

# 冬小麦对铵态氮和硝态氮的响应\*

苗艳芳<sup>1</sup> 李生秀<sup>2</sup> 徐晓峰<sup>1</sup> 王朝辉<sup>2</sup> 李小涵<sup>2</sup> 扶艳艳<sup>1</sup> 罗来超<sup>1</sup>

(1 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨陵 712100)

**摘要** 在陕西省永寿县和河南省洛阳市分别设置了 11 和 7 处大田试验, 分 5 层采集 0 ~ 100 cm 土壤样品并测定其起始硝态氮含量。永寿试验设 7 个处理, 分别为不施氮, 硝态氮、铵态氮品种、硝态氮与铵态氮 2:1 组合各 2 个处理; 洛阳试验设 6 个处理(硝态氮肥只有 1 个品种), 施氮处理均施 N 150 kg hm<sup>-2</sup>, 研究小麦对铵态氮和硝态氮肥响应的差异及其与不同深度土层硝态氮累积量的关系。试验表明, 同一形态不同氮肥品种之间的增产差异显著低于不同形态之间的差异。比较不同形态氮肥的小麦产量、增产量和增产率的平均值, 硝态氮肥最高, 硝态氮、铵态氮组合次之, 铵态氮最低。氮肥增产量和增产率随土壤累积硝态氮量增加而显著下降; 累积量越低, 氮肥增产效果越突出, 硝态氮的效果也越显著。由此可见, 土壤累积的硝态氮量是决定氮肥肥效的主要因子, 也是决定不同形态氮素效果的主要因子。只有在硝态氮累积量低的土壤上, 氮肥才能充分发挥作用, 硝态氮也才能表现出明显的优势。

**关键词** 小麦; 硝态氮肥; 铵态氮肥; 土壤累积硝态氮

**中图分类号** S143.1 **文献标识码** A

硝态氮和铵态氮是植物吸收的主要氮素形态, 吸收量占吸收阴、阳离子总量的 70% 左右<sup>[1]</sup>。因此, 研究植物氮素营养时, 这两种形态的矿质氮便成了人们关注的中心和焦点所在。

作物对硝态氮、铵态氮的响应研究已有很长历史。早期主要探讨影响这两种形态氮素吸收的环境条件, 尤其是介质 pH 的影响。结论是两者均是植物可以直接吸收利用的有效氮源; 只要能避免引起培养液中氢离子浓度增加, 铵态氮对高等植物同样有良好效果<sup>[2]</sup>, 不过硝态氮更安全<sup>[3]</sup>。

后续研究不断表明, 不同植物对铵态氮和硝态氮有不同偏好性。溶液培养试验显示, 作物对铵态氮和硝态氮的吸收数量和程度取决于作物种类和环境条件; 除介质 pH 外, 两种形态氮素的浓度有重要影响<sup>[4-5]</sup>。Tanaka 等<sup>[6]</sup>的水培试验证明, 介质氮素浓度为 20 mg L<sup>-1</sup>时, 铵态氮和硝态氮的效果类似; 而当浓度为 100 mg L<sup>-1</sup>时, 铵态氮抑制根系生长, 影响叶片氮素同化, 效果远逊于硝态氮。Schjorring<sup>[7]</sup>的液培试验发现, 无论溶液是否有磷存在, 生长 23 ~ 34 d 后的荞麦、大麦和油菜, 吸收硝态氮速

率均高于铵态氮。已经确定, 适应酸性土壤生长的嫌钙植物和适应低氧化还原势土壤生长的植物(如水稻)嗜好铵态氮<sup>[8]</sup>; 适于低 pH 条件下生长的马铃薯, 供应铵态氮可使介质 pH 降低, 对地上和根系生长均有明显优势<sup>[4]</sup>。

土壤具有强大的缓冲能力; 在通气良好、石灰性或强石灰性、pH 高的条件下, 存在于土壤中的铵态氮, 不论来自有机质的矿化或来自施入土壤的铵态氮肥, 均会迅速地通过硝化作用转变为硝态氮<sup>[9]</sup>, 因而铵态氮浓度低, 只有 0.77 mmol dm<sup>-3</sup>, 而硝态氮浓度高达 6.0 mmol dm<sup>-3</sup><sup>[10]</sup>, 成为植物大量吸收的主导矿质氮源, 也成为大多数高等植物喜好的氮源。钙生植物<sup>[11-12]</sup>和旱地作物, 如玉米、棉花、向日葵、甜菜、菠菜、萝卜、烟草、高粱和蔬菜等均对其有一定偏好<sup>[13]</sup>; 供应等量氮素情况下, 施用硝态氮肥能得到较施用铵态氮肥更高的产量。硝态氮肥作为唯一氮源时不会产生危害, 而铵态氮作为唯一氮源经常会抑制植物生长<sup>[14-15]</sup>, 降低作物生物量<sup>[16]</sup>。植物对铵态氮和硝态氮响应还有生育阶段性的特点。生长在积水条件下的水稻一直被认为

\* 国家自然科学基金项目(30971866)、洛阳市科技攻关项目(1203206B)资助

作者简介: 苗艳芳(1956—), 教授, 硕士生导师, 主要从事植物营养研究。E-mail: myf2237@163.com

收稿日期: 2013-04-27; 收到修改稿日期: 2014-01-19

是喜铵作物,但不少试验发现,水稻也喜欢硝态氮,生长后期补施一定量硝态氮肥能改善水稻氮素营养,获得更高产量<sup>[17]</sup>。Hewitt 和 Smith<sup>[18]</sup> 研究证明,随着环境或介质中氮素浓度的升高,硝态氮作为氮源的优越性明显增加,铵态氮抑制植物生长的效应也会更明显地显露出来。

虽然植物对这两种氮素形态响应的研究甚多,但小麦对其响应的研究甚少。作为旱地主要的粮食作物,小麦对不同氮素形态氮肥的响应研究具有重要意义。李生秀和王朝辉<sup>[19]</sup> 进行了盆栽和大田试验,研究了铵态氮和硝态氮肥对小麦产量的影响。盆栽和大田的结果一致表明,施用硝态氮肥或硝态氮高而铵态氮低的配合时,小麦生长和产量均优于铵态氮源。尹飞等<sup>[20]</sup> 的研究也得出了同样结论。但马新明等<sup>[21]</sup> 却发现,铵态氮有利于提高小麦根系活性及氮肥回收率。笔者以往试验发现,小麦收获后种植玉米的田块,土壤硝态氮含量很低,硝态氮肥对后作小麦有突出的效果;小麦收获后休闲的田块,土壤硝态氮含量高,硝态氮肥对后作小麦的效果与铵态氮肥差别不大。这些现象表明铵态氮和硝态氮肥的效果可能与土壤起始硝态氮含量有关。过去的研究多是一个田块的试验,未能覆盖不同硝态氮含量的土壤,无法揭示其中规律。要解决这一问题,必须进行大量田间试验。为此,本文在陕西省和河南省分别设置了 11 和 7 处大田试验,从铵态氮和硝态氮肥的增产效果分析小麦对它们的响应,旨在揭示响应差异与土壤硝态氮累积量的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

