

土壤-根系微区养分状况的研究

VI. 不同形态肥料氮素在根际的迁移规律*

钦绳武 刘芷宇

(中国科学院南京土壤研究所)

摘要

本文研究了不同形态氮肥施用后,氮素在作物根际的分布规律,及其与作物种类、土壤水分条件的关系。在淹水条件下的水稻根际土壤中, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 等 NH_4^+-N 肥,其亏缺率随离根面距离增加呈指数相关的减小。而旱作条件下的玉米、大麦、黑麦草等作物根际 NH_4^+-N 肥料在离根面 1-3 毫米内存在相对累积,然后再出现亏缺梯度。试验证明, NH_4^+-N 在旱作根际的相对累积,部分来源于根系分泌物。然而, NO_3^--N 肥即使在淋失量较大的情况下,无论在淹水水稻还是旱作根际土壤中均未测出亏缺,仅存在累积。

养分在根系-土壤界面间的迁移规律与植物根系的吸收性能、养分的供应种类和形态,以及根际周围的环境因素之间存在着密切的关系^[1,2]。在本项研究的第 III 报^[3]中,我们曾探讨了淹水条件下水稻根际氮素的变化规律。指出在水稻根际存在着肥料氮素的明显亏缺区。它的亏缺范围和亏缺量与生长的时间、根系的部位,温度以及与根系相接触的土壤体积等有关。然而,近年来有关旱作物如油菜、大麦、黑麦草、洋葱等的根际养分状况的报道中,都存在着养分的最大亏缺区并不象水稻那样从根面开始出现的现象,例如 Hendriks 等^[6]对离根不同距离的同位素代换性磷的测定,以及 Tan 等^[6]和 Claassen 等^[4]对根际代换性钾的分析结果都显示出在近根土壤中这些养分分别都有相对累积的现象。至于旱作条件下的根际氮素状况至今未见报道。

为此,本文对不同形态的氮肥施用后在根际的分布规律及其与作物种类和土壤水分条件的关系进行了研究。

一、材料与方 法

供试土壤为太湖湖积物发育的鳊血白土。施入土壤的肥料氮分别为用 ^{15}N 标记过的 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 和 K^{15}NO_3 。其浓度都为 100ppmN。根-土界面上应用每平方米 300 目的尼龙筛网和 1.2 微米孔径的混合纤维素微孔膜,作为隔层物,以保证根系及根毛不穿透进入土块。

供试作物为水稻、玉米、大麦和黑麦草。

集束平面根的培育,土样的制备,接触培育的方法,以及土壤样品的冰冻切片等均同参考文献[3]。

* 本文为国家自然科学基金资助课题。本项工作中全部 ^{15}N 均由本所技术室质谱组测定,谨此致谢。

二、试验结果

(一) 铵态氮肥在淹水水稻根际的亏缺

在淹水条件下,标记的 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{CO}$ 和标记的 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 一样,肥料氮素在水稻根际土壤中都出现明显的亏缺区。培育 6 天,亏缺区范围在 20 毫米左右。离根面越近,亏缺量越大。两种肥料氮素的亏缺百分率与离根面距离之间呈指数相关。两条亏缺曲线基本重合,最大亏缺率在 35% 左右。表明不同品种的铵态氮肥在水稻根际的亏缺趋势是相同的(图 1)。

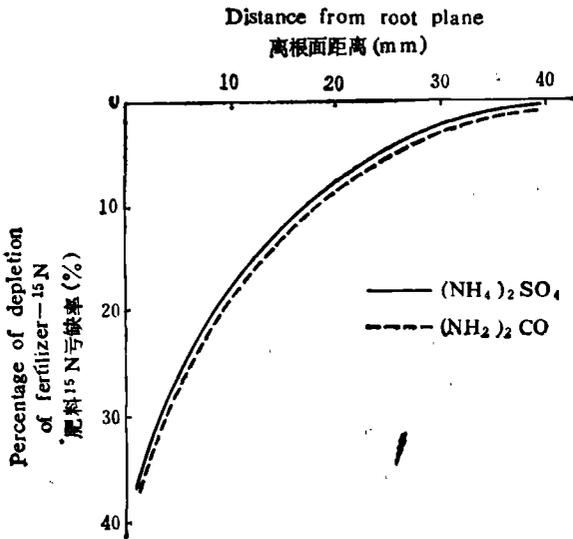


图 1 两种 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 肥料在水稻根际的亏缺情况

Fig. 1 Depletion of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ as $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ or urea in rice rhizosphere soil under submerged condition

