施氮处理显著增加了小麦拔节期 NPK 和 MNPK 土壤小麦氮素携出量, 对 NF 土壤的影响较小 (图 3b); 从拔节期到开花期阶段, MNPK 土壤中小麦携氮量显著高于 NPK 土壤, 两者分别为  $84.8$  和  $64.0 \text{ kg hm}^{-2}$ , NPK 土壤中小麦携氮量显著地高于 NF 土壤 ( $24.9 \text{ kg hm}^{-2}$ ) (图 3b); 从小麦开花期到收获期, NPK 土壤中氮携出量最大 ( $79.4 \text{ kg hm}^{-2}$ ), 其次为 MNPK 土壤 ( $52.8 \text{ kg hm}^{-2}$ ), NF 最低 ( $6.3 \text{ kg hm}^{-2}$ )。整个生育期 NF、NPK 和 MNPK 土壤氮携出量分别为  $42.6$ 、 $247.9$  和  $346.9 \text{ kg hm}^{-2}$ , 两两之间差异显著 (图 3b)。

在小麦生长期, 施用氮肥并没有增加 NF 土壤中小麦氮素携出量; 施氮使 NPK 和 MNPK 土壤中小麦氮素携出量分别增加  $56.2$  和  $69.4 \text{ kg hm}^{-2}$ , 占施入氮肥的 36% 和 45%, 两种土壤之间差异达显著水平 (图 4)。

与不施氮处理相比, 施氮显著增加 NF 土壤玉米携氮量, 增加的携氮量占施入氮素的 34%, 对 NPK 和 MNPK 处理土壤玉米携氮量的影响未达显著水平 (图 5)。

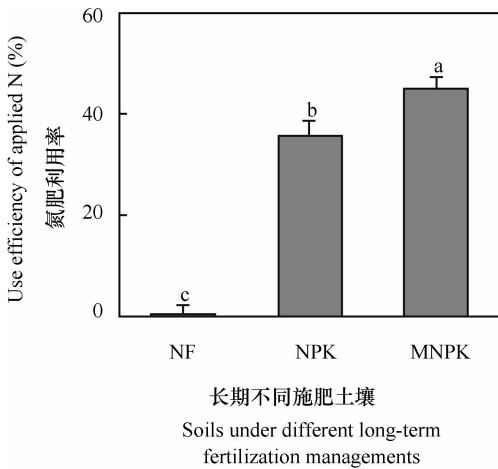
### 2.4 氮肥对长期不同施肥土壤中小麦及玉米产量和生物量的影响

长期不同施肥土壤比较, 无论施用氮肥与否, 小麦产量和生物量顺序均为 MNPK > NPK > NF, 两两间差异显著 (表 2)。施用氮肥对 NF 土壤小麦产量无显著影响, 而显著地提高 NPK 和 MNPK 土壤小麦产量和生物量, 其中籽粒产量分别增加了 28.7% 和 30.6%, 生物量分别提高了 25.2% 和 25.1% (表 2)。NPK 和 MNPK 土壤玉米产量和生物量显著高于 NF 土壤 (表 2); 施氮显著提高 NF 土壤玉米产量和生物量, 但对 NPK 和 MNPK 土壤玉米产量和生物量无显著影响 (表 2)。



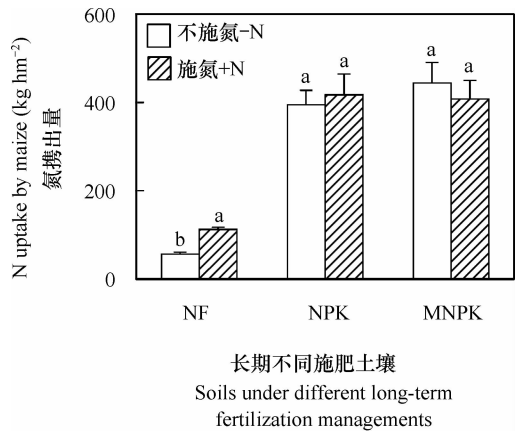
注: ET、FT、HT分别代表小麦拔节期、开花期、收获期 Note: ET, FT, and HT stands for elongating, flowering, and harvesting stage of wheat, respectively