大田试验分别在陕西永寿县(代码 Y)11 个田块和河南省洛阳市(代码 L)7 个田块旱地土壤上实施。永寿地处陕西渭北高原,系半湿润易旱地区,年均降水量 601.6 mm,年均气温 10.8℃,蒸发量 807.4 mm。主要作物为小麦,小麦收获后休闲,一年一熟。试验选用小麦收获后具有不同肥力的田块,保证基础条件特别是土壤水分条件相同,供试土壤均为黑垆土。洛阳市位于河南省西部,年均降雨量 610 mm,年均气温 14.2℃,属小麦-玉米一年两熟区,供试土壤为碳酸盐褐土和黄潮土。

### 1.2 试验设计

试验旨在确定小麦对铵态氮和硝态氮肥的响

应。两地试验方案略有差别。永寿试验共设 7 个处理,包括两种铵态氮肥、两种硝态氮肥和两种硝态氮与铵态氮组合。具体处理为:(1)对照,不施氮肥(CK);(2)硫酸铵(AS);(3)氯化铵(AC);(4)硝酸钠(SN);(5)硝酸钙(CN);(6)硝酸钠+硫酸铵(SN+AS),二者含氮量比为 2:1;(7)硝酸钙+硫酸铵(CN+AS),二者含氮量比亦为 2:1。洛阳试验设 6 个处理(缺少硝酸钙处理)。均在施用磷肥(均施  $P_2O_5$  75 kg  $hm^{-2}$  的过磷酸钙)基础上施用氮肥。施氮处理的氮素用量均为 150 kg  $hm^{-2}$ 。田间采用随机区组排列,每个处理重复 3 次,试验小区面积为 18  $m^2$ 。

供试小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种永寿为晋麦 4 号,由该县种子站提供;洛阳为焦麦 668,由河南省温县农业科学研究院提供。

永寿试验于 2009 年 9 月 25 ~ 29 日播种,2010 年 6 月 10 ~ 12 日收获;洛阳试验于 2009 年 10 月 14 ~ 18 日播种,2010 年 6 月 2 ~ 7 日收获,播种量均为 150 kg  $hm^{-2}$ 。田间管理措施与当地大田栽培一致。小麦成熟后,按小区收获,称取全区鲜重;称取其中 5 kg 左右鲜样,晒干、称重、脱粒,由此计算生物量及籽粒产量。

### 1.3 样品采集与分析

每个试验田块随机选取 5 点,用土钻采取各点表层(0 ~ 20 cm)土壤混合。样品经风干、碾磨、过筛,贮于玻璃瓶中,用于测定土壤基本理化性质。土壤起始矿质氮则在选好的 5 个样点上,分 5 层采取混合土样,每层 20 cm,直至 100 cm。

土壤起始矿质氮采用 KCl 溶液浸取新鲜土样、采用连续流动分析仪测定滤液中的硝态氮<sup>[22]</sup> 和铵态氮<sup>[23]</sup>。土壤全氮采用凯氏定氮法测定,有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,速效磷采用 Olsen 法测定,速效钾采用乙酸铵浸取-火焰光度计测定。各试验田块耕层土壤的基本理化性质见表 1。

### 1.4 数据计算与分析

不同土层硝态氮累积量( $kg\ hm^{-2}$ ) = 硝态氮含量( $mg\ kg^{-1}$ ) × 每公顷每层土壤干重( $kg\ hm^{-2}$ ) ×  $10^{-6}$

采用 Microsoft Excel 2003 软件对试验数据进行统计分析;采用 SPSS16.0 软件进行方差分析,以 LSD 法进行多重比较。

表 1 供试田块耕层(0~20cm)土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of top soils (0~20 cm) of the fields in the experiment

土壤编号 Soil No.	有机质 OM (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 Ammonium N (mg kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 Nitrate N (mg kg <sup>-1</sup> )
Y-1	8.34	0.868	10.1	207	0.1	4.4
Y-2	9.87	0.726	12.1	152	0.5	4.0
Y-3	9.11	0.676	8.3	425	1.2	4.4
Y-4	11.68	0.867	13.3	258	0.0	8.0
Y-5	10.71	0.866	14.0	182	1.4	13.1
Y-6	12.25	0.990	13.1	258	0.3	10.0
Y-7	10.24	0.814	11.7	200	0.7	6.7
Y-8	9.87	0.761	6.7	200	1.8	7.9
Y-9	11.13	0.904	17.3	332	3.0	12.9
Y-10	9.16	0.709	12.6	134	1.8	5.5
Y-11	10.66	0.409	16.2	225	0.2	6.9
L-1	10.84	0.712	10.2	130	2.4	13.2
L-2	13.99	0.985	8.5	235	1.1	15.3
L-3	13.71	0.978	12.5	200	1.8	28.6
L-4	15.03	1.025	10.0	170	2.5	20.9
L-5	12.85	0.964	10.2	155	2.5	18.5
L-6	11.58	0.852	13.3	157	3.2	15.9
L-7	12.48	0.945	13.3	204	2.5	12.6

## 2 结果

### 2.1 旱地土壤不同土层铵态氮和硝态氮含量

测定结果表明,两地旱地土壤中的铵态氮含量甚低,最低者无法检出,最高者只有 3.6 mg kg<sup>-1</sup>。与此相反,硝态氮含量较高,永寿土样,最大值为 45.7 mg kg<sup>-1</sup>,最小值为 2.9 mg kg<sup>-1</sup>;由于受到当季降水淋溶,硝态氮含量随土层的加深而上升。洛阳土样,最高含量为 28.6,最低为 2.2 mg kg<sup>-1</sup>;未受到当季降水淋溶,含量随土层加深而下降。根据硝态氮含量,本文计算了不同土层的累积量(表 2)。由于铵态氮的含量和累积量与作物对氮肥响应无关,硝态氮含量在反映土壤供氮能力方面具有不稳定性,铵态氮和硝态氮之和与硝态氮量相似,本文主要分析小麦对铵态氮、硝态氮响应与不同土层硝态氮累积量的关系。

### 2.2 不同形态氮肥对小麦产量的影响

试验表明,两种铵态氮肥和两种硝态氮肥对小麦肥效均具有一定程度的差异:有的田块一种形态氮肥效果显著高于另一种,有的反之;有的田块则相近或相等。两种氮素形态配比也有同样现象。但就总体来看,同一形态两个氮肥品种之间和两种组合之间大多无显著差异。就永寿 11 个试验田块平均产量来看,施氯化铵(AC)产量为 4 478 kg hm<sup>-2</sup>;施硫酸铵(AS)产量为 4 475 kg hm<sup>-2</sup>,基本无差异;施硝酸钠(SN)产量为 4 866 kg hm<sup>-2</sup>;施硝酸钙(CN)产量为 4 813 kg hm<sup>-2</sup>,两者仅相差 53 kg hm<sup>-2</sup>。两种组合也是如此:硝酸钠与硫酸铵组合(SN + AS),产量为 4 667 kg hm<sup>-2</sup>;硝酸钙与硫酸铵组合(CN + AS),产量为 4 653 kg hm<sup>-2</sup>,仅相差 14 kg hm<sup>-2</sup>。由此可见,同一形态的氮肥品种并未明显地影响小麦产量,而不同形态之间却有显著影响:硝态氮肥的产量明显高于铵态氮肥,两种形态氮素配合位于其间(表 3)。