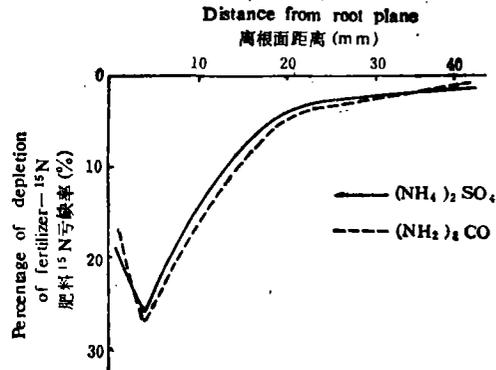


图 2 旱作条件下两种 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 肥料在玉米根际土壤中的分布情况

Fig. 2 Distribution of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the rhizosphere soil of maize under upland condition

(二) 铵态氮肥在旱作作物根际的相对累积

在旱作培育条件下, $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{CO}$ 肥料氮素在玉米、大麦、黑麦草等旱作作物根际土壤中也存在着明显的亏缺区。培育 6 天,主要亏缺范围在 20 毫米以内。但不同于淹水条件下水稻根际的肥料氮的亏缺状况。其最大亏缺率不是出现在紧靠根面的土壤中,而是出现在离根面 2 毫米左右的土层内(图 2),而在离根面 0—2 毫米的近根土壤中,铵态肥料氮素反而有明显的相对累积现象,离根面越近,这种相对累积值越高。而且这种现象在生长 6 天,12 天,18 天的不同时间下的大麦和黑麦草根际土壤中都同样存在(图 3、4)。其中生长 6 天的大麦,近根 1 毫米以内的亏缺率等于零,即未出现肥料氮的减少,随着远离根面的距离,出现亏缺率逐渐增大的浓度梯度。在 1—3 毫米处达最大亏缺率,以后变化趋势则相反,随着离根面距离的增加而亏缺率减小。生长 12 和 18 天时,虽然从根面开始与非根际土壤中的肥料氮相比也存在亏缺,但与最大亏缺率相比,仍然是

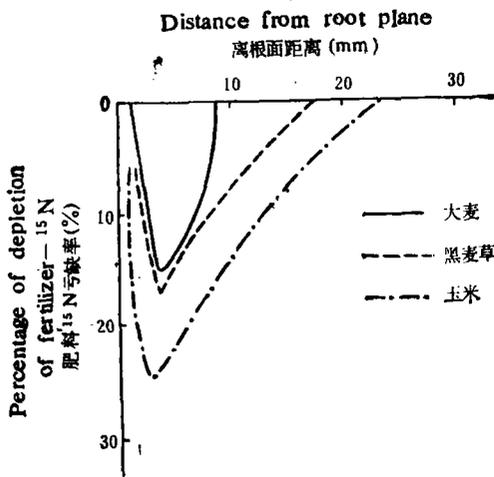


图3 (NH₄)₂SO₄ 肥料在生长6天的大麦、黑麦草和玉米根际土壤中的相对累积

Fig. 3 Relative accumulation of NH₄⁺-N in the rhizosphere soil of three crops under upland condition

