

DOI: 10.11766/trxb201604180641

# 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性\*

王西娜<sup>1, 2</sup> 王朝辉<sup>1†</sup> 李 华<sup>1</sup> 王荣辉<sup>1</sup> 谭军利<sup>1, 3</sup> 李生秀<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 宁夏大学农学院, 银川 750021)

(3 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021)

**摘 要** 氮素是作物生长最重要的必需元素之一。合理施用氮肥能促进作物生长并提高产量, 但是, 过多施用氮肥则抑制作物生长并导致大量的肥料氮残留在土壤中, 这部分氮素不但会引起土壤养分不平衡, 而且为生态环境带来潜在威胁, 因此, 研究残留氮的动向及作物有效性可为合理施用化肥氮、高效利用土壤残留氮素和减少残留氮素的损失提供依据。应用<sup>15</sup>N示踪技术, 通过4年定位试验, 研究了黄土高原南部旱地冬小麦/夏玉米轮作过程中土壤残留肥料氮的变化及作物吸收利用。在冬小麦和夏玉米轮作的第一个周期, 为了制造高肥料氮残留背景, 于冬小麦播种前向微区施入 240 kg hm<sup>-2</sup>的<sup>15</sup>N标记氮素; 在夏玉米拔节期, 为了研究氮肥施入对残留肥料氮的影响, 设置0和 120 kg hm<sup>-2</sup>两个氮水平, 以普通尿素施入微区。在第2至第4个轮作周期内, 为了分析残留肥料氮的动向及其对作物的有效性, 微区内不施任何肥料。结果发现, 冬小麦播种前施用的<sup>15</sup>N标记氮肥于收获期在0~200 cm土壤剖面中均有残留, 但大部分累积在0~40 cm土层中, 累积总量达到200.9 kg hm<sup>-2</sup>, 占当季施入量的83.7%。在随后的夏玉米生长季残留的肥料氮迅速减少, 之后随生长季的后移缓慢减少, 然后保持相对稳定。经过4年的冬小麦/夏玉米轮作, 0~300 cm土壤剖面仍残留大量的<sup>15</sup>N肥料, 后季不追施氮肥和追施氮肥处理的残留量分别为47.1 kg hm<sup>-2</sup>和54.0 kg hm<sup>-2</sup>。可见, 有一部分肥料氮被固定在土壤有机质中。作物对残留氮的回收量逐年减少, 且因后季追施氮肥与否而异, 4年中作物对肥料氮的总利用率不追施氮肥和追施氮肥处理的分别为46.9%和50.4%, 其中在第1个轮作周期中, 小麦和玉米的总利用率分别41.6%和42.0%, 后3年利用率分别仅有5.3%和8.4%; 4年中残留<sup>15</sup>N的损失率分别达38.1%和29.7%, 其损失主要发生在第1个轮作周期的夏玉米生长季节。说明, 在旱地土壤上, 氮肥的残留是不可避免的, 残留肥料氮的有效性较低, 只有少量被作物逐年吸收, 一部分以有机形态残留在土壤剖面中, 另一部分发生了无效损失。后季追施氮肥可促进作物对土壤残留肥料氮的吸收且增加肥料氮在土壤中的保留, 减少残留肥料氮的无效损失, 但是以自身的大量损失为代价的。

**关键词** 旱地土壤; <sup>15</sup>N示踪; 残留肥料氮; 作物有效性; 氮素损失

**中图分类号** S138.3 **文献标识码** A

氮素不但是作物生长的必需营养元素, 而且是一种非常活跃的元素。过量施用氮肥, 超出作物的吸收能力和土壤固持能力, 会造成土壤养分失衡、

氮素损失、生态环境污染等一系列问题。氮肥施入到土壤后通常有3个去向: (1) 被作物吸收, 即氮肥的当季利用率; (2) 残留在土壤中; (3) 通过

\* 国家自然科学基金项目(31460546)、现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3-1-31)和国家公益性行业(农业)科研专项(201303104)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31460546), Modern Agricultural System of Industrial Technology Construction Funds (No. CARS-3-1-31) and the Special Fund for Agroscentific Research in the Public Interest (No. 201303104)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: w-zhaohui@263.net

作者简介: 王西娜(1978—), 女, 陕西华阴人, 博士, 副教授, 主要从事农田土壤氮素循环转化及生态环境效应研究。

E-mail: eunicexina-w@163.com.

收稿日期: 2016-04-18; 收到修改稿日期: 2016-06-02; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-06-17

不同机制和途径损失<sup>[1]</sup>。其中，残留在土壤中的肥料氮既是土壤氮库的一部分，可供后季作物吸收利用或转化成土壤有机氮，又可通过淋溶、地表径流、反硝化损失及氨挥发等途径进入到水体和大气中，威胁生态环境安全<sup>[2]</sup>。因此，这部分氮是氮素养分资源管理中必须重视的部分<sup>[3]</sup>。如何最大限度地减少残留氮素的损失、提高作物对这部分氮素的利用已成为土壤和植物营养学家亟待解决的问题<sup>[4]</sup>。

