

小麦和玉米叶面标记尿素态 ^{15}N 的吸收和运输*

沈其荣 徐国华

(南京农业大学资源与环境科学学院、农业部“作物生长调控”重点开放实验室, 南京 210095)

摘要 以 ^{15}N 标记的尿素作为叶面施肥和根系后期追肥的 N 肥品种, 分别采用土培与砂培研究小麦与玉米拔节后至灌浆初期不同生育期、不同 N、P 和 K 肥叶面配施后作物对叶面 N 肥利用效率、叶面施用 N 肥的分配及对全株 N、P 和 K 养分状况的影响。无论是小麦还是玉米叶片均能有效地吸收 N 素并将其迅速转移。玉米拔节期下位叶(第 5 叶)施肥, 植株吸收的 ^{15}N 转移到根部的比例平均为 9.0%, 而中位叶(第 8 叶)处理, 分配到根系的比例仅为 2.4%。叶面施用尿素态氮肥的 N 在小麦地上部的回收率一般在 54.5%~68.9%, 在玉米全株体内的回收率可达 59.9%~75.3%。随生育期推迟, 两种作物叶片吸收 N 的回收利用率均明显提高。与单施氮肥相比, N、P 和 K 肥配施均有提高氮素回收率和改善作物地上部 N 素营养的作用, 尤以中位叶(第 8 叶)配施尿素 + KH_2PO_4 的效果最佳, 表明植物的叶面营养仍应注意平衡供应和适宜的施用时期与施肥部位。叶面大量元素营养不仅改善了所施肥料成分中相应元素的营养状况, 同时也促进了对其他两种成分的吸收, 并且提高了 N、P 转运到籽粒中去的比例。玉米吐丝期根系追施的尿素态 N 有 56% 积累在籽粒中, 而叶面施肥所利用的 N 分配在籽粒中的比例为 70%。

关键词 同位素示踪法, 尿素, 小麦, 玉米, 叶面营养

中图分类号 S143.1

作物叶片能吸收营养元素和生长调节剂已是众所周知的事实, 过去的三十多年里, 由于同位素示踪技术及其他相应的分析测试技术的发展, 大大地促进了作物叶面营养的研究^[1~3], 但由于叶面施肥每次提供的养分数量有限, 无论在生产或研究上主要集中在微量元素的效果与作用机理方面, 对大量元素的叶面营养功能多数还是以根系吸收特征为参考依据^[1]。作为土壤施肥的补充和营养元素各自的一些独特功能, 叶面营养特别需要强调不同元素在作物生育过程中的应用时期及其再运输和分配特征。然而, 有关养分离子通过作物叶面吸收后的再运输和回收利用率, 特别是不同生育期和不同叶位的利用差异研究甚少^[4]。尿素因呈非极性的中性分子形态, 通常被认为是用于叶面施肥中毒性最小、效果最好的氮素肥料^[5,6]。因此, 本试验以小麦和玉米作为供试作物, 通过 ^{15}N 标记比较研究谷类作物不同生育期及不同叶位叶面尿素态 N 吸收、利用效率和对植株养分状况的影

* 国家自然科学基金资助项目(39470423)

收稿日期: 1999-06-30; 收到修改稿日期: 2000-03-21

响。

1 材料与方方法

1.1 玉米砂培试验

玉米品种:掖单13号,紧凑型。每盆装石英砂18kg,用 $\phi 35\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的塑料桶,采用霍格兰(Hoaglan)完全营养液^[7],进入拔节期后,视玉米生长速度,每隔7~10天更换一次营养液。玉米经催芽后,5月8日播种,出苗后每盆定植3株,拔节孕穗后(6月17日)每盆定植1株。分别在拔节孕穗期(6月17日),抽雄期(7月7日),吐丝期(7月27日)叶面追施3次。叶面追施前先更换营养液。选取中位叶(第8叶)进行不同营养液的涂抹处理,其中拔节孕穗期(6月17日)同时增加下位叶(第5叶)的处理。将含有37.28mg N(8ml 10g/L或4ml 20g/L的¹⁵N标记的尿素), 18.22mg P(8ml 10g/L或4ml 20g/L的 KH_2PO_4)和22.98mg K(8ml 5.4g/L或4ml 10.8g/L的KCl或来自 KH_2PO_4 的K)的8ml溶液在下午3时后分次均匀涂抹于叶片正反两面(约需3h)。叶面营养液配比和用量见表1。尿素的¹⁵N丰度为101.9g/kg。同时在吐丝期(7月27日)将额外的40ml 10g/L ¹⁵N标记的尿素加入到霍格兰完全营养液中,进行根部追肥处理,比较玉米后期叶面与根系追肥效果。分别于7月7日,7月27日和8月16日采取处理的植株,分根、茎、叶鞘、不同部位叶片、穗或苞谷及籽粒测定生物量与养分包括¹⁵N的吸收分配数量及根系活性。每个处理均重复3次。