图 3 不施氮 (a) 和施氮 (b) 处理的长期不同施肥土壤中小麦不同生长期氮素携出量  
Fig. 3 Nitrogen uptake by wheat in soils under different long-term fertilization managements without (a) or with (b) application of N during growth of wheat



注: NF、NPK、MNPK分别代表长期 (19 a) 不施肥、长期施用化肥、长期有机无机配施土壤 Note: NF, NPK, and MNPK stands for the soils under different long-term (19 years) fertilization treatments, i.e. no fertilization, mineral NPK fertilizers, and manure plus NPK fertilizers, respectively

图 4 长期不同施肥土壤小麦氮肥利用率  
Fig. 4 Applied N use efficiency of wheat in soils under different long-term fertilization managements



注: NF、NPK、MNPK分别代表长期 (19 a) 不施肥、长期施用化肥、长期有机无机配施土壤 Note: NF, NPK, and MNPK stands for the soils under different long-term (19 years) fertilization managements, i.e. no fertilization, mineral NPK fertilizers, and manure plus NPK fertilizers, respectively

图 5 不施氮和施氮处理的长期不同施肥土壤中玉米氮素携出量  
Fig. 5 Nitrogen uptake by maize in soils under different long-term fertilization managements without or with application of N

表 2 施氮和不施氮处理的长期不同施肥土壤小麦和玉米籽粒产量和生物量

Table 2 Grain yield and biomass of wheat and maize in soils under different long-term fertilization managements without or with application of N fertilizer

作物 Crop	试验土壤代码 Experiment soil code	产量 Yield (g plot <sup>-1</sup> )		生物量 Biomass (g plot <sup>-1</sup> )	
		不施氮处理 No application of N	施氮处理 Application of N	不施氮处理 No application of N	施氮处理 Application of N
		小麦 Wheat	NF	5.2 ± 0.3c	4.7 ± 0.7c
	NPK	27.9 ± 2.6b	35.9 ± 3.7b*	69.8 ± 2.6b	87.4 ± 6.9b*
	MNPK	38.2 ± 0.6a	49.9 ± 4.4a*	104.2 ± 8.6a	130.4 ± 6.8a*
玉米 Maize	NF	0.99 ± 1.3b	18.6 ± 0.7b*	47.5 ± 3.5b	76.8 ± 0.8b*
	NPK	103.4 ± 5.0a	106.1 ± 0.2a	322.0 ± 30.8a	320.9 ± 7.9a
	MNPK	111.0 ± 12.9a	105.1 ± 10.4a	332.8 ± 31.6a	308.2 ± 25.2a