残留肥料氮会直接参与土壤氮素的循环和转化，其在土壤中的存在形态会影响其作物有效性及损失程度。Vos等<sup>[5]</sup>和Jensen等<sup>[6]</sup>发现施入土壤的肥料氮只有一小部分以矿质态氮存在于土壤中，大部分以不同的有机氮形式残留于土壤。潘家荣等<sup>[7]</sup>通过<sup>15</sup>N示踪试验发现，以有机结合态存在的肥料氮所占比例随施氮量的增高而降低。Kuldip和Goh<sup>[8]</sup>对冬小麦和黑麦草的研究显示，氮素的当季回收率为20%~87%，10%~35%保留在土壤中，1%~35%可能通过淋溶、反硝化和氨挥发损失掉了；冬小麦和黑麦草对<sup>15</sup>N的总回收率分别为52%和41%；从作物—土壤系统损失的<sup>15</sup>N分别为12%和35%；保留在0~400 mm土壤中的<sup>15</sup>N分别为36%和24%。第二季作物固持的残留肥料氮通常很低（1%~10%），且随后季作物连作年限的增加而下降。土壤残留肥料氮被后季作物回收的比例因土壤质地而异。Macdonald等<sup>[9]</sup>发现，冬小麦、冬油籽葡萄、土豆、春大豆和甜菜根对残留<sup>15</sup>N的回

收率均以粉砂质黏壤土>砂质壤土>灰质壤土>重壤土，但回收率均低于15%。可见，施入土壤中的氮素除了被作物吸收外，相当一部分残留于土壤剖面中，逐年损失或转化成有机形态，只有少部分被后季作物吸收利用。

本研究利用<sup>15</sup>N示踪技术，经过4年冬小麦/夏玉米轮作田间定位试验，探索了肥料氮在旱地土壤中的残留、分布及其对后季作物生长的贡献，讨论了残留肥料氮的损失情况，为高效利用残留肥料氮、减少旱地土壤残留氮素的损失和提高其利用率提供理论依据，进而为氮肥的合理施用提供理论保障。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2003年10月至2007年10月在陕西杨凌西北农林科技大学节水灌溉试验站进行。该地处于渭河三级阶地，年平均气温13℃，年均降水量600mm左右，60%以上集中在7—9月，属半湿润易旱地区。从2002年6月至2007年9月，试验地区夏玉米生长季节和冬小麦生长季节的降水量见图1。土壤类型为红油土，属普通垫旱耕人为土，试验地表层土壤（0~20 cm）基本理化性状为：容重为1.31 g cm<sup>-3</sup>，pH 8.25，有机质9.63 g kg<sup>-1</sup>，全氮1.07 g kg<sup>-1</sup>，速效磷12.2 mg kg<sup>-1</sup>，速效钾182.4 mg kg<sup>-1</sup>。

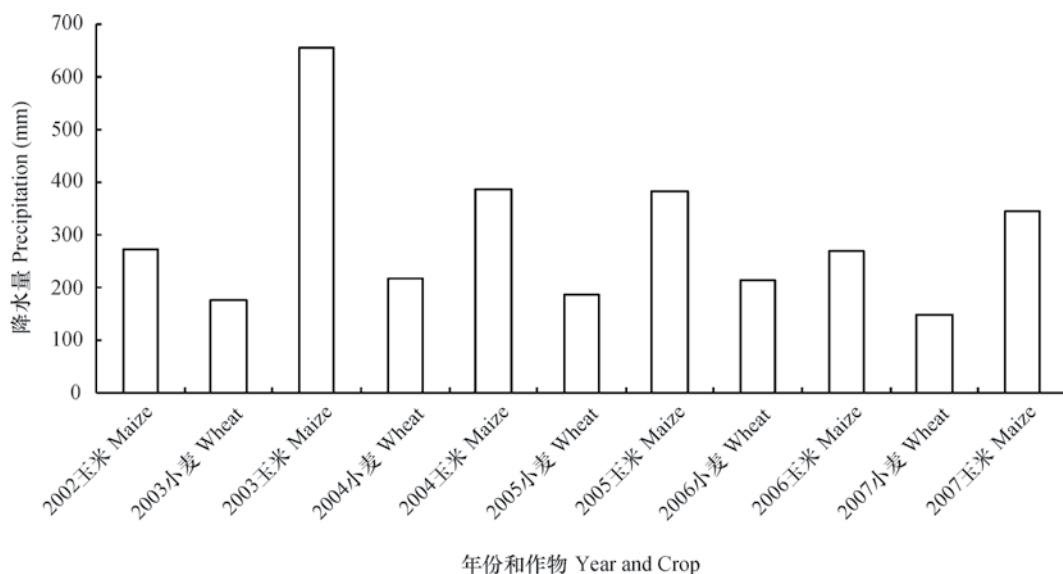


图1 2002—2007年冬小麦和夏玉米生长季的降水量

Fig. 1 Precipitation during the winter wheat and summer maize growing seasons of the six years from 2002 to 2007

## 1.2 试验设计

微区试验以冬小麦/夏玉米为轮作系统, 进行长期定位试验。共设2个处理:  $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120-^{14}\text{N}0$ 和 $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0-^{14}\text{N}0$ , 前者表示2003年冬小麦播种前向微区施丰度10%的 $^{15}\text{N}$ 标记尿素13.04 g (合每公顷氮240 kg), 2004年夏玉米拔节期追施普通尿素(施氮量为120 kg  $\text{hm}^{-2}$ ), 2004年10月—2007年10月冬小麦/夏玉米轮作中不施任何肥料; 后者表示2003年冬小麦播种前向微区施丰度10%的 $^{15}\text{N}$ 标记尿素13.04 g (合每公顷氮240 kg), 2004年夏玉米生长季节不追施尿素, 2004年10月—2007年10月冬小麦/夏玉米轮作中不施任何肥料。每处理重复3次。微区面积为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} = 0.25\text{ m}^2$ , 微区周围用镀锌无底铁框与周围小区隔开, 铁框埋深20 cm, 上沿露出地面10 cm。

