

# 黄土旱塬黑垆土—冬小麦系统中尿素氮的去向及增产效果\*

党廷辉<sup>1</sup> 蔡贵信<sup>2†</sup> 郭胜利<sup>1</sup> 郝明德<sup>1</sup> 郭明航<sup>1</sup> 王百群<sup>1</sup>

(1 中国科学院水土保持研究所, 杨凌 712100)  
水 利 部

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要** 在黄土高原南部旱塬区陕西省长武县的黑垆土上, 用田间小区和<sup>15</sup>N 微区试验研究了氮肥的增产效果, 水分利用率以及尿素氮的去向。结果表明, 氮肥的增产效果随氮肥用量增加而降低, 施 N 量为 100 和 150kg hm<sup>-2</sup> 时每 kg 肥料 N 分别增产小麦 12.1kg 和 6.4kg。施用氮肥亦提高了水分利用率, 无氮区和施肥区的水分利用率分别为 7.6kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> 和 9.7~10.5kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>。<sup>15</sup>N 微区试验结果表明, 尿素作基肥混施入耕层后, 小麦利用率为 36.6%~38.4%, 土壤残留率为 29.2%~33.6%, 标记氮肥在土壤剖面中的残留率随土层深度的加深而迅速降低。小麦吸收的氮素来自肥料氮的比例在 33%~40% 之间, 来自土壤氮素的比例在 60% 以上。

**关键词** 尿素氮去向, 冬小麦, 黑垆土, 增产效果, 水分利用率

**中图分类号** S143.1, 512.1

对农田系统中氮肥的去向、特别是损失程度和途径, 以及减少损失、增加效益的对策研究, 一直受到国内外学者的广泛关注。国内的有关研究很多<sup>[1]</sup>, 但多数集中在南方稻田和东北、华北、东北小麦、玉米等有灌溉的作物上。在黄土旱塬冬小麦作物上研究甚少。黑垆土是黄土高原旱区普遍分布的一种古老农业土壤, 冬小麦又是南部旱区主要的粮食作物。至今, 关于黑垆土—冬小麦中氮肥去向的研究还未见报道。为此, 我们在陕西省长武县的黑垆土上应用<sup>15</sup>N 示踪法研究了尿素施入土壤后的去向, 同时结合田间小区试验观测氮肥的增产效果和水分利用效率, 为氮素的科学管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况与土壤性质

试验布置在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站。位于黄土高原中南部的陕甘交界处陕西长武县境内, 北纬 35°12', 东经 107°40', 海拔 1200m 的塬地上。年日照时数 2226h, 年均气温 9.1℃, 全年

\* 国际原子能机构项目(CPR9986)、国家攻关项目(96-004-05)及中国科学院重大项目(KZ951-A1-301)和特别支持项目(KZ95T-04-01)资助

† 通讯作者

收稿日期: 2000-07-10; 收到修改稿日期: 2001-05-23

$\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温 $3029^{\circ}\text{C}$ , 年均降水 $584\text{mm}$ , 无霜期 $171$ 天, 属大陆季风型半湿润易旱气候区。农业生产全部依赖天然降水, 属典型的旱作农业区, 一年一熟, 冬小麦是当地的主要作物。土壤为黑垆土, 前作春玉米。土壤耕层 $0\sim 20\text{cm}$ 理化性质为: 有机质 $10.6\text{g kg}^{-1}$ , 全氮 $0.8\text{g kg}^{-1}$ , 碱解氮 $67.6\text{mg kg}^{-1}$ , 速效磷 $14.4\text{mg kg}^{-1}$ , 速效钾 $146\text{mg kg}^{-1}$ , 容重 $1.3\text{g cm}^{-3}$ , 田间持水量 $26.6\%$ , 凋萎湿度 $9.2\%$ ,  $< 0.01\text{mm}$ 物理性粘粒 $37.0\%$ ,  $\text{pH}8.4$ 。