1.2 小麦土培试验

供试土壤为黄棕壤,采自田间0~30cm层,其基本性状为:pH: 5.83,全氮(N):1.08g/kg,有效磷(P, Olson法):17mg/kg,速效钾(K):115mg/kg。每盆装风干土10kg,基肥用量:N,0.15g/kg; P,0.05g/kg; K,0.10g/kg。95年11月30日播种,小麦品种:长江9409。出苗后,每盆定植4株。分别于小麦拔节孕穗期(3月28日),抽穗期(4月17日),齐穗期(4月27日)进行叶面施肥处理。分别用置于小试管中的15ml不同营养液浸泡每穗的倒数第2叶叶片,每盆处理4叶。N、P、K肥料的种类和浓度同玉米试验(见表1)。每个处理重复3次(12张叶片)。浸泡分2次进行,中间间隔2h,共浸泡4h。采用美国Michigan大学Jung

表1 玉米和小麦大量元素叶面施肥处理

Table 1 Foliar feeding treatments of nutrition on corn and wheat

处理号	叶面营养液 Foliar nutrient solution	小麦Wheat				玉米Corn			
		15ml浸泡溶液所含总养分量(mg)				8ml涂抹溶液所含养分量(mg)			
		Nutrient amount in 15ml solution				Nutrient amount in 8ml solution			
		dipped on leaf (mg)				dipped on leaf (mg)			
		N	¹⁵ N ¹⁾	P	K	N	¹⁵ N ¹⁾	P	K
1	CK	0	0	0	0	0	0	0	0
2	10g/L Urea- ¹⁵ N	69.90	6.870	0	0	37.28	3.664	0	0
3	5.5g/L KCl	0	0	0	3.10	0	0	0	22.98
4	10g/L KH_2PO_4	0	0	34.17	43.10	0	0	18.22	22.98
5	10g/L Urea- ¹⁵ N+5.5g/L KCl	69.90	6.870	0	43.10	37.28	3.664	0	22.98
6	10g/L Urea- ¹⁵ N+10g/L KH_2PO_4	69.90	6.870	34.17	43.10	37.28	3.664	18.22	22.98

1) 按照N标记尿素的¹⁵N丰度为101.9g/kg,减去其自然¹⁵N丰度3.62g/kg计算。Calculated on difference between 101.9g/kg ¹⁵N in the labeled urea-N and 3.62g/kg of nature ¹⁵N content

W.H等提出的叶片清洗技术^[1]和同位素示踪法^[8]研究¹⁵N标记的尿素被小麦叶片吸收和分配状况,每个处理均重复3次。本试验目的主要分析在短(3~4h)的吸收和部分残留在叶面上的尿素态氮在体内的再利用分配过程及其利用效率,因此虽然对玉米、小麦采用两种不同的叶面施肥方式,其结果仍然有一定的可比性。不同叶面施肥处理对两种作物的生物产量的影响见另文^[9]。

1.3 测定方法

¹⁵N丰度:采用光谱法^[9]。

土壤和植株 N、P、K 及籽粒蛋白质分析测定:参见土壤农化分析^[10]。

2 结果与分析

2.1 不同生长阶段和叶位的¹⁵N利用

表2显示小麦同叶位叶面尿素态¹⁵N的引入量在孕穗期明显高于齐穗期,但是在地上的回收率后期反而比前期高,这可能叶面吸收的N向籽粒运转的比例在齐穗期(64.5%~68.9%)较孕穗期(60.3%~61.6%)高有关。尿素与KCl尤其是与KH₂PO₄配施不仅显著增加了叶片引入N的数量,而且减少了在浸泡叶中的N残留率。