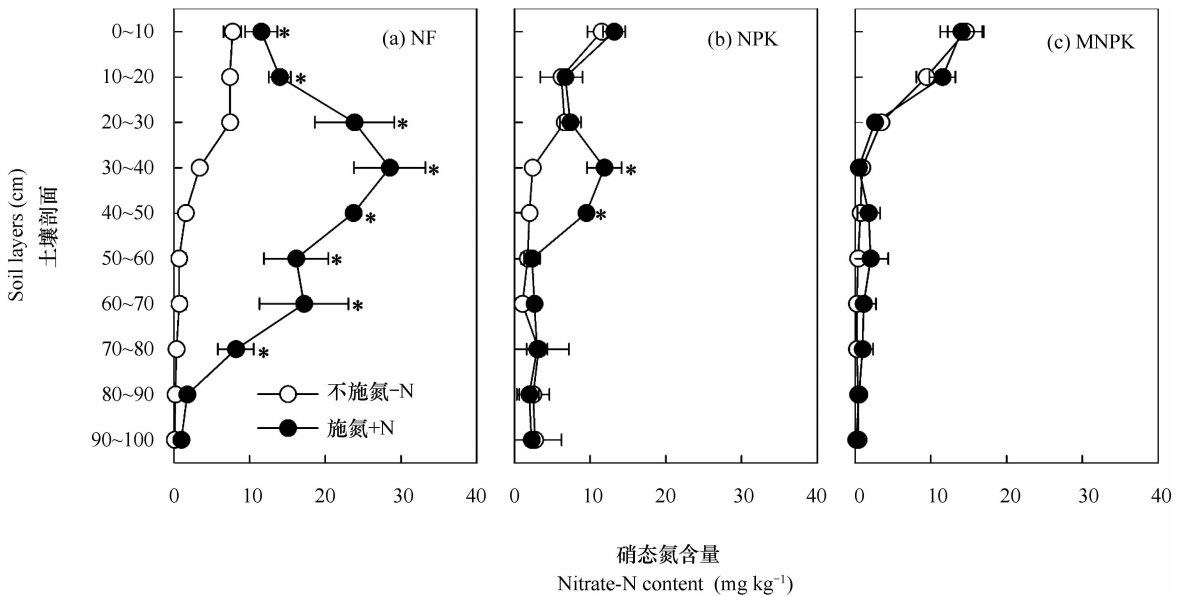
注:表中数据为平均值 ± 标准差 (n = 3)。同一列内不同小写字母 (p < 0.05), 同一行内带 \* 表示差异显著 (p < 0.05) Note: Values are means ± SD (n = 3). Values affixed with different lowercase letters within the same column and values with \* within the same line are statistically significant in difference at p < 0.05

2.5 氮肥对长期不同施肥土壤 0 ~ 100 cm 剖面硝态氮含量的影响

施用氮肥显著提高小麦收获期 NF 土壤 0 ~ 80 cm 土层硝态氮含量 (图 6a), 其中 30 ~ 40 cm 土层硝态氮含量最高为 28.5 mg kg<sup>-1</sup> (图 6a), 与不施氮肥处理相比, 提高了 25.1 mg kg<sup>-1</sup>。施用氮肥后 NPK 土壤 30 ~ 50 cm 土层硝态氮含量显

著高于未施氮处理 (图 6b)。施用氮肥对 MNPK 土壤 0 ~ 100 cm 剖面硝态氮含量无显著影响 (图 6c)。

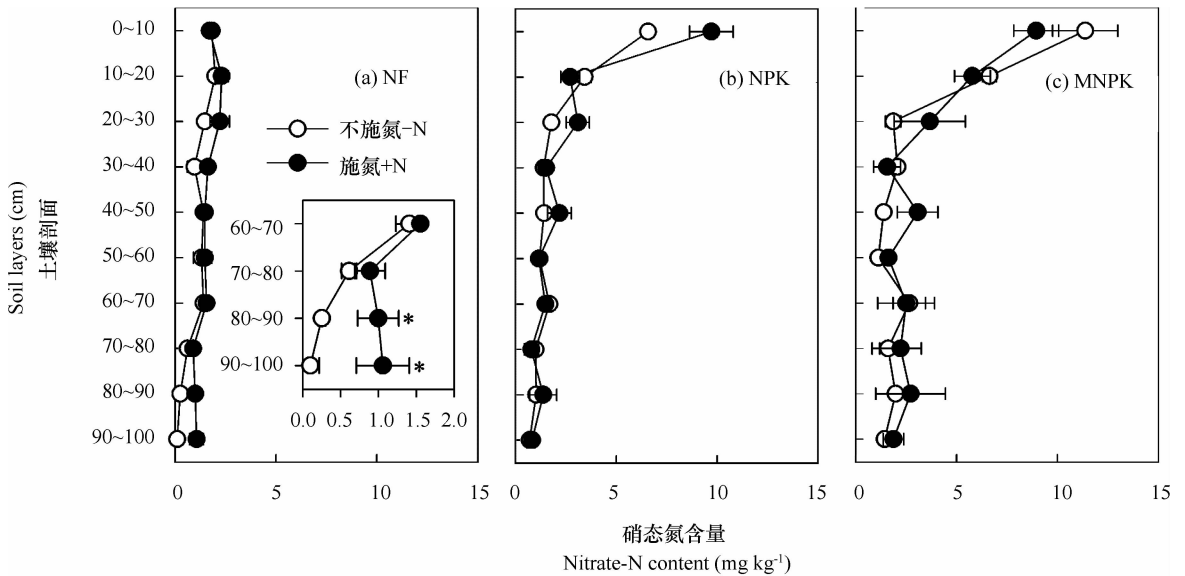
在玉米收获后, 施氮处理对 NPK 和 MNPK 土壤 0 ~ 100 cm 剖面硝态氮含量无显著影响, 但显著提高了 NF 土壤 80 ~ 90、90 ~ 100 cm 土层硝态氮含量 (图 7a)。