## 1.3 测定项目与方法

土壤全氮和植物全氮采用凯氏蒸馏定氮法。土壤和植物体 $^{15}\text{N}$ 丰度用稳定性同位素质谱仪测定(赛默-菲尼根MAT253, 德国; 热电-菲尼根MAT253, 美国)。

## 2 结果

### 2.1 土壤剖面中残留肥料氮的年际变化

从图2和表1发现, 在施肥当季的冬小麦收获期, 0~200 cm土层均有 $^{15}\text{N}$ 的残留, 总量达到200.9 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 残留率达83.7%。其中0~20 cm土层的达到82.4 kg  $\text{hm}^{-2}$ ; 20~40 cm和40~60 cm土层分别为59.1 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和13.7 kg  $\text{hm}^{-2}$ ; 60~200 cm各土层的 $^{15}\text{N}$ 残留量较少, 在2.9~10.4 kg  $\text{hm}^{-2}$ 之间。

在施 $^{15}\text{N}$ 肥后的第一季夏玉米生长季节, 微区设两个氮水平: 一个不追施氮肥( $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$ ), 另一个于拔节期追施普通尿素氮120 kg  $\text{hm}^{-2}$ ( $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$ )。结果发现, 收获期土壤剖面中残留的 $^{15}\text{N}$ 均迅速减少, 0~300 cm土层 $^{15}\text{N}$ 总量分别为34.3 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和51.5 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 其中0~40 cm土层的 $^{15}\text{N}$ 残留量分别为27.3 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和40.4 kg  $\text{hm}^{-2}$ 。可见, 该季节土壤中残留的肥料氮迅速减少, 但追施氮肥在一定程度上减缓了残留肥料氮的减少程度。

在第二季小麦收获期(2005年6月),  $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$ 和 $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$ 两处理之间的残留肥料氮数量无明显差异。0~300 cm土壤剖面中 $^{15}\text{N}$ 总残留量分别为39.4 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和38.5 kg  $\text{hm}^{-2}$ ;  $^{15}\text{N}$ 分布仍

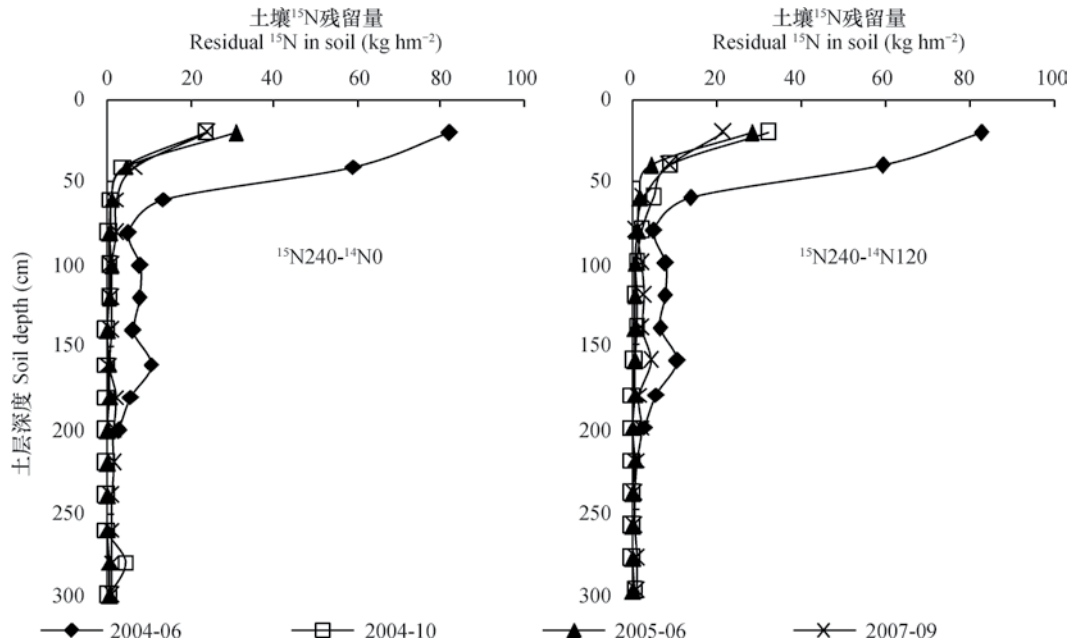
以0~20 cm土层的最高, 分别为30.69 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和28.05 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 其次为20~40 cm土层, 40~300 cm土层的在0~1 kg  $\text{hm}^{-2}$ 之间波动。

再经过两年的冬小麦/夏玉米轮作(2007年9月), 0~100 cm土层的 $^{15}\text{N}$ 数量保持相对稳定,  $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$ 和 $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$ 处理的分别为36.6 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和36.0 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 100~200 cm和200~300 cm土层中 $^{15}\text{N}$ 总残留量均较两年前有所增加(表1), 可能是残留在土壤中的作物残体(如根系和凋落物等)分解矿化、释放肥料氮到土壤中的缘故。同时, 大多数残留氮仍累积在0~40 cm土层, 累积量分别为30.7 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和30.8 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 分别占总残留量的65.2%和57.0%。

可见, 旱地冬小麦/夏玉米轮作体系中, 冬小麦播种前施用的氮肥在0~200 cm土壤剖面中均有残留, 但大部分累积在0~40 cm土层中, 并且在随后的夏玉米生长季迅速减少, 之后随生长季的后移, 土壤中残留的肥料氮保持相对稳定。经过4年的冬小麦/夏玉米轮作, 0~300 cm土壤剖面, 尤其0~40 cm土层中仍残留大量的 $^{15}\text{N}$ 肥料, 说明有一部分肥料氮被固定在土壤有机质中。同时, 后季施用氮肥可在一定程度上减缓当季土壤残留肥料氮的降低程度。