表 2 不同土层铵态氮和硝态氮含量 ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) 及硝态氮累积量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ )

Table 2 Ammonium and nitrate N concentrations and nitrate accumulations in different soil layers

土壤编号 Soil No.	铵态氮含量 $\text{NH}_4^+$ -N concentration ( $\text{mg kg}^{-1}$ )					硝态氮含量 $\text{NO}_3^-$ -N concentration ( $\text{mg kg}^{-1}$ )					硝态氮累积量 $\text{NO}_3^-$ -N accumulation ( $\text{kg hm}^{-2}$ )				
	0 ~	20 ~	40 ~	60 ~	80 ~	0 ~	20 ~	40 ~	60 ~	80 ~	0 ~	0 ~	0 ~	0 ~	0 ~
	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
Y-1	0.1	3.0	1.6	2.1	1.4	4.4	5.8	11.6	13.0	6.2	11.1	26.2	55.7	89.6	105.6
Y-2	0.5	2.2	2.7	0.2	2.0	4.0	4.9	8.5	8.0	4.9	9.9	22.1	44.3	65.2	77.8
Y-3	1.2	1.5	0.0	0.4	1.6	4.4	5.0	6.8	9.2	22.2	10.9	23.3	40.9	64.7	122.3
Y-4	0.0	0.6	0.1	0.5	0.3	8.0	20.5	28.7	19.9	7.6	19.9	71.1	145.8	197.5	217.2
Y-5	1.4	0.8	1.2	0.5	1.3	13.1	19.2	24.2	36.1	45.7	32.6	80.6	143.5	237.3	356.2
Y-6	0.3	0.3	0.3	2.1	1.8	10.0	6.3	5.2	6.6	6.0	24.9	40.6	54.2	70.6	86.1
Y-7	0.7	1.8	4.3	2.6	0.8	6.7	5.7	8.5	12.4	21.5	16.8	31.1	53.3	85.5	141.3
Y-8	1.8	0.3	0.8	0.3	0.7	7.9	13.6	14.2	13.0	11.7	19.7	53.7	90.6	124.4	155.2
Y-9	3.0	1.5	0.6	2.3	1.2	12.9	18.8	4.7	2.9	3.5	32.2	79.3	91.5	99.1	108.1
Y-10	1.8	1.4	1.3	1.9	1.9	5.5	8.3	10.8	12.3	15.4	13.8	34.6	62.5	94.5	134.6
Y-11	0.2	0.0	2.2	2.4	0.6	6.9	9.6	14.0	10.0	9.0	17.3	41.3	77.7	103.6	126.9
L-1	2.4	2.3	3.6	2.1	1.9	13.2	7.9	4.2	4.7	3.6	31.7	50.6	61.6	73.9	83.3
L-2	1.1	1.1	0.3	0.8	1.1	15.3	8.3	4.0	2.2	2.3	36.7	56.7	67.1	72.7	78.8
L-3	1.8	1.1	1.7	1.5	2.0	28.6	10.5	7.5	6.5	8.2	68.6	93.8	113.4	130.3	151.7
L-4	2.5	1.2	1.6	2.0	2.0	20.9	12.3	10.5	6.1	4.3	50.2	79.7	107.0	122.9	134.1
L-5	2.5	2.1	1.0	1.2	2.2	18.5	11.0	9.9	4.0	3.7	44.4	70.9	96.5	106.9	116.4
L-6	3.2	3.1	2.1	2.5	2.4	15.9	9.9	6.3	5.2	3.4	38.2	61.8	78.3	91.8	100.7
L-7	2.5	2.3	1.6	1.5	1.5	12.6	8.2	5.2	3.9	2.3	30.2	49.8	63.4	73.5	79.3

表 3 不同氮肥品种对小麦产量的影响

Table 3 Effects of N fertilizer on wheat yield ( $\text{kg hm}^{-2}$ ) relative to variety

土壤编号 Soil No.	铵态氮 Ammonium N		硝态氮 Nitrate N		硝态氮与铵态氮 2:1 组合 Nitrate N:Ammonium N = 2:1	
	AC <sup>1)</sup>	AS <sup>2)</sup>	SN <sup>3)</sup>	CN <sup>4)</sup>	SN + AS <sup>5)</sup>	CN + AS <sup>6)</sup>
	Y-1	3 564a	3 682a	4 173a	3 952b	3 884a
Y-2	3 495a	3 487a	4 186a	4 056a	3 871a	3 783a
Y-3	4 106a	3 958a	4 228b	4 518a	4 144 b	4 321a
Y-4	5 100a	5 078a	5 234a	5 014a	5 032a	5 166a
Y-5	5 689a	5 645a	5 722a	5 642a	5 701a	5 693a
Y-6	3 776a	3 914a	4 853a	4 710a	3 799b	4 479a
Y-7	4 501b	4 944a	4 813b	4 974a	4 801a	4 799a
Y-8	5 341a	4 811b	5 425a	5 023b	5 123a	5 189a
Y-9	4 428b	4 800a	5 068a	4 908a	5 298a	4 146b
Y-10	4 912a	4 832a	5 361a	5 263a	5 385a	4 945b
Y-11	4 343a	4 079a	4 465b	4 887a	4 300b	4 702a
L-1	4 477b	5 733a	5 848	—	5 210a	4 974a
L-2	5 481a	4 821b	5 445	—	5 318a	5 458a
L-3	4 003a	4 173a	4 143	—	4 143a	4 251a
L-4	4 953b	5 234a	4 950	—	5 394a	4 250b
L-5	5 174a	4 500b	4 700	—	4 410a	4 250a
L-6	4 476a	4 221a	4 852	—	4 236a	4 860b
L-7	5 230b	6 038a	5 737	—	5 560b	6 230a

1) AC:氯化铵 Ammonium chloride; 2) AS:硫酸铵 Ammonium sulfate; 3) SN:硝酸钠 Sodium nitrate 4) CN:硝酸钙 Calcium nitrate 5) SN + AS, 硝酸钠 + 硫酸铵 Sodium nitrate plus ammonium sulfate; 6) CN + AS:硝酸钙 + 硫酸铵 Calcium nitrate plus ammonium sulfate. 同行不同字母表示差异在  $p < 0.05$  显著 Different letters in the same line indicate significant difference at  $p < 0.05$

### 2.3 小麦产量与土壤硝态氮累积量的关系

作物产量是农业生产的主要目标,反映了当地条件及农业措施的综合影响。不同氮素形态对作物生产的影响首先会反映在小麦产量上。两省 18

个试验田块小麦产量平均值显示,几种氮肥形态中,最低为铵态氮肥,产量为  $4\ 639\ \text{kg hm}^{-2}$ ,最高为硝态氮肥,产量为  $4\ 940\ \text{kg hm}^{-2}$ ;铵态氮与硝态氮配合位于其间,产量为  $4\ 752\ \text{kg hm}^{-2}$ (表 4)。

表 4 不同形态氮素对小麦产量、增产量和增产率的影响

Table 4 Effect of N on wheat yield, yield increment and yield increase rate relative to N form