## 1.2 试验设计和方法

试验设四个处理, 采用拉丁方设计。四个处理是: CK、N1、N10 和 N2。CK 指对照即不施氮肥, N 代表尿素, O 代表有机肥(含 N  $0.347\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $0.299\%$ )。N1 施 N  $100\text{kg hm}^{-2}$ 。N10 处理施尿素 N  $100\text{kg hm}^{-2}$ , 同时施有机肥 N  $50\text{kg hm}^{-2}$ 。N2 施 N  $150\text{kg hm}^{-2}$ 。全部氮肥作基肥于播种前施入。各处理均以磷肥(重过磷酸钙)为底,  $\text{P}_2\text{O}_5$  用量  $75\text{kg hm}^{-2}$ 。

设小区和微区两组试验。小区面积  $6\text{m} \times 7\text{m}$ , 微区面积  $0.4\text{m} \times 0.5\text{m}$ 。微区设置于对应的小区中。 $^{15}\text{N}$  微区框用白铁皮制成, 长  $0.5\text{m}$ , 宽  $0.4\text{m}$ , 高  $0.6\text{m}$ , 无底。将微区埋入土中  $55\text{cm}$ , 露出地面  $5\text{cm}$ 。埋设微区时, 力求不破坏微区框中土壤。小区和微区的施肥、播种等管理措施同大田一致。

供试冬小麦为当地主栽品种 89-134。1998 年 9 月 24 日播种, 1999 年 6 月 24 日收获。播种量  $188\text{kg hm}^{-2}$ , 种子用包衣剂处理。微区施用尿素的 $^{15}\text{N}$  丰度为  $7.06\%$ , 由上海化工研究院生产。所有肥料都作基肥混施入耕层。

## 1.3 小区和 $^{15}\text{N}$ 微区的收获、采样与分析

将每个小区靠近中间的 8 行全部收获。风干、脱粒后分别称籽粒和秸秆重, 然后换算成单位面积产量。

将微区内表层土壤松动, 连同根系将小麦整株拔出, 把粒、茎叶和根分别装入不同的纸袋。之后依次取出  $0\sim 10$ 、 $10\sim 20\text{cm}$  全部土壤, 称重。混匀后用四分法取出分析用土样, 同时取样测定土壤水分。然后用土钻采集  $20\sim 40\text{cm}$  土层 5 点土样, 混匀后供化学分析和水分测定。土样风干磨细后全部过 100 目筛。植物样(根、茎、粒)于  $70^{\circ}\text{C}$  烘干称重后磨细。土壤和植物样品均由国际原子能机构(IAEA)统一分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 氮肥增产效果

该研究是在施磷肥的基础上研究氮肥的增产效果。表 1 表明, 对照(CK)产量为每  $\text{hm}^2$   $2.77\text{t}$ 。施氮肥三个处理的产量显著高于对照, 增产约  $1\text{t}$  或更多。处理 N1, N10 和 N2 的产量分别为每  $\text{hm}^2$   $3.99$ ,  $4.3$  和  $3.73\text{t}$ , 比对照增产  $43.7\%$ ,  $54.9\%$  和  $34.6\%$ 。尽管三个处理的产量之间其差异在统计上未达到显著水准, 但处理 N10 的产量略高于 N1, 后者又高于 N2。从氮肥的经济效益即每  $\text{kg}$  肥料氮增加小麦产量来看, 处理 N1, N10 和 N2 分别为  $12.1$ ,  $10.2$  和  $6.4\text{kg}$ , 处理 N1 比 N2 几乎高出一倍。而处理 N2 却比 N1 和 N10 的秸秆重高了  $1\text{t}$  多, N2 的秸秆/谷粒质量比( $1.96$ )也比其他两个施氮处理高  $0.4$  以上。这是由于小麦生育期间气候干旱(降水量为  $242\text{mm}$ , 常年平均降水量为  $288\text{mm}$ ), 氮肥肥效受到限制, 高氮处理(N2)比低氮处理(N1)贪青晚熟, 故 N2 处理生物产量增加而籽实产量下降。因此, 在比较干旱的年份, 该地区的化学氮肥用量似以不超过纯 N  $100\text{kg hm}^{-2}$  为宜。过去的研究表明, 该地区作物产量一般随降水量增加而增加, 化学氮肥的效果也随降水量而变化, 干旱年不利于氮肥效果的发挥, 而在特大干旱年只施氮肥时反而减产<sup>[2]</sup>。另外, 干旱