### 2.2 作物不同器官对残留肥料氮的吸收利用

从图3看到, 随着生长季的后延, 作物秸秆和籽粒对土壤残留 $^{15}\text{N}$ 的吸收利用逐渐减少。在施 $^{15}\text{N}$ -尿素的当季, 小麦籽粒中累积的 $^{15}\text{N}$ 达到62.1 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 秸秆累积量为15.5 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 分别占总吸收量的80.1%和19.9%。在施 $^{15}\text{N}$ 肥的后一季, 玉米对 $^{15}\text{N}$ 的吸收量远小于前季的小麦, 未追施普通尿素和追施普通尿素时 $^{15}\text{N}$ 总吸收量分别仅有22.2 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和23.3 kg  $\text{hm}^{-2}$ ; 秸秆和籽粒吸收量分别占总吸收量的46.1%和53.9%、42.2%和57.8%。在第二季冬小麦收获后(2005年6月), 两处理的差异较大,  $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$ 处理秸秆和籽粒的 $^{15}\text{N}$ 累积量分别为0.6 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和2.6 kg  $\text{hm}^{-2}$ ,  $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$ 处理的分别为5.8 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和5.4 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 可能是后者播前土壤中残留 $^{15}\text{N}$ 较多的缘故。2005年夏玉米收获后, 玉米秸秆和籽粒对残留 $^{15}\text{N}$ 的吸收利用进一步降低, 两处理的吸收总量分别仅有2.0 kg  $\text{hm}^{-2}$ 和2.6 kg  $\text{hm}^{-2}$ 。至2006年小麦收获期, 小麦籽粒对残留 $^{15}\text{N}$ 的吸收有所增加, 两处理的吸收量均为4.4 kg  $\text{hm}^{-2}$ , 占总吸收量的84.9%和81.9%。从2006年



注： $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$ 和 $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$ 分别表示在2003年冬小麦播种前向所有微区施入 $^{15}\text{N}$ 标记氮素 $240\text{ kg hm}^{-2}$ ，在2004年夏玉米拔节期前者不追施普通氮素，后者追施普通氮素 $120\text{ kg hm}^{-2}$ 。下同 Note:  $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$  and  $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$  means that  $240\text{ kg hm}^{-2}$  of nitrogen was applied in the form of  $^{15}\text{N}$ -labelled urea in all the plots before winter wheat was sown in 2003, and in the following summer maize season in 2004, the plots were divided into two groups applied with 0 and  $120\text{ kg hm}^{-2}$  of ordinary nitrogen, separately, at the prolonging stage of the crop. The same below

图2 残留 $^{15}\text{N}$ 在土壤剖面中的分布及变化

Fig. 2 Distribution and variation of residual  $^{15}\text{N}$  in the 0 ~ 300 cm soil profile

表1 不同土层 $^{15}\text{N}$ 的累积量

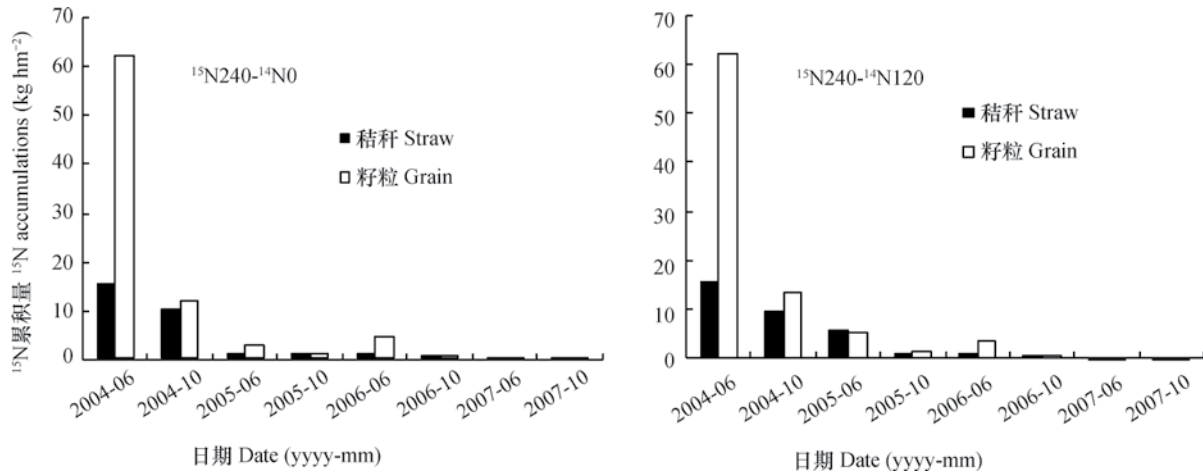
Table 1 Accumulation of  $^{15}\text{N}$  in different soil layers ( $\text{kg hm}^{-2}$ )

土层深度 Soil depth (cm)	$^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$				$^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$			
	2004-06	2004-10	2005-06	2007-10	2004-06	2004-10	2005-06	2007-10
0 ~ 40	141.4	27.3	34.8	30.7	141.4	40.4	32.2	30.8
0 ~ 100	167.9	28.9	36.9	36.0	167.9	47.9	35.4	36.6
0 ~ 200	200.8	29.6	38.1	42.1	200.8	50.6	37.7	49.2
0 ~ 300	—	34.3	39.3	47.1	—	51.0	38.5	54.0
100 ~ 200	32.9	0.7	1.1	6.1	32.9	2.7	2.3	12.6
200 ~ 300	—	4.7	1.3	5.0	—	0.5	0.8	4.8