土壤编号 Soil No.,	产量 Yield ( $\text{kg hm}^{-2}$ )				增产量 Yield increment ( $\text{kg hm}^{-2}$ )				增产率 Yield increase rate (%)	
	CK <sup>1)</sup>	AN <sup>2)</sup>	NN <sup>3)</sup>	AN + NN <sup>4)</sup>	AN	NN	AN + NN	AN	NN	AN + NN
	Y-1	3 194	3 623	4 062	3 923	429	868	729	13.4	27.2
Y-2	2 825	3 491	4 121	3 827	666	1 296	1 002	23.6	45.5	35.5
Y-3	3 569	4 032	4 373	4 233	463	804	664	13.0	22.5	18.6
Y-4	4 671	5 089	5 124	5 099	418	453	428	8.9	9.7	9.2
Y-5	5 653	5 667	5 682	5 697	14	29	44	0.24	0.5	0.8
Y-6	3 069	3 843	4 782	4 137	774	1 713	1 068	25.2	55.8	34.8
Y-7	4 153	4 723	4 894	4 800	570	741	647	13.7	17.8	15.6
Y-8	4 321	5 076	5 224	5 156	755	903	835	17.4	20.9	19.3
Y-9	3 717	4 614	4 988	4 722	897	1 271	1 005	24.1	34.2	27.0
Y-10	4 184	4 872	5 312	5 165	688	1 128	981	16.4	27.0	23.4
Y-11	3 564	4 211	4 676	4 501	647	1 112	937	18.2	31.2	26.3
L-1	4 991	5 105	5 848	5 092	115	857	101	2.3	17.2	2.0
L-2	4 520	5 151	5 445	5 388	641	925	868	14.2	20.5	19.2
L-3	3 918	4 088	4 143	4 197	170	225	279	4.3	5.7	7.1
L-4	4 723	5 094	4 950	4 822	371	222	99	7.9	4.7	2.1
L-5	4 317	4 837	4 700	4 330	520	383	13	12.0	8.9	0.3
L-6	4 020	4 349	4 852	4 548	329	832	528	8.2	20.7	13.1
L-7	4 977	5 634	5 737	5 895	657	760	919	13.2	15.3	18.5
平均 Mean	4 133	4 639	4 940	4 752	507	807	619	13.2	20.9	16.4

1) CK: 对照, 不施氮肥 Control without N fertilization; 2) AN: 铵态氮 Ammonium N; 3) NN: 硝态氮 Nitrate N;

4) AN + NN: 铵态氮 + 硝态氮 Ammonium N plus nitrate N. 下同 The same below

以小麦产量为因变量,不同土层硝态氮累积量为自变量,拟合作图。由图 1 可以看出,不施氮肥,小麦产量随土壤硝态氮累积量的增加而增高,0~40、0~60、0~80 和 0~100 cm 土层硝态氮累积量与小麦产量呈显著线性关系, $R^2$  分别为 0.287、0.332、0.319 和 0.290,均超过  $p < 0.05$  的显著水平 ( $n = 18, R_{0.05}^2 = 0.219$ )。施用铵态氮肥促进了小麦增产,趋势线高于对照;但增产幅度较小,未改变小麦产量随土壤硝态氮累积量增加而增长的趋势。

0~40、0~60 及 0~80 cm 土层硝态氮累积量与施用铵态氮肥后的小麦产量仍呈显著相关, $R^2$  分别为 0.287、0.243 和 0.211,达到或接近  $p < 0.05$  的显著水平。与此相反,施用硝态氮肥增产幅度大,趋势线位置最高且增加平缓,表明在任何硝态氮累积的土壤中,施用硝态氮肥均能充分发挥作用,使小麦产量达到较高且比较接近的水平,土壤硝态氮累积量与施用硝态氮肥后的小麦产量之间无显著线性关系。铵态氮和硝态氮肥配合的处理位于其间。

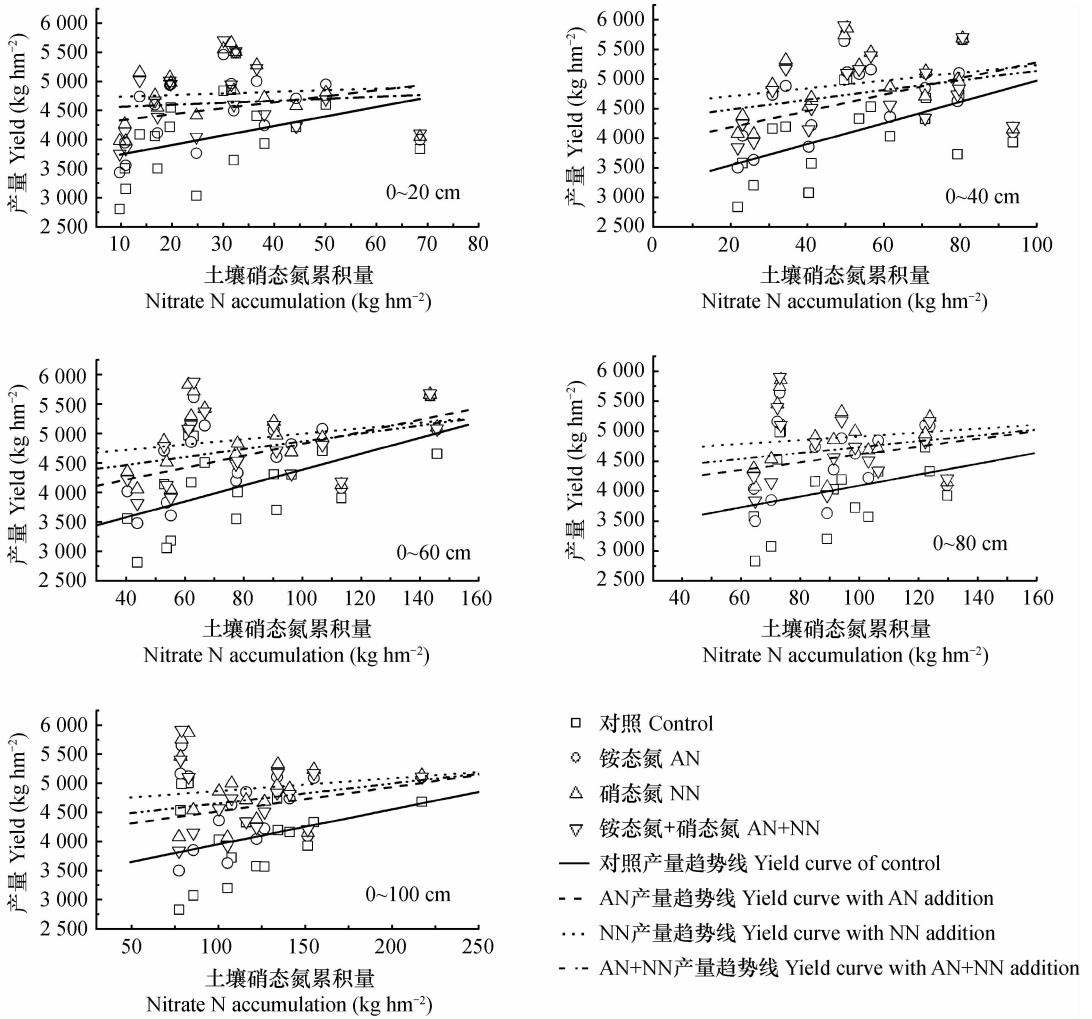


图 1 不同施氮处理小麦产量与不同土层硝态氮累积量的关系

Fig. 1 Relationship of wheat yield with nitrate N accumulation in different soil layers relative to fertilization treatment