比较拔节期与吐丝期玉米叶片尿素的回收率(表3)可以看出,虽然因定量涂抹,叶片引入的N数量相等,但吐丝期的N素在植株体内损失较小,其回收率比拔节期高出6.5%~9.5%。此外,中位叶片引入的N利用率也高于下位叶,这同样可能与吸收的N再向其他部位的运转速度与比例不同有关。与小麦叶片吸收N类似,叶面肥料中增加P、K成分,提高其N素的利用率。但KCl与KH₂PO₄作用似乎相差不大。

表2 小麦孕穗期与齐穗期叶面尿素态¹⁵N的利用

Table 2 Utilization of foliar applied urea-¹⁵N at two growing periods of wheat

处理 Treatment	孕穗期 Ear bearing (3/28) ¹⁾				齐穗期 full heading (4/27) ¹⁾			
	引入量 ¹⁵ N input μ g/leaf	回收率 N recovery (%)	浸泡叶残留 Remained in dipping leaf (%)	籽粒分配 ¹⁵ N in grain (%)	引入量 ¹⁵ N input μ g/leaf	回收率 N recovery (%)	浸泡叶残留 Remained in dipping leaf (%)	籽粒分配 ¹⁵ N in grain (%)
Urea- ¹⁵ N	202.4	54.5	12.9	60.3	168.5	60.0	19.7	64.5
Urea- ¹⁵ N+KCl	224.5	56.4	11.1	62.3	218.8	65.7	16.9	68.0
Urea- ¹⁵ N+KH ₂ PO ₄	237.1	58.4	9.9	61.6	223.5	64.9	15.5	68.9

1) 括号内数字为各生育期开始日期

2.2 不同器官中的¹⁵N分配

N素是作物体内最容易再移动的元素之一,通过叶面吸收的N的再分配自然是叶面施肥应用中最为关心的内容之一。从图1与图2可以看出,对玉米而言,与下位叶(第5叶)相比,拔节期中位叶(第8叶)施N,有利于N向上部叶(第9~13叶)与鞘运转,大大减

(1) Jyung W H. Foliar absorption of mineral nutrients with special references to the use of radioscopy and the "leav washing technique". M. T. Thesis, Michigan State University, East lansing, USA. 1959, 45~51

少根部的分配比例。

表3 玉米拔节期与吐丝期下位叶与中位叶叶面尿素态¹⁵N的利用

Table 3 Recovery amount and rate of urea-¹⁵N applied on different positions of corn leaf (mg ¹⁵N/plant)

处理 Treatment	拔节期 Jointing (6/17) ¹⁾				吐丝期 Silking (7/25) ¹⁾	
	5位叶 The fifth leaf		8位叶 The eighth leaf		8位叶 The eighth leaf	
	回收量 Recovery amount	回收率 Recovery rate(%)	回收量 Recovery amount	回收率 Recovery rate(%)	回收量 Recovery amount	回收率 Recovery rate(%)
Urea- ¹⁵ N	2.175	59.9	2.266	62.4	2.568	70.71
Urea- ¹⁵ N+KCl	2.223	61.2	2.496	68.8	2.735	75.3
Urea- ¹⁵ N+KH ₂ PO ₄	2.222	61.2	2.383	65.6	2.726	75.1

1) 括号内数字为各生育期开始日期

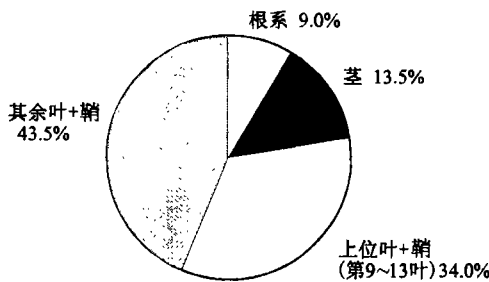


图1 玉米拔节期第5叶施用的尿素态¹⁵N在体内的分配 (平均值)