注: NF、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 Note: NF, NPK, and MNPK stands for soils under long-term (19 years) fertilization managements, i.e. no fertilization, mineral NPK fertilizers, and manure plus NPK fertilizers, respectively

图 6 小麦收获后施氮和不施氮处理的长期不同施肥土壤 0 ~ 100 cm 剖面硝态氮含量

Fig. 6 Nitrate N contents in profiles (0 ~ 100 cm) of soils under different long-term fertilization managements without or with application of N after harvesting wheat



注: NF、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 Note: NF, NPK, and MNPK stands for soils under long-term (19 years) fertilization managements, i.e. no fertilization, mineral NPK fertilizers, and manure plus NPK fertilizers, respectively

图7 玉米收获后不施氮和施氮处理的长期不同施肥土壤0~100 cm剖面硝态氮含量

Fig. 7 Nitrate N contents in profiles (0~100 cm) of soils under different long-term fertilization managements without or with application of N after harvesting maize

### 3 讨论

#### 3.1 长期不施肥土壤施氮后作物的氮素吸收与利用特性

NF处理土壤施用氮肥后对小麦及玉米生物量、籽粒产量及氮素吸收的影响有所不同。施用氮肥并没有提高NF土壤小麦生物量及籽粒产量,反而使小麦生物量显著降低,这可能是因为小麦生长期,养分供应的极度不平衡,有效磷含量成为小麦生长的限制因素<sup>[27]</sup>,影响了小麦前期的生长。与小麦不同,施用氮肥显著提高了NF土壤玉米的生物量及籽粒产量(表2),玉米的氮素携出量也显著增加(图5)。这可能是因为玉米生长期正值夏季,温度较高,并且在该地区玉米生长期降雨量较高,较高的温度和土壤含水量促进了土壤中有效磷等的释放<sup>[28]</sup>,从而促进小麦对氮素的吸收利用。

施用氮肥后NF处理土壤小麦收获后土壤0~80 cm剖面累积了大量的硝态氮(图6),而玉米收获后施氮处理土壤剖面硝态氮含量显著降低(图6,图7),除80~100 cm土层外,0~80 cm土层土壤硝态氮含量与未施肥对照无明显差异,玉米对小麦种植前所施氮肥的利用率为34%,说明小麦生长期累积在土壤剖面的硝态氮可以被下季玉米利用。

玉米生长季节较高的土壤温度及降雨量,增加了氮素的损失,也可能是玉米收获后土壤剖面硝态氮含量低的原因之一。

#### 3.2 长期有机无机肥配施土壤施氮后在协调土壤氮素固持与供应方面的作用

国内外大量研究表明,有机无机肥长期配合施用显著提高土壤有机质<sup>[22,29]</sup>、可矿化态氮含量<sup>[30]</sup>和土壤微生物量<sup>[22]</sup>及其活性<sup>[31-33]</sup>。一些短期田间<sup>[18]</sup>和盆栽试验<sup>[12,34]</sup>报道,施入有机物料后土壤微生物固持氮素增多,土壤矿质氮含量降低,减少了作物对氮素的吸收。如Choi等<sup>[12]</sup>研究表明,玉米生长60 d后,单施尿素处理肥料利用率为39%~50%,而在尿素与猪粪配施后,尿素氮的利用率降低至33%~40%。本研究表明,与长期施用NPK处理土壤相比,无论施氮与否,长期有机肥与化肥配合施用处理(MNPK)土壤小麦生物量、籽粒产量及氮素携出量显著增加,施氮处理中氮肥的利用率也显著增加。这与有机肥与化肥长期配施,协调了土壤碳氮供应,有利于土壤养分的平衡供应,同时改善土壤物理性质等因素有关<sup>[35]</sup>。