年施用有机肥有利于增加经济产量,本试验处理 N10 比 N2 多增产小麦 20%,少增加秸秆 20%。

表 1 氮肥的增产效果

Table 1 Effect of N fertilizer on wheat yield

处理 Treatment	小麦产量 Grain yield (t hm <sup>-2</sup> )	增产 Yield increase (%)	肥料氮增产 Productivity index (kg kg <sup>-1</sup> )	秸秆重 Straw weight (t hm <sup>-2</sup> )	增加 Increase (%)	秸秆重/谷粒重 W( Straw)/ W( Grain)
CK	2.77b			5.64b		2.03
N1	3.99a	43.7	12.1	6.17ab	9.4	1.55
N10	4.30a	54.9	10.2	6.24ab	10.6	1.45
N2	3.73a	34.6	6.4	7.33a	30	1.96

注:用新复极差法统计,同一列中字母相同者其差异未达到 5% 显著水准。

## 2.2 水分利用效率

土壤水分是土壤肥力的基本要素之一,也是作物的主要营养物质。我国北方黄土旱塬地区,地下水深 30~ 50m,降水是农业生产中惟一的水分来源。作物利用土壤水分一是靠土壤中储存的水分,二是靠降水。根据作物播种和收获时土壤水分含量的变化(图 1)可以计算出土壤耗水量。表 2 表明,在小麦生长期,0~ 3m 土壤耗水量在 124~ 166mm 之间。小麦生长期间降水量为 242mm,故作物总耗水量为 366~ 408mm。由表 2 数据计算出对照区的水分利用率为 7.6kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>,施氮肥后增加至 9.7~ 10.5kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>(表 2)。以往该地区的研究结果<sup>[3]</sup>表明,不施肥时水分利用率低至 2.6~ 6.5kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>,合理施肥能显著提高水分利用率,最高(氮磷和有机肥配合施用)可达 13kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>。河南封丘雨养麦田试验上获得的结果更高,良好施肥条件下其水分利用率在 11~ 17kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>之间<sup>[4]</sup>。

表 2 水分利用效率

Table 2 Efficiency of water use

处理 Treatment	土壤耗水				降水量 Rainfall (mm)	作物总耗水 Total consumption (mm)	小麦产量 Grain yield (kg hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率 WUE (kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )
	0~ 1m	1~ 2m	2~ 3m	0~ 3m				
CK	41.3	74.5	8.6	124	242	366	2 775	7.6
N1	59.9	76.6	13.7	150	242	392	3 986	10.2
N10	65	77.5	23.1	166	242	408	4 299	10.5
N2	52.5	70.2	22	145	242	387	3 734	9.7

由表 2 计算出,本试验中小麦利用的水分 58%~ 66% 来自降雨,34%~ 42% 来自土壤

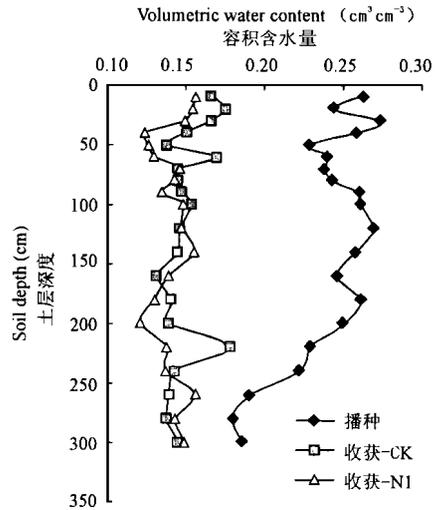


图 1 小麦播种和收获时的土壤容积含水量

Fig. 1 Soil volumetric water content at sowing and harvesting

中储存的水分。与小麦播种时相比,收获时土壤水分降低了许多(图 1),但各处理间水分含量差异不大。结果(表 2,图 1)还表明,该雨养农业地区 1~2m 下层土壤水分对小麦供水的贡献(占 0~3m 土壤供水量的 47%~60%)比 0~1m 上层土壤的贡献(占 0~3m 土壤供水量的 33%~40%)还大。党廷辉<sup>[3]</sup>的研究表明,施用磷肥可增加作物对深层水的利用。