## 2.4 小麦增产量与土壤硝态氮累积量的关系

小麦的施氮增产量既能表征不同形态氮素的真正效果,也能反映作物吸收利用氮素的情况。不同形态氮肥的增产量平均结果表明:与对照不施氮相比,施用硝态氮肥小麦的增产量最高,每公顷增产 807 kg;硝态氮、铵态氮肥配合次之,每公顷增产 619 kg;铵态氮最低,每公顷增产 507 kg。

以小麦增产量为因变量,以土壤硝态氮累积量为自变量,拟合作图,直观地揭示两者之间的关系。结果表明,施氮增产量与不同土层硝态氮累积量之间有密切关系(图 2),在任何土层中,小麦的施氮增产量均随土壤累积的硝态氮数量增加而显著下降。施用铵态氮肥的截距最低,表明增产量起点低而幅度小;回归系数最小,表明增产量随土壤硝态氮累积量增加而下降平缓。在拟合方程中,除了铵态氮肥的小麦增产量与 0~20、0~40 和 0~60 cm 土层土壤累积的硝态氮量间的  $R^2$  不显著外,其他或则接

近,或则达显著甚至极显著水平。与此相反,施用硝态氮肥的截距最高,表明增产量起点高而幅度大;回归系数居首,表明增产量随土壤硝态氮累积量的增加而下降强烈。硝态氮、铵态氮配合者居中。

土壤硝态氮累积量与施氮增产量的关系也可用不同累积量下的增产量更清楚地显示出来。根据本试验结果,可将每公顷 0~100 cm 土层累积的硝态氮量分为三类:(1)硝态氮累积量  $< 100 \text{ kg hm}^{-2}$  有 5 个田块,施用铵态氮增产效果最低,平均增产  $571 \text{ kg hm}^{-2}$ ;硝态氮增产效果最突出,平均增产  $1\,050 \text{ kg hm}^{-2}$ ;铵态氮和硝态氮配合居中,平均增产  $792 \text{ kg hm}^{-2}$ 。(2)硝态氮累积量介于  $100 \sim 200 \text{ kg hm}^{-2}$  之间共有 11 个田块,施氮增产效果较第一类明显下降,硝态氮肥处理下降最突出;3 个施氮处理的增产量依次为 531、771 和  $611 \text{ kg hm}^{-2}$ 。(3)硝态氮累积量  $> 200 \text{ kg hm}^{-2}$  有 2 个田块,3 个处理的增产量平均值无差异。由此可见,氮肥的增

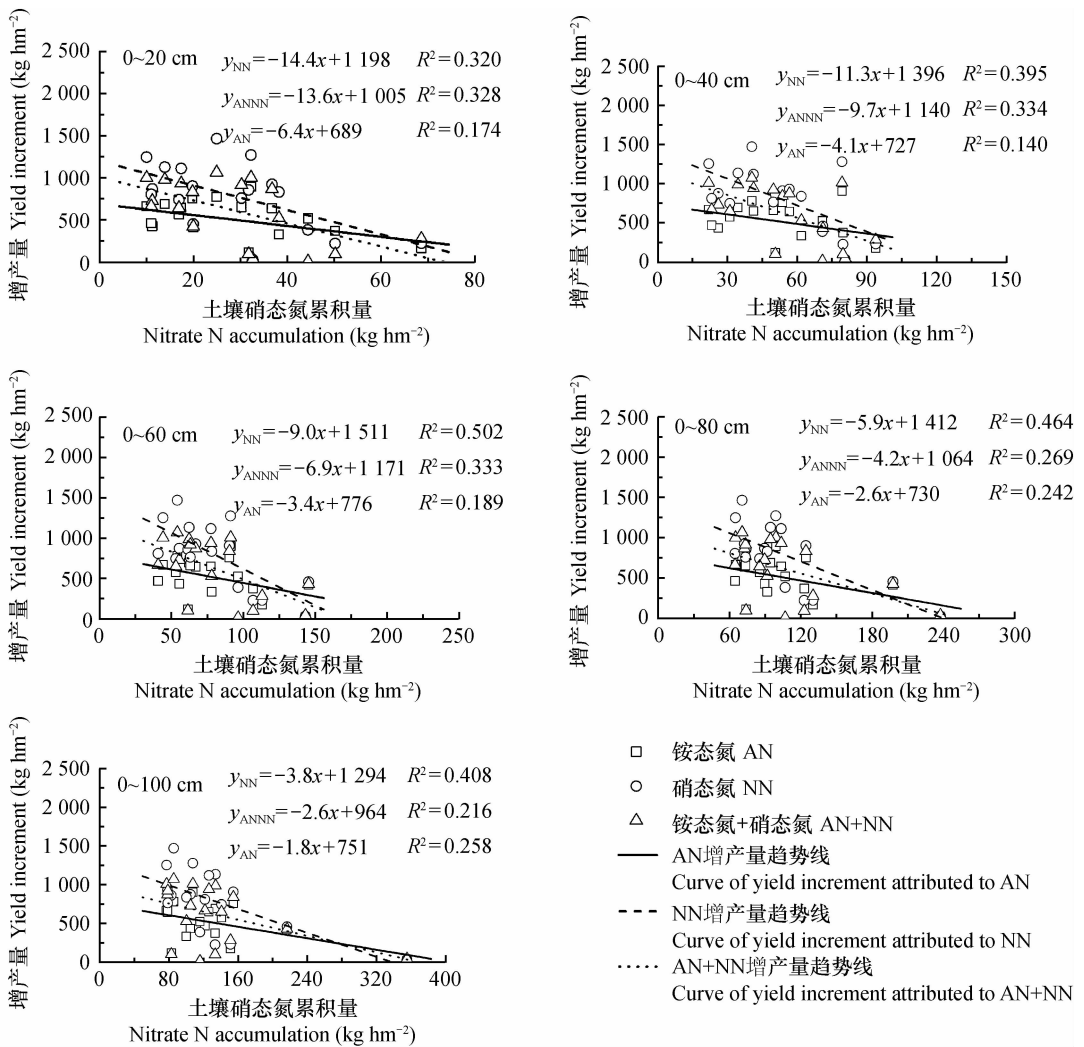


图2 不同施氮处理小麦增产量与不同土层硝态氮累积量的关系

Fig. 2 Relationship of wheat yield increment with nitrate N accumulation in different soil layer relative to fertilization treatment

产效果取决于土壤累积的硝态氮数量,硝态氮的优势也取决于土壤累积的硝态氮量。只有在硝态氮累积量低的土壤上,氮肥才能表现出显著的增产作用,硝态氮也才能表现出较铵态氮更好的效果。