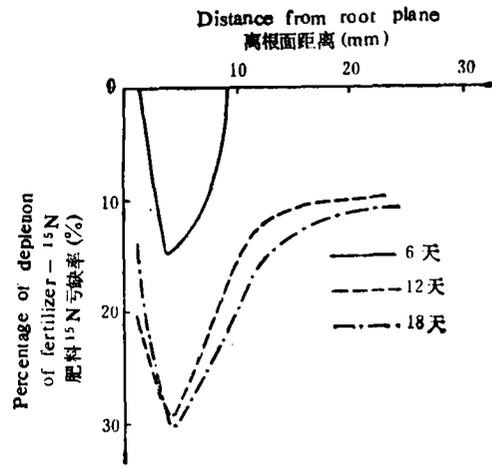


图4 (NH₄)₂SO₄ 肥料在生长6天、12天和18天的大麦根际土壤中的相对累积

Fig. 4 Relative accumulation of NH₄⁺-N as (NH₄)₂SO₄ in the rhizosphere soil of barley at different cultivated time

相对累积。

(三) 硝态氮肥在植物根际的累积

标记的 K¹⁵NO₃ 形态的 NO₃⁻-N 肥料, 在本试验条件下, 无论是旱作培育还是淹水培育, 肥料氮的淋失都较严重, 供试土壤中的肥料氮含量在培育6天后都显著减少。仅为原施入量的1—10%左右。然而即使在这样低量的肥料氮的情况下, 水稻和玉米靠根面0—5毫米土层内, ¹⁵NO₃⁻-N 都有明显的累积现象(图5)。而在离根面5毫米以外的根际土壤中, 肥料氮素含量和未种植物的对照相比几乎相同。表明旱作和水稻根际中的 NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N 相反, 存在明显的累积现象。

致于供试土壤中 NO₃⁻-N 含量迅速下降的原因, 除了严重的淋洗损失外, 作物对

表1 作物对不同形态肥料氮的吸收

Table 1 The amount of N taken up by crops from different forms of fertilizer-N

项 目 Item	水 稻 Rice			玉 米 Maize		
	KNO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄	(NH ₂) ₂ CO	KNO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄	(NH ₂) ₂ CO
砂培时每盆植株吸收的肥料氮(μgN)	1706	621	776	2671	353	349
吸收的 NO ₃ ⁻ -N 和 NH ₄ ⁺ -N 之比值		2.75	2.20		7.51	7.65
土培时每盆植株吸收的肥料氮(μgN)	989	428	450	1552	202	164
吸收的 NO ₃ ⁻ -N 和 NH ₄ ⁺ -N 之比值		2.29	2.20		7.68	9.46