### 2.3 标记尿素氮的去向

表 3 表明,旱塬冬小麦上尿素作基肥混施时其利用率为 36.6%~38.4%,土壤残留率为 29.2%~33.6%,总回收率为 65.8%~70.5%,故亏缺在 29.5%~34.2% 之间。用新复极差法统计结果表明,低氮用量(N1)、化学氮肥与有机肥配施(N10)以及高氮用量(N2) 3 个处理之间,尿素氮的作物吸收利用率,肥料氮在土壤中的残留率以及亏缺都没有显著差异。但结果似乎有这样的趋势,随着化肥用量增大肥料利用率降低而亏缺增多;化肥与有机肥配施时其利用率略降低而土壤残留率略增加。

表 3 标记尿素氮的去向(占施氮量的%)

Table 3 Fate of labeled urea N (% of applied N)

处理 Treatment	小麦吸收 Plant recovery	土壤残留 Recovery in soil (0~40cm)	总回收 Total recovery	亏缺 Defect
N1	38.4a	31.8a	70.2a	29.8
N10	36.9a	33.6a	70.5a	29.5
N2	36.6a	29.2a	65.8a	34.2

注:用新复极差法统计,同一列中字母相同者其差异未达到 5% 显著水准。

肥料氮的去向与作物种类、土壤类型、肥料用量、施肥方法及时期密切相关<sup>[9]</sup>。表 4 汇总了几种土壤上尿素作基肥施用于冬小麦上的氮素去向。本试验氮肥利用率比其他几种土壤略低,而土壤残留率略高,氮素损失则相差不大。由于在计算土壤残留率时一般采集的土壤深度不会很深,故实际残留率应比表上列出的数据高。看来,尿素作基肥施用于冬小麦上的氮肥利用率约为 40%,土壤残留率和肥料氮损失各为 30% 左右。

表 4 不同土壤冬小麦上尿素氮去向的比较

Table 4 Comparison of fate of urea N applied to winter wheat in different soils

土壤 Soil	处理 Treatment	施用量 N application rate (kg hm <sup>-2</sup> )	小麦吸收 Plant recovery (%)	土壤残留 Recovery in soil (%)	损失 N loss (%)	文献 Literature
黑垆土	基肥混施	100	38.4	31.8	29.8	本试验
	基肥混施	150	36.6	29.2	34.2	
黄潮土	施基肥后灌水	180	44.9	26.4	28.7	[6]
潮土	基肥条施	75	39.4	22.7	37.9	[7]
沙土	基肥	100	42.7	20.7	36.5	[8]

2.3.1 尿素氮在小麦各部分的分配 冬小麦吸收的尿素氮占施入氮的 36.6%~38.4%,其中地上部分积累的氮量占施入氮的 32.3%~34.5%,地下部分(根)积累氮量占施入氮的 3.9%~4.3%(表 5)。吸收的尿素氮分配在小麦籽粒与茎叶中数量相当,各占

总吸收尿素氮的 44.3% ~ 45.8% 和 44.0% ~ 44.7%; 而分配在根中占总吸收尿素氮的 10.2% ~ 11.7%。与过去报道的吸收的肥料氮分配在籽粒最多, 茎叶次之, 根中很少的结果<sup>[9-11]</sup> 不尽相同。