## 2.5 小麦增产率与土壤硝态氮累积量的关系

增产率是广泛用于表征肥料增产效果的另一种方法,优点是排除了增产绝对值的影响而可用于不同条件下的比较。采用直线回归方程拟合了施氮增产率( $y$ )与不同土层硝态氮累积量( $x$ )的关系(图3)。由图3可见,氮肥的增产率同样随土壤硝态氮累积量的增加而显著下降。施用铵态氮肥的截距和回归系数最低,表明增产率起点低而幅度小,随土壤硝态氮累积量的增加而下降平缓;施用

硝态氮肥最高,表明这类形态氮素的增产率最高,增产率随土壤硝态氮累积量增加而下降也最强烈。硝态氮、铵态氮配合的增产率位于其间。与小麦增产率不同的是,在任何土层,所有形态氮素的增产率与土壤硝态氮累积量的关系( $R^2$ )皆达到显著水平,多数情况下 $R^2$ 高于增产率所得结果。

将土壤0~100 cm土层硝态氮累积量分为三类:(1)硝态氮累积量 $<100 \text{ kg hm}^{-2}$ 时,施用铵态氮增产率为15.7%,施用硝态氮为29%,两者配合时为22%;(2)硝态氮累积量介于 $100 \sim 200 \text{ kg hm}^{-2}$ ,3种氮肥的增产率分别为16%、20%和13.5%;(3)硝态氮累积量 $>200 \text{ kg hm}^{-2}$ 时相应增产率为5%、5.1%和4.6%。

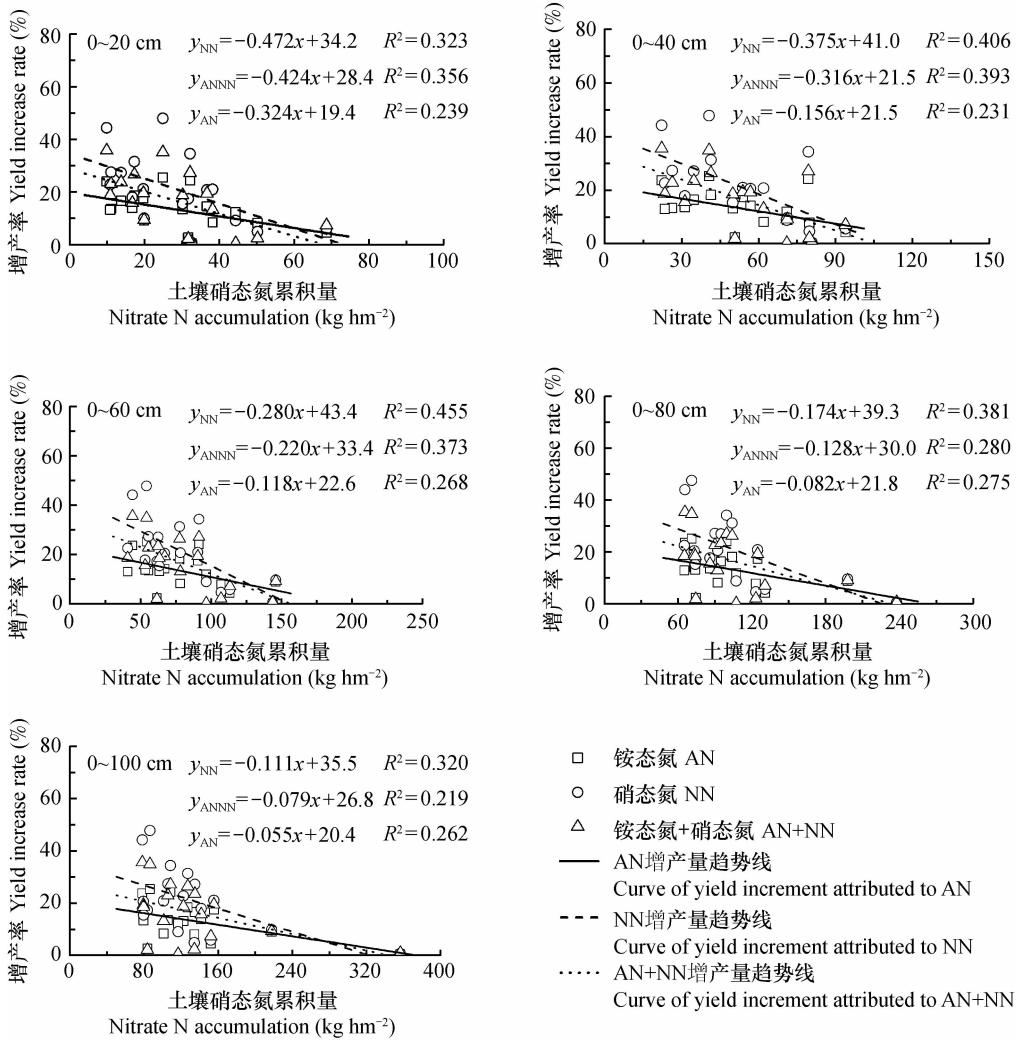


图3 不同施氮处理小麦增产率与不同土层硝态氮累积量的关系

Fig. 3 Relationship of wheat yield increase rate (%) with nitrate N accumulation in different soil layers relative to fertilization treatment

### 3 讨论

本研究基于 18 个田块的试验结果,从小麦产量、施氮增产量与增产率等方面论证了小麦对铵态氮和硝态氮响应的差异,证明硝态氮肥或硝态氮高、铵态氮低的组合优于铵态氮肥。本文提出的土壤硝态氮含量是决定氮肥效果、也是决定铵态氮和硝态氮效果差别的主要原因,可以解释当前大部分结果不一致的现象。铵态氮和硝态氮对小麦增产的差异既与土壤起始硝态氮含量有关,也与不同形态的氮肥特性有关。

#### 3.1 小麦的硝态氮营养特点

长期种植于旱地的小麦形成了适应硝态氮营养的特点,而硝态氮在小麦体内大量累积是其突出

的特点之一<sup>[19]</sup>。累积数量随土壤硝态氮含量而变化:施用硝态氮肥或当土壤累积大量硝态氮时,小麦会吸收并累积远多于其需要的硝态氮量。实际上,硝态氮的过量吸收及在营养器官中大量累积是所有植物的共性,主要发生在营养生长阶段。不仅对蔬菜,对小麦也是如此。累积在植物液胞中的硝态氮可作为一种内源贮存养分,在外源氮素供应不足时释放至细胞质中被植物利用<sup>[24]</sup>。累积在植物体内的硝态氮也可以促进酰胺形成。酰胺是一类贮氮化合物,可以将无机氮素暂时贮存起来,在植物旺盛生长和迫切需氮时期,释放氮素,保证植物对氮素的需求,最终获得较高的生物量和籽粒产量<sup>[25]</sup>。硝态氮的这种累积机制对保证植物氮素营养和良好生长有重要作用。