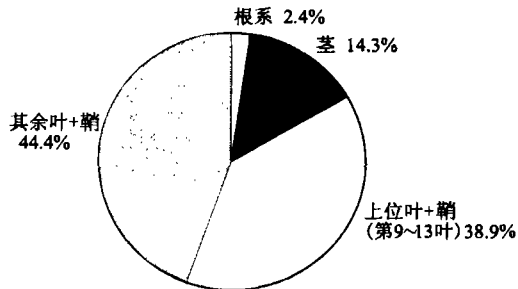


图2 玉米拔节期第8叶施用的尿素态¹⁵N在体内的分配 (平均值)

Fig.1 Average distribution ratio of urea-¹⁵N

Fig.2 Average distribution ratio of urea-¹⁵N

applied on the fifth leaf in jointing stage of corn

applied on the eighth leaf in jointing stage of corn

小麦生育中后期单株功能叶片数量少,但叶面吸入的N除了9.9%~19.7%残留在本叶外,约75%运输到茎秆与穗中,只有约7%~12%的N被包括剑叶在内的其余叶片和鞘利用(表2和图3、图4)。特别值得一提的是叶片N与P、K配施可促进叶片吸入的N向小

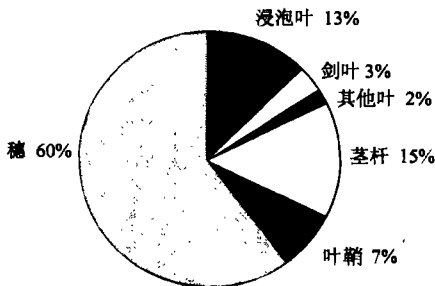


图3 小麦孕穗期叶面施用尿素¹⁵N在体内各部位的分配比率

Fig.3 Distribution ratio of urea-¹⁵N applied on the second leaf from top in ear-bearing stage of wheat

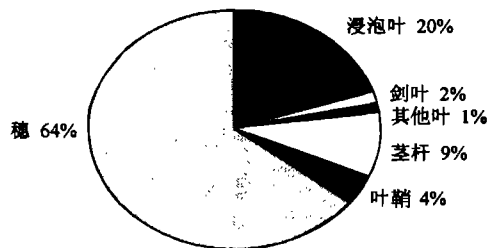


图4 小麦齐穗期叶片施用尿素¹⁵N在体内的分配比率

Fig.4 Distribution ratio of urea-¹⁵N applied on the second leaf from top in full heading stage of wheat

麦茎秆,尤其是向穗部运转,其中这种效应在齐穗期比孕穗期更为明显(图 5、图 6),而在浸泡叶、剑叶、其他叶和叶鞘部位的分配数量相差不大。同样,图 7 显示与单施尿素相比,叶面 P、K 与 N 配合主要是通过促进 N 素向穗部的运转,从而提高其利用率。

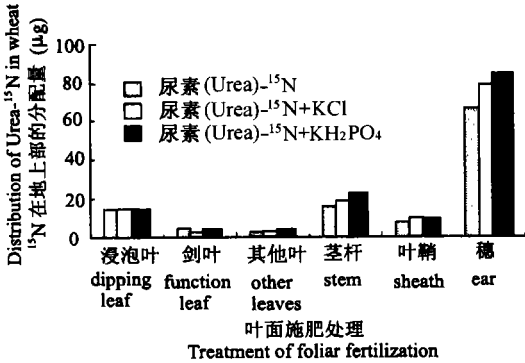


图5 小麦孕穗期叶片施用尿素态¹⁵N 在体内的分配

Fig.5 Distribution of urea-¹⁵N applied on the second leaf from top in ear bearing stage of wheat

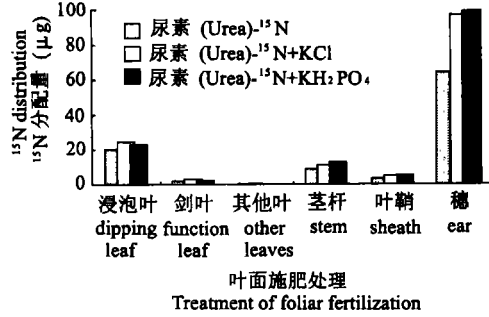


图6 小麦齐穗期叶面施用的尿素态¹⁵N 在体内的分配

Fig.6 Distribution of urea-¹⁵N applied on the second leaf from top in full heading stage of wheat