从小麦生长期土壤矿质氮含量及土壤微生物生物量氮含量的动态变化看(图1和图2),MNPK土壤中微生物对氮素的固持与释放在协调土壤氮素平衡方面具有重要作用。在小麦拔节期,施用氮

肥后 NPK 和 MNPK 的 SMBN 含量显著高于不施氮处理(图 2),这说明在 NPK 和 MNPK 土壤中微生物固持了部分所施入的氮肥。从拔节期到开花期,施氮处理中 NPK 和 MNPK 处理土壤微生物生物量氮含量显著降低,MNPK 的 SMBN 降低量为  $82.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ,显著高于 NPK 处理的 SMBN 降低量( $57.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ),说明在这一阶段微生物固持的氮被释放出来供旺盛生长的作物吸收利用。以上仅仅从土壤矿质氮含量及土壤微生物生物量氮含量的动态变化方面,分析了土壤微生物氮素在协调土壤氮素平衡方面的作用,尚需采用 $^{15}\text{N}$ 法准确评价这一处理在小麦生长期对施入氮肥的固持与释放的数量。

施用氮肥显著增加了 NPK 和 MNPK 处理土壤小麦氮素携出量(图 3),而对玉米的氮素携出量无显著影响(图 5),这是因为在小麦生长季这两个土壤中氮肥的利用率较高,残留在土壤中的氮素大部分以有机氮形态存在<sup>[36]</sup>,难以被下季作物吸收利用。Sorensen 等<sup>[37]</sup>和 Macdonald 等<sup>[36]</sup>研究表明,下季作物对残留氮素的利用率仅为 6% 左右。施用氮肥显著增加小麦收获后 NPK 处理土壤 30 ~ 50 cm 剖面的硝态氮含量(图 6),而对玉米收获后土壤剖面硝态氮含量没有影响(图 7)。小麦或玉米收获后,施氮对 MNPK 处理土壤剖面硝态氮含量无影响(图 6 及图 7),说明有机肥与化肥长期配施协调了氮素供应,降低了氮肥的淋溶作用。其他定位试验也表明,长期施用有机物料减少了硝态氮的淋失<sup>[38-39]</sup>。