硝态氮的累积也加强了硝态氮向铵态氮转化



的绝对量。小麦体内硝态氮浓度高时,铵态氮浓度相应升高,蛋白质量随之增加<sup>[19]</sup>。以往试验证明,硝态氮累积多的植物,不但营养生长期生长旺盛,叶片保持绿色或深绿;而且生长后期,植物体内仍有一定数量的硝态氮累积,生长仍然良好,叶片依然保持绿色。相反,硝态氮累积量少的植物,营养生长期长势不旺;随着植物持续生长,茎叶累积的硝态氮显著下降;到了后期,累积的硝态氮荡然无存,生长衰弱,叶色变黄。由于这一原因,硝态氮累积多的植物不但生长良好,而且延长了生育期<sup>[19,24]</sup>,累积更多的光合产物。从大量试验结果可以看出,硝态氮在植物体中的累积是植物适应可能遇到不良环境条件的行为。只要有大量硝态氮累积,即使后期土壤供氮不足或小麦吸收养分能力下降,植物仍可旺盛生长。

硝态氮又是安全氮源,即使在水培条件下也不会对植物产生危害。硝态氮既能够快速扩散,也能以质流方式随植物蒸腾过程不断向根部运输,减轻与微生物的竞争;吸收后又较快地通过木质部到达生长部位。硝态氮累积和转运的营养特点可能是其优于铵态氮的主要根源,决定了小麦能获得更高的生物量和籽粒产量。

### 3.2 铵态氮对作物的危害

已有研究表明,铵态氮对作物有一定危害。铵态氮浓度高或土壤硝化能力低、施用大量铵态氮肥后伴随土温下降,危害更易发生<sup>[9]</sup>。植物可以忍受数倍高于铵态氮的硝态氮浓度,而不能忍受高浓度的铵态氮<sup>[26]</sup>。冬小麦播种后面对的是秋末和严冬,土壤温度持续降低。硝化过程严重减慢,施入的铵态氮会较长时间保留在土壤中。本试验每公顷施氮 150 kg,其中只有 2 个田块,0~100 cm 土层累积的硝态氮达到 269 kg hm<sup>-2</sup>,其他均在 100 kg hm<sup>-2</sup>左右,施入的铵态氮大于土壤累积的硝态氮。施入的铵态氮肥又仅在 0~20 cm 的土层内,会被土壤吸附而不易扩散迁移,因此表层实际上是以铵态氮主导的营养环境。高浓度、低移动的铵态氮可能在供应氮素的同时,产生危害。虽然外观上的危害,如前人报道的抑制作物生长,减少叶面积,造成光合产物向根部运输减少<sup>[27]</sup>。制约根系生长发育,产生细根或黑根<sup>[28]</sup>,出现根茎比降低<sup>[29]</sup>等现象,在本田间试验条件下并未显示出来,但生物量减少、增产幅度低于硝态氮已反映了其潜在影响。显然,铵态氮营养是其危害与供应养分的统一。溶液没有缓冲能力,液培条件下,铵态氮的危害往往

大于供应养分的效果,经常导致植物生长不良甚或死亡。土壤不同于溶液,具有强大的缓冲能力,铵态氮的危害不容易显示出来,但这并不等于没有危害,只是供应养分的效果大于危害的效果。最终产量上的表现就是这种胁迫和供应养分的综合反映。

### 3.3 铵态氮与硝态氮配合的作用

长期以来不少液培试验证明,给硝态氮培养液中加入少量铵态氮可增加植物吸氮总量和蛋白质含量,提高生长速率,更有利植物生长和发育,使多种植物获得更高的生物量和产量。为什么两者配合施用效果更好?一些研究者认为,两者同时施用可节省能量,使植物以少量能耗贮存较多氮素;铵态氮主要在根部同化,而硝态氮既会在根部也会运到地上部同化,两者配合也可以使各部累积的碳水化合物即碳架得到合理和高效利用<sup>[12]</sup>。另外一些研究者则认为单一施用硝态氮,植物的还原能力不强,难以获得足够可利用的还原氮;而同时施用木质部汁液中还原态高于单一供应硝态氮;同时,数量少的铵态氮能被植物快速吸收,对植物的抑制作用远小于营养效应<sup>[30]</sup>。还有研究认为,单独施用任一形态的铵态氮或硝态氮,可以引起介质 pH 改变,导致植物吸收阴、阳离子不平衡;两者同时施用可以调节细胞 pH,从而调节根际 pH。既有利保持一些营养元素如磷和微量元素的有效性,也能保护土壤生态环境<sup>[31]</sup>。以上观点均来自溶液培养试验,在大田试验中,虽然也曾发现两者配合的效果与硝态氮一致,无优劣之别<sup>[24]</sup>;但本试验却证明,两者配合效果逊于硝态氮。这可能与土壤中总存在一定数量的铵态氮,已经起到了两者的配合效果,从而使硝态氮效果更突出。

## 4 结 论

同一形态氮肥品种对小麦产量的影响远低于不同形态氮素的影响。施用硝态氮肥小麦增产最高,每公顷增产 807 kg hm<sup>-2</sup>,增产率为 20.9%;硝态氮、铵态氮肥配合次之,增产量和增产率分别为 619 kg hm<sup>-2</sup>和 16.4%;铵态氮肥最低,增产量和增产率分别为 507 kg hm<sup>-2</sup>和 13.2%。各种形态氮肥的增产量和增产率均随土壤硝态氮累积量的增加而显著下降。硝态氮下降陡峻,铵态氮平缓,硝态氮、铵态氮配合居中;增产量和增产率均与土壤硝态氮累积量呈显著线性关系。由此可见,氮肥的增产效果取决于土壤硝态氮累积量,硝态氮的优越性