表 5 冬小麦各组成部分吸收的标记尿素氮量

Table 5 Recovery of labeled urea N in different components of winter wheat

处理 Treatment	籽粒 Grain (%)	茎叶 Straw (%)	根 Root (%)	全株 Total Plant (%)	地上部分 Aerial parts (%)
N1	17.6	16.9	3.9	38.4	34.5
N10	16.4	16.5	4.0	36.9	32.9
N2	16.2	16.1	4.3	36.6	32.3

2.3.2 冬小麦吸收氮素的来源 小麦总吸收氮量, 吸收肥料氮量以及吸收量中来自氮肥的比例在处理 N1 和 N10 之间没有差异, 但尿素纯 N 用量从  $100\text{kg hm}^{-2}$  增加到  $150\text{kg hm}^{-2}$  (处理 N2) 时, 这些数值都明显增加(表 6)。由于根系吸收的氮素相对于籽粒和茎叶数量很少, 所以用地上部分或全株计算吸收量中来自尿素氮的比例一致(表 6)。处理 N1 和 N10 小麦吸收量中来自肥料氮的比例为 33%, 处理 N2 来自肥料氮的比例为 40%。

表 6 冬小麦吸收氮中来自肥料氮的比例

Table 6 Proportion of N taken up by winter wheat from urea

处理 Treatment	吸收肥料 N N taken up from urea ( $\text{mg plot}^{-1}$ )		总吸收 N 量 Total N taken up by plant ( $\text{mg plot}^{-1}$ )		来自氮肥的比例 N taken up from urea (%)	
	地上 Aerial parts	全株 Total plant	地上 Aerial parts	全株 Total plant	地上 Aerial parts	全株 Total plant
	N1	690	768	2076	2302	33.2
N10	657	738	2015	2245	32.6	32.9
N2	968	1097	2435	2713	39.8	40.4

该研究结果与其他一些研究结果<sup>[9-11]</sup> 相似, 都表明土壤氮对小麦的贡献率在 2/3 左右。尽管黑垆土全氮贮量低, 但小麦对土壤氮素的依赖性仍然在 60% 以上。可见, 培育土壤肥力, 保持土壤氮素平衡, 对于小麦丰产具有重要的意义。

2.3.3 标记尿素氮在土壤中的残留与损失

表 3 结果表明, 标记尿素氮在 0~40cm 的残留率在 29.2% ~ 33.6% 之间。各处理标记氮肥在土壤剖面中的残留率随土层深度的加深而迅速降低(图 2), 0~10cm 土层残留肥料氮量占总残留量的 66% ~ 71%,

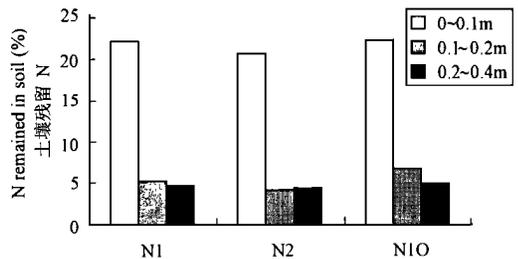


图 2 不同处理不同土层中的残留尿素氮

Fig. 2 Urea N remained in different soil layers in different treatments

10~ 20cm 和 20~ 40cm 分别占 14%~ 20% 和 14%~ 15%。看来,少量肥料氮可能移动至 40cm 土层以下。因此,实际上肥料氮在土壤中的残留率应比表上所列数据略高,而小麦当季尿素氮的损失应比表上所列数据(29.5%~ 34.2%)略低。

本试验中氮肥损失比边秀举等<sup>[9]</sup>和金翔等<sup>[10]</sup>在春小麦上的研究结果(肥料氮损失分别为 14% 和 6%)高得多,可能主要由于施肥方法不同所致。边、金等人的试验均采用氮肥深施,而本试验为氮肥混施。另外,按需分期施肥是提高氮肥利用率的又一重要措施,如果将一部分氮肥在小麦分蘖或拔节期施用,也可提高氮肥利用率<sup>[6,11]</sup>。但在雨养农业地区,常因干旱无雨而不能如愿追施氮肥。怎样寻找措施,提高肥料利用率,减少氮素损失,是雨养农业地区值得进一步研究的问题。