2.3 后期叶面施肥与根系追施的¹⁵N 利用比较

一般认为谷类作物灌浆期叶片养分和碳水化合物因大量地被运移到籽粒中去而迅速消耗,因此灌浆初叶面施肥通常是养分发挥效率最大的时期^[2,3,11]。本试验通过玉米吐丝期在砂培营养液中追施和叶面涂抹标记的¹⁵N 尿素肥料追踪后期 N 肥被利用的状况。表 4 显示玉米吐丝期通过根系吸收仍然能获得一定量的 N 素养分,但利用率较低,并且配合追施 KH_2PO_4 基本上不影响 N 素利用。相反,叶面施用量尽管只有根施的 1 / 5,但利用率且是根施的 3.5 倍左右。叶面 N、P 和 K 的配施可提高植株体内 N 素的回收利用率。

玉米生育后期通过根系或叶片吸收的 N 在体内的分配利用也有较大差距。从图 8、图 9 可以看出,虽然后期吸收的 N 绝大部分运转到苞谷,但留在根部和茎秆的 N 的比例根施的较高(约占 28%),叶片施用的较低(仅 14%),这 14% 的差异体现在叶片追施的 N 更有利于向苞谷中转移。

2.4 磷、钾的吸收和分配

表 5 显示了作物叶片单施用 N 肥对全株 P、K 养分状况的影响。小麦叶片施尿素 N 不

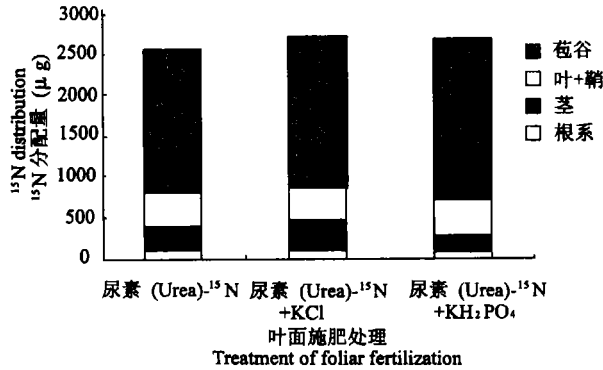
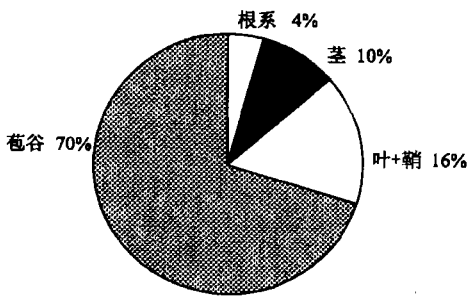
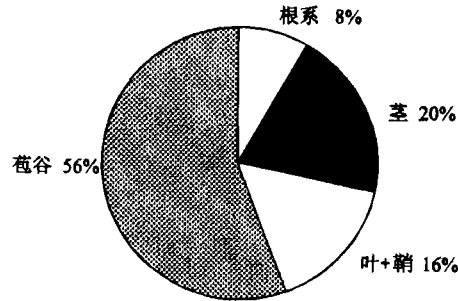


图7 不同叶面营养组合对玉米叶片吸收尿素态¹⁵N和在体内分配的影响

Fig.7 Effects of different foliar fertilizers on the uptake and distribution of foliar urea-¹⁵N in corn plant

表4 玉米吐丝期叶面与根系追施尿素态 ^{15}N 肥的利用和体内的分配Table 4 Utilization and distribution of urea- ^{15}N foliar applied or root top dressed at silking stage of corn

处理 Treatment	叶施 Foliar application		根部追施 Root top dressing	
	^{15}N 用量 (mg) ^{15}N application	利用率 Recovered rate(%)	^{15}N 用量 (mg) ^{15}N application	利用率 Recovered rate(%)
Urea- ^{15}N	3.664	70.71	18.32	21.17
Urea- ^{15}N + KH_2PO_4	3.664	75.07	18.32	21.02

图8 玉米吐丝期叶面施用的尿素态 ^{15}N 在体内的分配比率Fig.8 Distribution ratio of urea- ^{15}N foliar applied at silking stage of corn图9 玉米吐丝期根系追施尿素态肥料的 ^{15}N 在体内的分配Fig.9 Distribution of urea- ^{15}N root top dressed at silking stage of corn