注：“—”表示无数据，由于200~300cm土层的土壤未采集 Notes: “—” means that there was no data available because the soil in the 200 ~ 300 cm soil layers was not sampled

至2007年的夏玉米—冬小麦—夏玉米，作物对残留 $^{15}\text{N}$ 的吸收量又逐渐降低，秸秆和籽粒的吸收量均小于 $1\text{ kg hm}^{-2}$ 。

可见，在冬小麦/夏玉米轮作体系中，残留肥料氮对作物的有效性很小，且逐年降低，最多只能维持3年。

图3 作物不同部位对<sup>15</sup>N的累积量Fig. 3 <sup>15</sup>N accumulation in different parts of the crops

### 2.3 植物体内肥料氮与总氮比值

表2结果显示, 作物对肥料氮的吸收比例小于对土壤氮的吸收, 并且随着季节后延, 作物对肥料氮的吸收比例逐渐降低。在施<sup>15</sup>N标记肥的当季, 冬小麦吸收肥料氮的比例为36.4%, 而从土壤中的吸收量达到63.6%。在施<sup>15</sup>N标记肥的第2季, <sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N0和<sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N120处理的玉米对残留肥料氮的吸收比例分别为22.5%和20.0%。进一步说明当季施用的氮肥阻止了作物对上季残留肥料氮的吸收。

至第3季冬小麦, <sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N0处理小麦吸收的残留<sup>15</sup>N的比例仅有3.1%, <sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N120处理的吸收比例则达到9.1%, 可能因为后者小麦播前土壤中残留了较多的<sup>15</sup>N。至第4季的夏玉米和第5季的冬小麦, 两处理的作物对残留<sup>15</sup>N的吸收已无显著差异。之后, 作物对残留<sup>15</sup>N的吸收比例进一步降低, 而对土壤氮素的吸收达到了98%以上。说明, 残留在根区内的大部分<sup>15</sup>N已被固定到土壤有机质中, 很难被后季作物利用。

可见, 氮肥对作物生长的促进作用不一定是直接增加了作物对氮肥的吸收, 而是促进了土壤氮素的矿化, 增加了作物对土壤自身氮素的吸收。

### 2.4 肥料氮在土壤-植物体系的平衡

从表3发现, 在施肥当季, 冬小麦地上部对氮肥的利用率仅有32.3%, 70%的肥料氮残留在0~100 cm土体中。这是因为冬小麦生长季节干旱少雨, 土壤水分处于潜在蒸发状态, 所以未被作物吸收的氮素不容易发生淋溶损失而残留在上层土

壤中。在2004年的夏玉米生长季节, <sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N0和<sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N120两处理作物对<sup>15</sup>N标记肥的利用率分别仅有9.3%和9.7%; 同时, 土壤残留<sup>15</sup>N亦迅速减少, 但<sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N120处理土壤的<sup>15</sup>N残留量高于<sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N0处理, 两者相差8%; 然而, 该季节损失量急剧升高, <sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N0和<sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N120处理分别达到111.3 kg hm<sup>-2</sup>和91.4 kg hm<sup>-2</sup>, 损失率前者较后者高8.3%。可见, 氮肥的损失主要发生在施肥当年的夏玉米生长季。原因是该季节降水多而集中(图1), 氮素易发生淋溶和挥发损失。同时, 该季节追施的氮肥在一定程度上可以减少残留<sup>15</sup>N的损失, 但作用很小, 并且可能是以自身的大量损失为代价的。

在第二季冬小麦生长季节, 作物对<sup>15</sup>N的吸收量、土壤中<sup>15</sup>N的残留量和<sup>15</sup>N损失量均因前季追施普通氮肥与否而异。对于未追肥处理(<sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N0), 作物对<sup>15</sup>N的吸收量仅有3.6 kg hm<sup>-2</sup>, 利用率只有1.5%; 但土壤残留<sup>15</sup>N则较前季有所增加, 这是土壤中根系分解使<sup>15</sup>N进入到土壤的结果, 加之该季节土壤氮素本来就不易损失, 因此, 土壤氮素反而有所增加。对追施普通氮肥的处理(<sup>15</sup>N240-<sup>14</sup>N120), 作物对残留<sup>15</sup>N的吸收量较未追肥处理高7.6 kg hm<sup>-2</sup>; 土壤中<sup>15</sup>N残留量较前季减少12.5 kg hm<sup>-2</sup>; <sup>15</sup>N损失量基本不变。在之后的两年半内, 两处理作物对残留氮素的总利用率均仅有3.8%, 残留率分别为15%和19%; 损失量分别减少了8.2 kg hm<sup>-2</sup>和21.4 kg hm<sup>-2</sup>。可见, 在停止施肥的前三年内, 作物对残留氮素的吸收利用能力非常