### 3 小 结

在黄土高原黑垆土-小麦系统中,施用氮肥是提高小麦产量和水分利用率的一项重要措施。目前当地普遍采用的尿素作基肥混施的施肥方式,当季尿素氮利用率为 36.6%~ 38.4%,土壤残留率为 29.2%~ 33.6%,总损失为 29.5%~ 34.2%,表明氮肥利用率较低,损失严重。冬小麦吸收的氮素来自肥料氮的比例不高于 40%,大部分氮素来自土壤。进一步研究提高氮肥利用率的有效途径,保持和提高土壤肥力,对实现小麦高产高效和环境保护具有重要意义。

### 参 考 文 献

1. 朱兆良,文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京:江苏科学技术出版社,1992
2. 党廷辉,彭琳,戴鸣钧. 旱塬特大干旱冬小麦肥效的异常性分析. 水土保持通报,1993,13(5):54~ 57
3. 党廷辉. 施肥对旱地冬小麦水分利用效率的影响. 生态农业研究,1999,7(2):28~ 31
4. 周凌云. 封丘地区雨养麦田的水分供应和产量潜力. 土壤学报,1993,3(3):297~ 303
5. 蔡贵信,范晓晖. 土壤氮素和氮肥的有效施用. 鲁如坤等著. 土壤-植物营养学原理和施肥. 北京:化学工业出版社,1998. 112~ 151
6. 张翔,朱洪勋,孙春河. 应用<sup>15</sup>N 对中低产区冬小麦施氮推荐体系的研究. 土壤通报,1999,30(5):224~ 226
7. 张绍林,朱兆良,徐银华. 黄泛区潮土一冬小麦系统中尿素的转化和化肥氮去向的研究. 核农学报,1989,3(1):9~ 15
8. 张起刚,王化国,杨合法等. 细质沙土增施磷肥对小麦生长及氮素吸收的影响. 核农学报,1994,8(3):159~ 166
9. 边秀举,王维进,杨福存等. 冀北高原旱甸栗钙土春小麦中化肥氮去向的研究. 土壤学报,1997,34(1):60~ 66
10. 金翔,韩晓增,蔡贵信. 黑土一春小麦中三种氮肥的去向. 土壤学报,1999,36(4):448~ 453
11. 李仁岗,王淑敏,王克武等. 冬小麦对土壤氮和肥料氮的吸收及氮素平衡的研究. 土壤通报,1982,(4):21~ 22

## FATE OF AND CROP RESPONSE TO NITROGEN APPLIED TO WINTER WHEAT GROWING ON HEILU SOIL

Dang Ting hui<sup>1</sup> Cai Guǎxin<sup>2</sup> Guo Sheng li<sup>1</sup>  
Hao Ming de<sup>1</sup> Guo Ming hang<sup>1</sup> Wang Bai qun<sup>1</sup>

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100)

(2 Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

### Summary

An experiment was conducted in a wheat field of Heilu soil in the south of the Loess Plateau, Changwu County, Shaanxi Province. Efficiencies of urea use and water use were studied in a plot field experiment. Meanwhile the fate of applied nitrogen was investigated with <sup>15</sup>N-isotope technique. Results showed that crop response to N applied at the rate of 100kg hm<sup>-2</sup> was higher with productivity index of 12.1kg grain kg<sup>-1</sup> N, than at the rate of 150kg hm<sup>-2</sup> with productivity index of 6.4kg grain kg<sup>-1</sup> N. Nitrogen application increased water use efficiency from 7.6kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> to 9.7~10.5kg hm<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>. <sup>15</sup>N study showed that plant recoveries were in the range of 36.6%~38.4%; N remaining in 0~40 cm soil ranged in 29.2%~33.6% and decreased rapidly with increasing soil depth. About 33%~40% of the N taken up by wheat was derived from the urea applied and the rest, around 2/3 derived from the soil.

**Key words** Fate of urea N, Winter wheat, Heilu soil, Productivity index, Water use efficiency