仅促进了 P 和 K 的吸收,同时也向穗部运转的比率有所提高。但玉米的情况不太一样,虽然叶面施 N 肥也增加了植株 K,特别是 P 的总吸收量,但转移到籽粒中的比率 P 基本不变,而 K 反而有所下降。

表5 叶面施用氮肥对植株P和K营养状况的影响

Table 5 Effects of foliar nitrogen fertilization on phosphate and potassium status of corn and wheat plants

处理 Treatment	小麦 Wheat				玉米 Com			
	P		K		P		K	
	穗 Ear	全株 Total plant	穗 Ear	全株 Total plant	穗 Ear	全株 Total plant	穗 Ear	全株 Total plant
对照 CK (mg/plant)	4.29	7.39	7.85	28.74	70	121	506	1320
尿素 Urea (mg/plant)	4.85	7.85	9.53	32.55	85	146	522	1405
增加 Increment (%)	13.05	8.93	21.40	13.26	21.43	20.66	3.16	6.44

3 讨 论

作物施肥的养分效率首先体现在养分的利用率,叶面施肥的高效率表现在吸收运转的速度快和养分回收利用率^[2,12]。已有一些关于通过叶面施肥迅速矫正作物养分缺乏和叶片吸收的养分在体内再分配的研究报告^[13~15],如 Below 等^[3]的研究结果表明,与原先存在叶片、叶鞘、根系的 N 素相比,叶面施用的 N 是可以最能迅即重新运移的 N 源。然而

因测定困难、方法误差大,叶面肥料养分的利用率过去多是定性的概念,几乎没有见到定量方面的试验报告^[12,14]。本研究通过¹⁵N标记,表明从叶片引入到植物体内的N仍然大约有25%~40%被损失掉(表2、表3)。虽然小麦地上部¹⁵N的回收率(54.5%~68.9%)比玉米全株的回收率(59.9%~75.3%)要低,但考虑到部分¹⁵N可能转移到小麦根系,因此总体来说,两种作物叶片吸收的尿素态N在体内的利用率相差很小。适当延迟叶面施肥时期和充分考虑N、P和K的平衡施肥,是减少N素养分在体内的损失,提高回收利用率的重要措施。本试验中玉米因采用砂培,所以后期根系活力仍然较高,至吐丝期根系能继续从栽培溶液中吸收较多的养分。但此时根系追施5倍叶面施用量的N肥,其利用率仍然不到叶面施用的1/3(表4)。这种差异可能会随着作物本身的营养状况和栽培溶液养分的总浓度不同而有所变化,特别是会受不同生育期和根系活力的影响。

无论是小麦叶片引入N量,还是两种作物体内叶面N素利用率的提高均是同改变吸收的N在体内各部位的分配有关。总的来说,引入的N在浸泡或涂抹叶的残留及根系和下位叶的分配比例愈低,向籽粒部位的运转比例则愈高,叶片吸入的N在体内的总回收率也就愈高(图1、2、3和4)。值得一提的是玉米拔节期无论是下位叶(第5叶)或中位叶(第8叶)施肥,留在中下位叶的¹⁵N比例较高(分别为43.5%和44.4%)(见图1、图2),这可能主要第8叶是玉米的第1果穗叶,叶片引入N的较大部分留在这个部位,这与我们过去在黄瓜作物上的试验结果是一致的^[15],即作物叶面吸收的N首先向新生长点转移。

因本试验叶面施肥的数量有限,从实际收获的生物量差异来看^[16],尽管叶面施肥所有处理均高于对照,但只有尿素+KH₂PO₄处理较对照有显著增产。叶面尿素或KH₂PO₄或它们的配合施用,小麦籽粒粗蛋白质绝对含量可提高15g/kg~22g/kg,玉米可提高4.0g/kg~4.9g/kg,这表明叶面大量元素中后期施肥对体内养分,特别是氮素,再分配的促进作用可能比生物量增加更为显著。