表2 作物吸收肥料氮与总氮的比值

年份 Year	作物 Crop	$^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$				$^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$			
		总氮 Total N ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	肥料氮 Fertilizer N ( $^{15}\text{N}$ , $\text{kg hm}^{-2}$ )	肥料氮/总氮 Fertilizer N/Total N ( $^{15}\text{N}/\text{TN}$ , %)	土壤氮/总氮 Soil N/Total N ( $^{14}\text{N}/\text{TN}$ , %)	总氮 Total N ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	肥料氮 Fertilizer N ( $^{15}\text{N}$ , $\text{kg hm}^{-2}$ )	肥料氮/总氮 Fertilizer N/Total N ( $^{15}\text{N}/\text{TN}$ , %)	土壤氮/总氮 Soil N/Total N ( $^{14}\text{N}/\text{TN}$ , %)
2004	冬小麦 Winter wheat	212.9	77.5	36.4	63.6	212.9	77.5	36.4	63.6
	夏玉米 Summer maize	99.0	22.2	22.5	77.5	116.1	23.2	20.0	80.0
2005	冬小麦 Winter wheat	114.8	3.6	3.1	96.9	123.4	11.2	9.1	90.9
	夏玉米 Summer maize	49.1	2.0	4.0	96.0	61.9	2.6	4.2	95.8
2006	冬小麦 Winter wheat	102.5	5.2	5.1	94.9	91.2	4.4	4.9	95.1
	夏玉米 Summer maize	62.6	1.2	1.9	98.1	59.8	1.1	1.8	98.2
2007	冬小麦 Winter wheat	94.3	0.4	0.5	99.5	112.6	0.5	0.4	99.6
	夏玉米 Summer maize	38.8	0.4	1.0	99.0	47.1	0.5	1.0	99.0
	总量 Sum	774	113	14.5	85.5	825	121	14.7	85.3

表3 肥料氮在土壤-植物体系的平衡

处理 Treatment	植物吸收Plant uptake		土壤残留Residue in soil (0~100 cm)			总回收 Total recovery		损失Loss	
	日期 Date (yyyy-mm)	吸氮量 $^{15}\text{N}$ uptake ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	利用率 $^{15}\text{N}$ use efficiency (%)	残留量 Residual $^{15}\text{N}$ ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	残留率 $^{15}\text{N}$ residual efficiency (%)	回收量 Recovery ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	回收率 $^{15}\text{N}$ recovery rate (%)	损失量 Loss ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	损失率 Loss rate (%)
$^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$	2003-10~2004-06	77.5	32.3	167.9	70.0	245.4	102.3	0.0	0.0
	2004-06~2004-10	22.2	9.3	28.9	12.0	51.1	53.6	111.3	46.4
	2004-10~2005-06	3.6	1.5	36.9	15.4	40.5	58.4	99.7	41.6
	2005-06~2007-10	9.2	3.8	36.0	15.0	45.2	61.9	91.5	38.1
	2003-10~2007-10	112.5	46.9	36.0	15.0	148.5	61.9	91.5	38.1
$^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$	2003-10~2004-06	77.5	32.3	167.9	70.0	245.4	102.3	0.0	0.0
	2004-06~2004-10	23.2	9.7	47.9	20.0	71.1	61.9	91.4	38.1
	2004-10~2005-06	11.2	4.7	35.4	14.8	46.6	61.4	92.6	38.6
	2005-06~2007-10	9.1	3.8	47.8	19.9	56.8	70.3	71.2	29.7
	2003-10~2007-10	121.0	50.4	47.8	19.9	168.8	70.3	71.2	29.7

小，作物生长季节几乎无氮素损失，土壤中的残留氮素也保持相对稳定。说明，一部分氮素进入到土壤有机质中被固定下来。

从2003年10月至2007年10月的总平衡来看， $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}0$ 和 $^{15}\text{N}240-^{14}\text{N}120$ 处理作物对 $^{15}\text{N}$ 的总利用率分别为46.9%和50.4%，土壤残留率分别为15%和19%，损失率分别为38.1%和29.7%。损失的氮素可能有两个去向：一部分仍然以根系、凋落物等形式保留在土壤中，一部分被淋溶到深层土壤，还有一部分以气态形式挥发。可见，在干旱半干旱地区，氮肥的累积利用率只有50%左右，而且大部分被当季作物吸收利用。后季追肥在一定程度上可以促进作物对土壤残留氮素的吸收及肥料氮在土壤中的保留，减少残留肥料氮的无效损失。

### 3 讨论

#### 3.1 肥料氮的残留及损失

作物吸收的氮素主要来自土壤自身氮素和肥料氮两个方面，并且在很大程度上依赖于土壤氮素<sup>[10-12]</sup>，因此，氮肥在土壤中的残留是不可避免的，它是扩充土壤氮库和提高土壤供氮能力的主要途径。肥料氮残留量往往随施氮量的增加而增加，因此，这部分氮素并非要完全控制，而是通过调控施肥量将其控制在合理的范围之内，以最大程度减少其挥发损失和淋溶损失。本研究结果发现，冬小麦播种前施用的 $^{15}\text{N}$ 标记氮肥在0~200 cm土壤剖面中均有残留，但大部分累积在0~40 cm土层中，N累积总量可达到200.9 kg hm<sup>-2</sup>，占施入量的83.7%；经过4个轮作周期后残留率为15.0%~19.9%。该结果进一步说明，过量施氮是导致肥料氮大量残留的主要原因。残留肥料氮在土壤中的形态直接影响其动向和有效性。研究证明，长期施用化学氮肥，能显著提高初级矿化-同化周转速率，激发自养硝化作用和氨氧化菌的活性<sup>[13]</sup>，促进土壤氮素矿化<sup>[14-17]</sup>，使土壤中的矿质态氮含量显著增加<sup>[17-18]</sup>，这部分氮素包括土壤氮素矿化释放出来的和肥料氮分解释放的。因此，弄清氮肥施用对土壤氮素矿化的激发作用有多大以及土壤能够固持多少肥料氮这两个问题是调控氮肥用量、提高残留肥料氮利用率和减少氮素损失的根本。