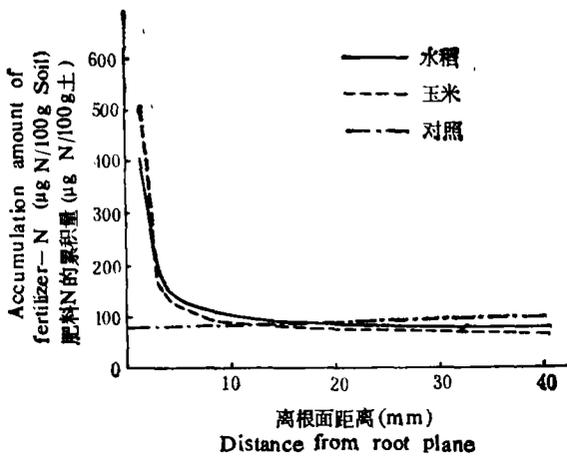


图 5 KNO_3 肥料在玉米和水稻根际土壤中的累积

Fig. 5 Distribution of NO_3^- -N in the rhizosphere soils of rice and maize

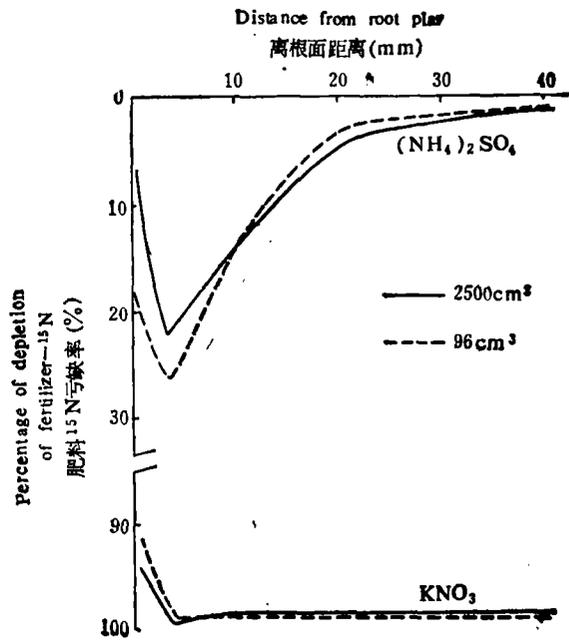


图 6 供氮土壤体积对玉米根际肥料氮的影响

Fig. 6 Effect of the soil volume on the distribution of fertilizer-N in the maize rhizosphere soil

表 2 根际供氮土壤体积对单位根面吸收肥料氮量的影响

Table 2 Effect of rhizosphere soil volume on the amount of N absorbed by each unit root surface area

项 目 Item		水 稻 Rice			玉 米 Maize		
		KNO_3	$(NH_4)_2SO_4$	$(NH_2)_2CO$	KNO_3	$(NH_4)_2SO_4$	$(NH_2)_2CO$
每平方厘米根面吸收的肥料氮量 (μgN)	供氮土壤体积 ($96cm^3$)	213.3	77.6	97.6	333.9	44.1	43.6
	供氮土壤体积 ($2500cm^3$)	123.6	53.5	56.3	194.0	25.3	20.5
两种供氮土壤体积的吸收比值(%)		58.0	68.9	58.0	58.1	57.5	47.0

NO_3^- -N 的吸收比 NH_4^+ -N 要高得多。在本试验的特定条件下,当土壤中 $(NH_4)_2SO_4$ 、 $(NH_2)_2CO$ 和 KNO_3 三种肥料中氮素浓度相同时,无论是淹水水稻还是旱作玉米,以及在砂培或土培的不同条件下,每盆植株所吸收的 KNO_3 中的氮素比吸收的 $(NH_4)_2SO_4$ 和 $(NH_2)_2CO$ 中的氮素要高得多,水稻要高 2.3 倍,而玉米则多达 8 倍左右(表 1)。

(四) 单位根面吸收量对根际氮素相对累积的影响

试验中应用单位浓度相同而供氮土壤体积不同的处理,人为调节单位根面吸收肥料氮素的数量。在根量相同的条件下,供氮土壤体积为 $2500cm^3$ 时,单位根面吸收的肥料氮

表3 水稻、玉米在不同培育条件下根际土壤中肥料 ^{15}N 的亏缺率(%)Table 3 Depletion rate of fertilizer- ^{15}N in the rhizosphere soil of rice and maize under different cultivation conditions

离根面距离(mm) Distance from root plane	水 稻 Rice		玉 米 Maize	
	淹 水 Submerged condition	旱 作 Upland condition	淹 水 Submerged condition	旱 作 Upland condition
1	37.0	13.3	4.2	0.8
2	33.2	22.4	17.7	21.8
3	30.8	27.3	18.3	25.4
4	28.5	23.6	17.5	22.7
5	25.5	22.8	16.3	21.5
10	17.3	12.4	11.4	12.8
20	7.7	3.0	4.1	2.0

为土壤体积 96cm^3 时的 58% (表 2)。也即供氮土壤体积增加时, 植株吸收的总氮量随着供氮土壤体积的增加而增加。例如, 玉米供氮土壤体积为 2500cm^3 时, 植株吸收三种肥料的平均总氮量为 1.12 毫克 N, 而当土壤体积为 96cm^3 时, 植株吸收的平均总氮量则为 0.64 毫克 N (测定的根系吸收面积为 8 平方厘米)。