## 4 结 论

与长期未施肥土壤及仅施化肥处理(NPK)土壤相比,有机肥与化肥长期配施处理(MNPK)土壤协调了土壤碳、氮平衡关系,提高土壤对氮肥的缓冲能力,显著提高了施用氮肥的利用率,降低了氮肥在土壤剖面的淋溶作用,其中土壤微生物对氮素的固持与释放,是有机肥与化肥长期配施处理土壤协调土壤氮素保持与供应的重要机理。由于所处生长期环境条件的差异,施用氮肥对长期不同施肥处理土壤的小麦及玉米产量及氮素吸收利用特性存在差异;长期不施肥土壤及施用化肥处理土壤小麦收获后累积在土壤剖面的硝态氮可以被玉米吸收利用,因此,有必要从轮作周期角度综合考虑土壤氮素调控技术。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Mulvaney R L, Khan S A, Ellsworth T R. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(6): 2 295—2 314
- [ 2 ] Khan S, Mulvaney R, Ellsworth T, et al. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(6): 1 821—1 832
- [ 3 ] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2): 117—127
- [ 4 ] Ju X, Liu X, Zhang F, et al. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China. *Ambio*, 2004, 33: 300—305
- [ 5 ] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Pans*, 2009, 106(9): 3 041—3 046
- [ 6 ] Drinkwater L E, Snapp S S. Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm. *Advances in Agronomy*, 2007, 92: 163—186
- [ 7 ] Gentile R, Vanlauwe B, Chivenge P, et al. Interactive effects from combining fertilizer and organic residue inputs on nitrogen transformations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2 375—2 384
- [ 8 ] Chivenge P, Vanlauwe B, Six J. Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 2011, 324: 1—30
- [ 9 ] Yevdokimov I V, Blagodatsky S A. Nitrogen immobilization and remineralization by microorganisms and nitrogen uptake by plants: interactions and rate calculations. *Geomicrobiology Journal*, 1993, 11(3): 185—193
- [ 10 ] Zhou J B, Li S X, Chen Z J. Soil microbial biomass nitrogen and its relationship to uptake of nitrogen by plants. *Pedosphere*, 2002, 12(3): 251—256
- [ 11 ] Sugihara S, Funakawa S. Dynamics of microbial biomass nitrogen in relation to plant nitrogen uptake during the crop growth period in a dry tropical cropland in Tanzania. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(1): 105—114
- [ 12 ] Choi W J, Jin S A, Lee S M, et al. Corn uptake and microbial immobilization of $^{15}\text{N}$ -labeled urea-N in soil as affected by composted pig manure. *Plant and Soil*, 2001, 235(1): 1—9
- [ 13 ] Choi W J, Ro H M, Chang S X. Recovery of fertilizer-derived inorganic- $^{15}\text{N}$  in a vegetable field soil as affected by application of an organic amendment. *Plant and Soil*, 2004, 263(1): 191—201
- [ 14 ] 吴成龙, 沈其荣, 夏昭远, 等. 麦-稻轮作系统有机无机肥料配施协同氮素转化的机制研究 I. 小麦季 $^{15}\text{N}$ 去向分析. *土壤学报*, 2010, 47(5): 905—912. Wu C L, Shen Q R, Xia Z Y, et al. Mechanisms for the increased utilization of fertilizer N under integrated use of inorganic and organic fertilizers in a winter



- wheat-rice rotation system I. Fate of fertilizer<sup>15</sup>N during winter wheat growing stages (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 905—912
- [15] Herai Y, Kouno K, Hashimoto M, et al. Relationships between microbial biomass nitrogen, nitrate leaching and nitrogen uptake by corn in a compost and chemical fertilizer-amended regosol. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(2): 186—194
- [16] Choi W, Lee S, Han G, et al. Available organic carbon controls nitrification and immobilization of ammonium in an acid loam-textured soil. *Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 2006, 49(1): 28—32
- [17] Goyal S, Mishra M M, Hooda I S, et al. Organic matter-microbial biomass relationships in field experiments under tropical conditions: Effects of inorganic fertilization and organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(11): 1 081—1 084
- [18] Mansson K, Bengtson P, Falkengren-Grerup U, et al. Plant-microbial competition for nitrogen uncoupled from soil C:N ratios. *Oikos*, 2009, 118(12): 1 908—1 916
- [19] Palm C, Giller K, Mafongoya P, et al. Management of organic matter in the tropics: Translating theory into practice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61(1): 63—75
- [20] Gong W, Yan X, Wang J, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in North China Plain. *Plant and Soil*, 2009, 314(1): 67—76
- [21] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub>O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11): 2 037—2 045
- [22] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2): 121—128
- [23] Wang Q L, Bai Y H, Gao H W, et al. Soil chemical properties and microbial biomass after 16 years of no-tillage farming on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 2008, 144(3): 502—508
- [24] Šimon T. The influence of long-term organic and mineral fertilization on soil organic matter. *Soil and Water Research*, 2008, 3(2): 41—51
- [25] 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 and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837—842
- [26] 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 agriculture chemistry analysis(In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [27] Zhao B Q, Li X Y, Li X P, et al. Long-term fertilizer experiment network in china: Crop yields and soil nutrient trends. *Agronomy Journal*, 2010, 102(1): 216—230
- [28] Saleque M A, Abedin M J, Bhuiyan N I. Effect of moisture and temperature regimes on available phosphorus in wetland rice soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(9/10): 2 017—2 023
- [29] Ma L, Yang L Z, Xia L Z, et al. Long-term effects of inorganic and organic amendments on organic carbon in a paddy soil of the Taihu Lake region, China. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 186—196
- [30] 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): 1 182—1 189. 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): 1 182—1 189
- [31] Chu H, Lin X G, Fujii T, et al. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2 971—2 976
- [32] Nayak D R, Babu Y J, Adhya T K. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical Aeric endoaquept planted to rice under flooded condition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 1 897—1 906
- [33] 陈梅生, 尹睿, 林先贵, 等. 长期施有机肥与缺素施肥对潮土微生物活性的影响. *土壤*, 2009, 41(6): 957—961. Chen M S, Yi R, Lin X G, et al. Effects of organic manure or mineral fertilizer application on microbial activity in a sandy loam soil(In Chinese). *Soils*, 2009, 41(6): 957—961
- [34] Sørensen P, Jensen E S. Mineralization-immobilization and plant uptake of nitrogen as influenced by the spatial distribution of cattle slurry in soils of different texture. *Plant and Soil*, 1995, 173(2): 283—291
- [35] Palm C A, Myers R J K, Nandwa S M. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment//Buresh R J, Sanchez P A, Calhoun F. Replenishing soil fertility in Africa. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America & American Society of Agronomy, 1997: 193—217
- [36] Macdonald A, Poulton P, Stockdale E, et al. The fate of residual<sup>15</sup>N-labelled fertilizer in arable soils: Its availability to subsequent crops and retention in soil. *Plant and Soil*, 2002, 246(1): 123—137
- [37] Sørensen P. Immobilisation, remineralisation and residual effects in subsequent crops of dairy cattle slurry nitrogen compared to mineral fertiliser nitrogen. *Plant and Soil*, 2004, 267(1/2): 285—296
- [38] Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(2): 401—422
- [39] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 等. 长期施肥对壤土硝态氮分布、累积和移动的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 134—138. Yang X Y, Zhang S L, Yuan X M, et al. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of NO<sub>3</sub>-N in soil(In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2): 134—138