#### 3.2 残留肥料氮对后季作物的有效性

残留肥料氮对后季作物的有效性较低，经过

连续4年的冬小麦/夏玉米轮作，作物对肥料氮的总利用率仅有50%左右，而施肥当季小麦的利用率为32.3%，后续玉米的利用率仅有不到10%，后3年利用率仅10%左右。这与前人的研究结果<sup>[19]</sup>相似。Corbeels等<sup>[20]</sup>通过 $^{15}\text{N}$ 标记微区试验发现，冬小麦季施氮肥100 kg hm<sup>-2</sup>时，收获期有69.2%残留于90 cm以上土壤剖面中，0.8%残留在麦茬中；而后季向日葵对肥料氮的回收率仅有3.6%。Sieling等<sup>[21]</sup>研究了不同氮肥处理残留氮素对油菜、小麦和大麦的影响，发现残留氮对三种作物的效果均以第一年最大，并随年份增加而减少；从氮素平衡考虑，残留氮对作物氮素吸收的影响水平很低，在未施肥的前三年内，各作物只利用了剩余氮素的3%。可见，残留在土壤中的肥料氮对作物的有效性很低，大部分损失掉或以有机形态存在。

#### 3.3 残留肥料氮的损失

残留在土壤剖面中的肥料氮一部分会逐年发生损失，其损失主要发生在第一个夏玉米生长季。原因可能是该季节降雨多而温度高，残留氮素易发生淋溶和损失<sup>[22]</sup>，尤其是大量硝态氮遇到强降雨会发生反硝化损失<sup>[13]</sup>。同时，追施氮肥在一定程度上可以促进作物对残留氮素的吸收，减少残留 $^{15}\text{N}$ 的损失，这可能是肥料的“激发效应”所致<sup>[14-16, 19]</sup>，但减少程度很小，并且是以自身的大量损失为代价的，因为该季节施氮120 kg hm<sup>-2</sup>和240 kg hm<sup>-2</sup>的氮肥表观利用率分别仅有22.4%和3.9%<sup>[17]</sup>。可见，氮肥对当季作物和后季作物生长的促进作用不一定是直接增加了作物对肥料氮的吸收，而是激发了土壤氮素的矿化，增加了作物对土壤自身氮素的吸收。

### 4 结论

在冬小麦/夏玉米轮作的黄土高原南部旱地土壤中，肥料氮的当季残留率高达80%以上，并且可以淋溶到2 m以下。残留肥料氮主要以有机形态存在于土壤中，对后季作物的有效性较低。氮肥的损失主要发生在多雨的夏玉米生长季，该季节追施氮肥在一定程度上可以促进作物对前季残留 $^{15}\text{N}$ 的吸收并减少其损失，但是以自身的大量损失为代价的。

#### 参考文献

- [1] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析. 中国农业科学, 2002, 35



- (12): 1493—1499  
 Ju X T, Liu X J, Zou G Y, et al. Evaluation nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (12): 1493—1499
- [ 2 ] 王朝辉, 李生秀, 王西娜, 等. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究. *土壤*, 2006, 38 (6): 676—681  
 Wang Z H, Li S X, Wang X N, et al. Nitrate nitrogen residue and leaching in dryland soil and influence factors (In Chinese). *Soils*, 2006, 38 (6): 676—681
- [ 3 ] 张福锁, 巨晓棠. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识. *土壤学报*, 2002, 39 (增刊): 41—55  
 Zhang F S, Ju X T. Discussion on nitrogen management and environment in agro-ecosystems of sustained development of agriculture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (Suppl): 41—55
- [ 4 ] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China. *Plant and Soil*, 2011, 342 (1/2): 221—231
- [ 5 ] Vos G J M, Bergevoet I M J, Védý J C, et al. The fate of spring applied fertilizer N during the autumn-winter period: Comparison between winter-fallow and green manure cropped soil. *Plant and Soil*, 1994, 160 (2): 201—213
- [ 6 ] Jensen L S, Christensen L, Mueller T, et al. Turnover of residual <sup>15</sup>N-labelled fertilizer N in soil following harvest of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*, 1997, 190 (2): 193—202
- [ 7 ] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 高肥力土壤冬小麦/夏玉米轮作体系中心化氮去向研究. *核农学报*, 2001, 15 (4): 207—212  
 Pan J R, Ju X T, Liu X J, et al. Fate of fertilizer N in winter wheat/summer maize rotation system on high-fertility soil (In Chinese). *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2001, 15 (4): 207—212
- [ 8 ] Kudip K, Goh K M. Recovery of <sup>15</sup>N-labelled fertilizer applied to winter wheat and perennial ryegrass crops and residual <sup>15</sup>N recovery by succeeding wheat crops under different crop residue management practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 62: 123—130
- [ 9 ] Macdonald A J, Poulton P R, Stockdale E A, 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
- [ 10 ] George S, Legg J O, Smith S J. Soil nitrogen availability evaluations based on nitrogen mineralization potentials of soils and uptake of labeled nitrogen by plants. *Plant and Soil*, 1973, 39 (1): 113—124
- [ 11 ] Reddy K R, Patrick W H. Uptake of fertilizer nitrogen and soil nitrogen by rice using <sup>15</sup>N-labelled nitrogen fertilizer. *Plant and Soil*, 1980, 57 (2): 375—381
- [ 12 ] Shabaev V. The effect of cropping and fertilizer nitrogen rates on nitrogen balance soil. *Plant and Soil*, 1986, 91 (2): 249—256
- [ 13 ] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 292—304  
 Wang J, Cheng Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A Review (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 292—304
- [ 14 ] Ayaka Y, Ryunosuke T, Hideaki S. Effects of carbon and nitrogen amendment on soil carbon and nitrogen mineralization in volcanic immature soil in southern Kyushu Japan. *Journal of Forest Research*, 2011, 16: 414—423
- [ 15 ] Xiao Y L, Tu L H, Chen G, et al. Soil-nitrogen net mineralization increased after nearly six years of continuous nitrogen additions in a subtropical bamboo ecosystem. *Journal of Forest Research*, 2015, 26 (4): 949—956
- [ 16 ] Chen C R, Xu Z H, Hughes J M. Effects of nitrogen fertilization on soil nitrogen pools and microbial properties in a hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantation in southeast Queensland, Australia. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36 (4): 276—283
- [ 17 ] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12 (6): 759—764  
 Wang X N, Wang Z H, Li S X. Soil nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system on dryland of Loess Plateau (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12 (6): 759—764
- [ 18 ] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 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. *土壤学报*, 2012, 49 (4): 748—756  
 Liang B, Zhao W, Yang X Y, et al. Effects of N application on N content and N uptake by crops in soils under different long-term fertilization management in wheat-maize rotation systems (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (4): 748—756
- [ 19 ] Tomio Y, Benjamin C P. Transformation of soil and fertilizer nitrogen in paddy soil and their availability to rice plants. *Plant and Soil*, 1977, 47 (1): 113—123