然而, 单位根面积吸收氮量的差异虽然明显影响肥料氮亏缺率的大小, 但并不影响上述不同形态肥料氮在植物根际土壤中的迁移规律 (图 6)。在旱作近根微区内仍然存在着 NH_4^+-N 的相对累积, 以及 NO_3^--N 的向根系聚集现象。

(五) 土壤水分状况对根际铵态肥料氮相对累积的影响

如果将水稻根系与施用 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 肥料的土壤相接触, 然后放在土壤含水量为田间持水量 70% 的旱作条件下生长, 则铵态肥料氮在水稻根际土壤中的分布与淹水条件下不同, 它并不单纯表现为亏缺, 而是在近根 0—2 毫米的根际土壤中出现肥料氮的相对累积现象。这与玉米等旱作物根际土壤中铵态肥料氮的规律相一致 (表 3), 只是这种相对累积量要小一些。离根面 1 毫米处的土壤与亏缺率最大的 3 毫米处土壤相比较, 亏缺率只相差 14%, 而玉米则相差 24.6%, 后者的累积梯度要大得多。并且在近根 1 毫米处基本上不出现亏缺现象。然而, 当将玉米幼苗在淹水的条件下生长, 则近根土壤中虽然仍存在这种铵态肥料氮的相对累积现象, 但是近根 1 毫米土壤中肥料氮的亏缺率却由旱作条件下的 0.8% 上升到 4.2%, 与 3 毫米处仅相差 14.0%, 相对累积的梯度要小得多。而在离根面 2—5 毫米范围的土壤中, ^{15}N 的亏缺率比旱作条件下明显地减少。

三、讨 论

1. 上述结果指出, 不同形态的氮素在根际的亏缺和累积的规律不同。表明土壤中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 向根面的迁移机理不相同。 NH_4^+-N 在根际存在亏缺梯度, 因而扩散过程起着主要作用, 而 NO_3^--N 则相反, 在近根处富集, 随着植物吸收水分的过程, 作为溶质而向根面迁移, 也即依赖于质流过程。进一步证实了以往对这两种形态氮素迁移

机理的推论。

2. 不同种类的 NH_4^+-N 在根际的行为相似,但旱作与淹水条件下不同。旱作条件下近根氮素的相对累积, Harmesen 等曾认为是根际微生物聚集的结果^[5], 根据我们的试验, 将预先用 ^{15}N 标记的玉米于前述条件下在未标记的土壤上生长 6 天后, 观察到离根面 1 毫米的土壤中, 可测出含有相当数量的 ^{15}N , 平均为 174 微克 N/100 克土, 2 毫米处为 45 微克 N/100 克土。而在 2 毫米以外, 则含量甚微, 几乎与对照相近。表明离根面 2 毫米以内相对累积的 ^{15}N , 部分来源于根系的分泌物。而水稻根际未见这种累积现象, 可以认为水稻根系的分泌物明显小于旱作。同时, NH_4^+-N 在根际相对累积的量, 可以看成是根系吸收和溢泌量之间的差值, 由于吸收量一般都明显大于溢泌量, 因此, 近根的累积只是相对的, 其绝对值仍低于原有土壤中的肥料氮量。

3. 旱作近根土壤中不仅氮素有相对累积的现象, 而且磷、钾也显示了类似的结果。Hendriks 等(1981)应用 ^{32}P 自显影的定量测定结果表明, 砂壤土上玉米根际的最大亏缺率出现在离根面 0.5 毫米处, 在此范围以内, 同位素代换磷事实上存在着大于 10% 的相对累积量^[6]。其中油菜比玉米更为明显。而 Kuchenbuck 和 Jungk (1984) 在粉砂壤土上对油菜幼苗根际代换性钾的测定^[7], 以及 Claassen 等(1986)在高钾水平下油菜近根土壤 1 毫米以内都存在这种现象^[4]。相比之下, 代换性钾的相对累积量和累积范围明显大于代换性磷, 但小于本文中的 NH_4^+-N 。这既符合这三种养分有效扩散系数的差异, 同时也与分泌物中一般以含氮的有机化合物, 如氨基酸等为主要组成成分相一致。然而, 上述的一些报道中, 由于作者着眼于数学模拟, 对离根不同距离化学测定的结果仅用以验证计算值。因此, 对近根养分浓度的相对变化并未予以注意和讨论。事实上, 一些旱作苗期根表面氮、磷、钾等养分的聚集, 看来是客观存在。可以认为是由分泌物、降解物等形成的根外粘液层^[9], 从某种意义上是根-土界面上养分的聚积“库”。因为除了根系的分泌物外, 在此范围以外存在的浓度梯度, 有可能使养分通过扩散也聚集到“库”内, 形成有利于植物根系直接在根表的吸收利用。