参 考 文 献

1. Hanway J J. Foliar application of fertilizers on grain crops. *In*: Neumann P M. ed. Plant Growth and Leaf-applied Chemicals. USA: CRC Press Inc. 1998. 101~109
2. Gooding M J. Foliar urea fertilization of cereals: a review. *Fertilizer Research*, 1992, 32:209~222
3. Below F E, Crafts-Brandner S J, Harper J E. Uptake, distribution and remobilization of ¹⁵N-labeled urea applied to maize canopies. *Agron. J.* 1985, 77:412~415
4. Seshadri K. Role of foliar fertilization on plant nutrition. *In* Baligar V C, Duncan R R. eds. Crops as Enhancers of Nutrient Use USA: Academic Press Inc., 1990. 313~347
5. Bowman D C, Paul J L. The foliar adsorption of urea. *J. Plant Nutr.*, 1990, 13:105~113
6. Below F E, Lambert R J, Hageman R H. Foliar application of nutrients on maize. *Agron. J.*, 1984, 76: 773~776
7. 毛达如主编. 植物营养研究方法. 北京:北京农业大学出版社, 1994, 12~23
8. 陈铨荣,米恩富. 用光谱法测定土壤和植物中的微量¹⁵N. *原子能农业应用*, 1987, 2: 48~52
9. 徐国华,沈其荣,郑文娟等. 小麦和玉米中后期大量元素叶面施肥的生物效应. *土壤学报*, 1999, 36(4): 454~462
10. 史瑞和,鲍士旦主编. 土壤农化分析. 北京:中国农业出版社, 1986
11. Neumann P M. Late season foliar fertilization with macronutrients—is there a theoretical basis for increased yields? *J. Plant Nutr.*, 1982, 5:209~213
12. Lundahl W S. Autoradiography as an aid in determining the grass absorption and utilization of foliar applied

- nutrients. *Plant Physiol.* 1995, 26(1):792~797
13. Bowman D C, Paul J L. Volatilization and rapid depletion of urea spray—applied to Kentucky bluegrass turf. *J. Plant Nutr.*, 1990, 13(10):1335~1344
14. 徐国华, 沈其荣. 叶面营养对黄瓜生物效应的影响. *植物营养与肥科学报*, 1997, 3(1): 36~42
15. 沈其荣, 徐国华. 不同叶面营养组分对黄瓜叶面氮素营养的影响. *南京农业大学学报*, 1998, 21(1): 66~71

FOLIAR ABSORPTION AND TRANSLOCATION OF LABELLED UREA-¹⁵N IN CORN AND WHEAT

Shen Qi-rong, Xu Guo-hua

(College of Resources and Environmental Sciences and MOA Key Lab of Plant Growth and Regulation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

Summary

It has been established that plant leaves and other above-ground parts are capable of absorbing chemicals and nutrients. However, there is scarce information regarding translocation and recovery rate of ion uptake via leaves during different growing stages. Urea has generally been found to be the least toxic and most effective form of N for foliar application because of its nonpolar and undissociated characteristics. ¹⁵N-labelled urea combined with KCl or KH₂PO₄ was both applied on selected leaves of corn and wheat at different middle-latter growing periods. The top dressing of ¹⁵N-labelled urea in sand culture of corn at silking stage was also investigated to compare the effects of different foliar and root top dressing on plant growth. The N input in leaves of both crops was remobilized rapidly to other organs. For summer corn, the transferred percentages into roots of ¹⁵N input in lower (the fifth leaf) and middle (the eighth leaf) leaf were 9.0% and 2.4%, respectively, at jointing stage. Recovery rate of leaf-input urea-¹⁵N in whole corn plant ranged in 59.9%~75.3%, while the rate in above-ground part of winter wheat was in 54.5%~68.9%. There was very similar tendency for the two crops that the ¹⁵N recovery rate taken up via leaves was apparently increased as delay of application period. Compared with urea feeding alone, combined foliar application of urea with KCl or KH₂PO₄ increased the recovery rate and improved the N nutritional status of whole plants, in which the optimum treatment for corn was foliar feeding of urea plus KH₂PO₄ to middle leaf. Therefore foliar fertilization should also focus on balance supply, suitable application stage and leaf position. Foliar feeding of N or P and K fertilizer not only improved the corresponding nutrient status in plants, but also stimulated root uptake of the other two nutrients and increased translocation ratio of N and P to grain. The finally accumulated ratios of labelled urea-¹⁵N in grains top-dressed via the roots and leaves at silking period were 56% and 70%, respectively.

Key words Isotope-labelled method, Urea-¹⁵N, Wheat, Corn, Foliar Nutrition