- [20] Corbeels M, Hofman G, van Cleemput O. Residual effect of nitrogen fertilisation in a wheat-sunflower cropping sequence on a Vertisol under semi-arid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 1998, 9: 109—116
- [21] Sieling K, Brase T, Svib V. Residual effects of different N fertilizer treatments on growth, N uptake and yield of oilseed rape, wheat and barley. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25 (1): 40—48
- [22] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响. *生态学报*, 2007, 27 (1): 197—204
- Wang X N, Wang Z H, Li S X. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water-nitrogen dynamics (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (1): 197—204

## Dynamics and Availability to Crops of Residual Fertilizer Nitrogen in Upland Soil

WANG Xina<sup>1, 2</sup> WANG Zhaohui<sup>1†</sup> LI Hua<sup>1</sup> WANG Ronghui<sup>1</sup> TAN Junli<sup>1, 3</sup> LI Shengxiu<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

(3 Civil and Hydraulic School, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract** 【Objective】 Nitrogen is one of the most important and essential elements for growth of crops. Reasonable application of nitrogen fertilizer may promote crop growth and increase its yield, while excessive N fertilization may not only inhibit crop growth, but also leave a large amount of fertilizer nitrogen (N) in the soil as residue, which disturbs balance of soil nutrients and poses a potential threat to the ecological environment. So, it is necessary to study dynamics and availability to crops of the residual N to provide a theoretical basis for rationalizing N fertilization, improving N use efficiency and reducing fertilizer N loss. 【Method】 To that end, a 4-year stationary field experiment was carried out on a winter wheat and summer maize rotation system, using <sup>15</sup>N-tracing technique. During the first cycle of the winter wheat and summer maize rotation, 240 kg hm<sup>-2</sup> of nitrogen was applied in the form of <sup>15</sup>N-labelled urea in all the plots before winter wheat was sown, in order to make a background of high N residual, and in the following summer maize season, the plots were divided into two groups applied with 0 and 120 kg hm<sup>-2</sup> of ordinary urea, separately, at the prolonging stage of the crop to explore effect of N fertilizer application on fertilizer N residue in the soil. During the following three cycles of the rotation, no N fertilizer was applied for analysis of dynamic and availability to the crops of the residual fertilizer N in the soil. 【Result】 Results show that residue of the <sup>15</sup>N-labelled N fertilizer that was applied before sowing of winter wheat during the first cycle of the rotation, was found throughout the whole soil profiles of 0 ~ 200 cm, after the crop was harvested, and most of that accumulated in the 0 ~ 40 cm soil layers. The residue amounted to 200.9 kg hm<sup>-2</sup> in total, accounting for 83.7% of the total N fertilizer applied. In the subsequent summer maize growth season, the amount of residual fertilizer N first dropped rapidly, and then declined slowly with the season going on, and eventually leveled off. After for 4 years of rotation, still a considerable amount of <sup>15</sup>N was found in the 0 ~ 300 cm soil profile, reaching 47.1 kg hm<sup>-2</sup> and 54.0 kg hm<sup>-2</sup>, respectively, in the plots where no or 120 kg hm<sup>-2</sup> N fertilizer was applied to summer maize during the first circle of the rotation. Obviously a part of the fertilizer N was fixed by organic matter in the soil. The recovery rate of residual N by the crop decreased gradually year by years, but the rate varied differed between the two treatments. The total N use efficiency of four years was 46.9% and 50.4%, respectively, in the plots with or without N sidedressing for maize. The total N use efficiency of

the winter wheat and summer maize was 41.6% and 42.0%, respectively, in the first year of the rotation, and only 5.3% and 8.4% in the remaining 3 years. During the four years, about 38.1% and 29.7% of the residual fertilizer N was lost, respectively, in the two treatments, with or without N sidedressing, and the loss occurred mainly in the first summer maize growing season. **【Conclusion】** It indicates that some of the fertilizer N applied in upland would inevitably remain in the soil as residue, and this part of residual fertilizer N is low in availability to crops, and has a limited portion being gradually taken up by crops in the late 3 years, a portion remaining in the form of organic N, and the other turning unavailable and lost. Sidedressing of N fertilizer in the summer maize season may promote crop uptake of residual fertilizer N in the soil, while retaining more residual fertilizer, and consequently it reduces the loss of residual N. However, all the effects are attained at the cost of high loss of the N fertilizer per se. Therefore, it is advisable to take into account fertilizer N in the soil when making plans for N fertilizer application.

**Key words** Upland soil;  $^{15}\text{N}$ -tracing; Residual fertilizer N; Availability to crop; N loss

(责任编辑: 陈荣府)