4. 在推论这种近根土壤中氮素相对累积的现象时, 也不排除在离根 1 毫米的土壤中有根毛混入而提高了氮素含量的可能性。但是, 大于 2 毫米的相对累积区, 根毛只能被看作为很次要的因素。

参 考 文 献

- [1] 刘芷宇, 1980: 土壤-根系微区养分环境的研究概况。土壤学进展, 第 3 期, 1—11 页。
- [2] 许曼丽, 刘芷宇, 1983: 土壤-根系微区养分状况的研究, II. 钾离子的富集与亏缺。土壤学报, 第 20 卷 3 期, 295—302 页。
- [3] 钦绳武, 刘芷宇, 1984: 土壤-根系微区养分状况的研究, III. 水稻根际氮素的变化。土壤学报, 第 21 卷 3 期, 238—246 页。
- [4] Claassen, N., Syring, M., Jungk A., 1986: Verification of a mathematical model by simulating potassium uptake from soil. Plant and Soil, 95: 209—220.
- [5] Harmesen, G. W., and Jager, G., 1962: Determination of quantity of C and N in the rhizosphere of young plants. Nature, 195: 1119—1120.
- [6] Hendriks, L., Claassen, N., Jungk, A., 1981: Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd., 144: 486—499.
- [7] Kuchenbuck, R., and Jungk, A., 1984: Influence of potassium supply on the availability of potassium in the rhizosphere of rape. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd., 147: 435—448.

- [8] Tan, K. H., and Nopamornbodi, O., 1981: Electron microbeam analysis and scanning microscopy of soil-root interface. *Soil Sci.*, 131: 100—106.
- [9] Vermer, J., and McCully, M. E., 1982: The rhizosphere in Zea: New insight into its structure and development. *Planta.*, 156: 45—61.

THE NUTRIENT STATUS OF SOIL-ROOT INTERFACE

VI. DISTRIBUTION OF DIFFERENT FERTILIZER-N IN RHIZOSPHERE SOIL

Qin Shengwu and Liu Zhiyu

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing*)

Summary

Nitrogen fertilizer status in the rhizosphere varied with different N forms and the soil moisture condition. It was revealed that there existed a depletion zone of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in rice rhizosphere under submerged condition. The exponential correlation was found between the depletion rate and the distance from the root surface for both $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$. The depletion of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was also observed in the area of 1—3 mm from root plane of upland crops, such as maize, barley, and ryegrass. Being different from that of rice, the maximum of depletion value was not near the root surface. In other words, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was relatively accumulated in the rhizosphere soil within the rhizosphere area of 1—3 mm from the root plane. The further results showed that a considerable amount of labelled nitrogen was detected in the rhizosphere of upland crops, indicating part of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ relatively accumulated near the root surface is contributed by the nitrogen exuded from the plant root. The amount of exuded N or the rate of relatively accumulation of N was related to the crop species and soil water condition. On the contrary, in the case of $\text{NO}_3^-\text{-N}$, significant accumulation of labelled $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was found in the zone of 0—5 mm from root plane of both rice and maize under either submerged or dryland condition. It can be considered that $\text{NO}_3^-\text{-N}$ is mainly transferred to the root by mass flow, which is different from ammonium nitrogen by diffusion, and accordingly it is not depleted but accumulated in the plant rhizosphere soil.