也取决于土壤硝态氮累积量。只有硝态氮累积量低的土壤,氮肥才能表现出显著的增产作用,硝态氮也才能表现出较铵态氮更好的效果。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Caicedo J R. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rate of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). *Water Research*, 2000, 34 ( 15 ): 3829—3835
- [ 2 ] Loo T L. The influence of hydrogen ion concentration on the growth of seedlings of some cultivated plants ( Preliminary report). *The Botanical Magazine ( Tokyo )*, 1927, 41 ( 482 ): 33—41
- [ 3 ] Arnon D. Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley and rice at different seasons in relation to hydrogen-ion concentrations, manganese, copper and oxygen supplied. *Soil Science*, 1937, 44: 91—121
- [ 4 ] Gerendás J, Sattelmacher B. Influence of nitrogen form and concentration on growth and ionic balance of tomato (*Lycopersicon esculentum*) and potato (*Solanum tuberosum*)//van Beusichem M L. *Plant nitrogen physiology and application*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1990: 33—37
- [ 5 ] Kirkby E A. *Plant growth in relation to nitrogen supply*//Clarke F E, Rosswall T. *Terrestrial nitrogen cycles, processes, ecosystem strategies and management impact*. *Ecological Bulletins*, Stockholm, 1981: 249—267
- [ 6 ] Tanaka F, Ono S, Hayasaka T. Identification and evaluation of toxicity of rice root elongation inhibitors in flooded soils with added straw. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36: 97—104
- [ 7 ] Schjorring J K. Nitrate and ammonium absorption by plants growing at a sufficient or insufficient level of phosphorus in nutrient solutions. *Plant and Soil*, 1986, 91 ( 3 ): 313—318
- [ 8 ] Ismunadji M, Dijkshoorn W. Nitrogen nutrition of rice plants measured by growth and nutrient contents in pot experiment. *Ionic balance and selective uptake*. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1971, 19: 223—236
- [ 9 ] Smiciklas K D, Below F E. Role of nitrogen form in determining yield of field-grown maize. *Crop Science*, 1992, 32: 1220—1225
- [ 10 ] Wolt D J. *Soil solution chemistry*. John Wiley & Sons, 1994: 4—28
- [ 11 ] Nelson L E, Selby R. The effect of nitrogen sources and ion levels on the growth and composition of sitka spruce, and scots pine. *Plant and Soil*, 1974, 41: 573—588
- [ 12 ] Hawkesford M, Horst W, Kichry T, et al. *Functions of macronutrients*// Marschner P. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Waltham: Academic Press, 2011: 135—151
- [ 13 ] Coic Y, Lesaint C, Roux L. Effects of ammonium and nitrate nutrition and a change of ammonium and nitrate supply on the metabolism of anions and cations in tomatoes. *Annales de Physiologie Végétale*, 1962, 4: 117—125
- [ 14 ] Britto D T, Kronzucker H J.  $\text{NH}_4^+$  toxicity in higher plants: A critical review. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159: 567—584
- [ 15 ] Britto D T, Siddiqi M Y, Glass A D M. Futile transmembrane  $\text{NH}_4^+$  cycling: A cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98 ( 7 ): 4255—4258
- [ 16 ] Raab K T, Terry N. Nitrogen source regulation of growth and photosynthesis in *Beta vulgaris* L. *Plant Physiology*, 1994, 105: 1159—1166
- [ 17 ] 杨肖娥, 孙羲. 育后期施用  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 对水稻的生理效应. *土壤通报*, 1990, 21 ( 3 ): 110—114. Yang X E, Sun X. The physiological effect of  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N on rice at late growing stage ( In Chinese ). *Chinese Journal of Soil Science*, 1990, 21 ( 3 ): 110—114
- [ 18 ] Hewitt E J, Smith T A. *Plant mineral nutrition*. London: English University Press, 1975: 176—222
- [ 19 ] 李生秀, 王朝辉. 土壤和植物的铵、硝态氮//林葆. *化肥与无公害农业*. 北京: 中国农业出版社, 2003: 101—140. Li S X, Wang Z H. Ammonium and nitrate N in soil and plants ( In Chinese )// Lin B. *Chemical fertilizer and agricultural security*. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 101—140
- [ 20 ] 尹飞, 陈明灿, 刘君瑞. 氮素形态对小麦花后干物质累积与分配的影响. *中国农学通报*, 2009, 25 ( 13 ): 78—81. Yi F, Chen M C, Liu J R. Effect of N forms on dry matter accumulation and distribution after blooming ( In Chinese ). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25 ( 13 ): 78—81
- [ 21 ] 马新明, 王志强, 王小纯, 等. 氮素形态对不同专用型小麦根系及氮素利用率影响的研究. *应用生态学报*, 2004, 15 ( 4 ): 655—658. Ma X M, Wang Z Q, Wang X C, et al. Effect of N forms on root system and N recovery rate of wheat for special utilization ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 ( 4 ): 655—658
- [ 22 ] Crooke W M, Simpson W. Determination of ammonium in Kjeldahl extracts of crops by an automated procedure. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1971, 22: 9—10
- [ 23 ] Best E X. An automated method for determining nitrate-N in soil extracts. *Queensland Agricultural Journal*, 1976, 33: 161—165
- [ 24 ] Li S X, Wang Z H, Hu T T, et al. Nitrogen in dryland soils of China and its management. *Advances in Agronomy*, 2009, 101: 123—181
- [ 25 ] 普良尼施尼柯夫. 在植物生活和苏联农业中的氮素. 王天锋, 夏苏芳. 译. 北京: 科学出版社, 1956: 1—120. Plianiishnikov G H. Nitrogen in plant life and in agriculture in Union of Soviet Socialist Republics ( In Chinese ). Wang T F, Xia S F. trans. Beijing: Science Press, 1956: 1—120
- [ 26 ] Maynard D N, Barker A V. Critical nitrate levels for leaf lettuce, radish, and spinach plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1971, 2: 461—470
- [ 27 ] Maynard D N, Barker A V. Studies on the tolerance of plants to ammonium nutrition. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1969, 94: 235—239
- [ 28 ] Gerendás J, Zhu Z, Bebdixen R, et al. Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1997, 160: 239—251

- [29] Warncke D D, Barber S A. Ammonium and nitrate uptake by corn (*Zea mays L*) as influenced by nitrogen concentration and  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  ratio. *Agronomy Journal*, 1973, 65:950—953
- [30] Reisenauer H M, Clement C R, Jones L H P. Comparative efficacy of ammonium and nitrate for grasses. *Proceeding of 9th International Plant Nutrition Colloquia*, 1982, 2:539—544
- [31] Hinsinger P, Plassard C, Jaillard B, et al. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constrains: A review. *Plant Soil*, 2003, 248:43—59

## RESPONSES OF WINTER WHEAT TO AMMONIUM AND NITRATE NITROGEN

Miao Yanfang<sup>1</sup> Li Shengxiu<sup>2</sup> Xu Xiaofeng<sup>1</sup> Wang Zhaohui<sup>2</sup> Li Xiaohan<sup>2</sup> Fu Yanyan<sup>1</sup> Luo Laichao<sup>1</sup>

(1 *Agriculture School, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China*)

(2 *College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

**Abstract** Field experiments were conducted with 11 sites laid out in Yongshou, Shaanxi Province and 7 in Luoyang, Henan Province, and 5 soil samples for each site were collected in 20 cm increment to 100 cm depth, for analysis of initial nitrate N contents. In Yongshou, each experimental site had 7 treatments, i. e. control (without N fertilization), two kinds of nitrate N fertilizers (NN), two kinds of ammonium N fertilizers (AN), and two combinations of nitrate N + ammonium N (NN + AN) in a ratio of 2:1, while in Luoyang, each experiment site had only 6 treatments with only one kind of nitrate N fertilizer. In N all treatments, the N application rate was  $150 \text{ kg hm}^{-2}$  as basal fertilizer. The experiments were carried out to explore wheat responses to ammonium N fertilizers and nitrate N fertilizers and their relationships with nitrate N accumulation in different soil layers. Results show that the difference in yield increase between the two kinds of N fertilizers with the same N form was significantly smaller than that between N fertilizers different in N form. Comparison between the fertilizers different in N form in average of yield, yield increment ( $\text{kg hm}^{-2}$ ) and yield increase rate (%), Treatments NN were the highest in yield and yield increment, followed by Treatments NN + AN and Treatments AN in the end. In the experiments, yield increment and yield increase rate declined significantly with the increase in nitrate N accumulation in soil profile. The lower the nitrate N accumulation, the higher the crop response in yield and the more significant the effect of nitrate N fertilizer. It is, therefore, clear to see that nitrate N accumulation in soil profile is the major factor determining crop response to N fertilizer and effect of N fertilizers different in N form. Only in soils low in nitrate N accumulation, can N fertilizer be brought into full play, and can nitrate N show its significant superiority.

**Key words** Wheat; Nitrate N fertilizer; Ammonium N fertilizer; cumulative Nitrate N in soil profile

(责任编辑: 檀满枝)