## EFFECTS OF N APPLICATION ON N CONTENT AND N UPTAKE BY CROPS IN SOILS UNDER DIFFERENT LONG-TERM FERTILIZATION MANAGERMENTS IN WHEAT-MAIZE ROTATION SYSTEM

Liang Bin<sup>1,2</sup> Zhao Wei<sup>1,2</sup> Yang Xueyun<sup>1,2</sup> Zhou Jianbin<sup>1,2†</sup>

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract** The microplot method was used to compare soils under different long-term (19 years) fertilization treatments i. e. NF (no fertilizer); NPK (inorganic NPK fertilizer) and MNPK (manure plus inorganic NPK fertilizer) in retention, crop uptake, and leaching of applied N. Results show that application of N significantly increased mineral N in the soil of Treatment NF, but had no such effect in the soils of Treatments NPK and MNPK. However, it increased soil microbial biomass N (SMBN) by 4.3 and 0.8 times in the soils of Treatments NPK and MNPK at the elongating stage of wheat, but did not in the soil of Treatment NF. From the elongating stage to the flowering stage, soil microbial biomass N in the soils of Treatments NPK and MNPK dropped by 51% and 56%. In Treatments NPK and MNPK, the crop of wheat used up 36% and 45%, respectively, of applied N, while in Treatment NF, wheat rarely absorbed any of the applied N, of which 34% was used up by the subsequent maize. By the time when wheat was harvested more than 50% of the applied N had been leached into the soil layers below 30 cm in Treatment NF, and a significant portion into the 30 ~ 50 cm soil layer in Treatment NPK, but little down the soil profile in Treatment MNPK. The findings demonstrate that long-term combined application of manure and NPK is an effective way of fertilization management that could strengthen N buffer capacity of the soil, harmonize the relationship between soil N retention and crop N uptake demand, improve N use efficiency and minimize the risk of environment pollution.

**Key words** Long-term fertilization; Mineral N; Soil microbial biomass N; N uptake; N use efficiency