

促根剂对太湖地区水稻生长、产量及氮素利用的影响^①

杨晓云^{1,2}, 李文军^{1,2}, 颜晓元^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为研究一种促根剂对太湖地区水稻生长及氮肥利用的影响, 设置添加促根剂和不添加促根剂两种处理, 在 5 个施氮水平下分别测定水稻的生物量、产量和氮素利用率。结果表明: 在相同施氮水平下促根剂可以增加水稻生物量, 其中在施氮量 150、200、250 kg/hm² 施肥水平下, 抽穗期和灌浆期地上部生物量的增加幅度分别为 17.95%、8.63%、11.09% 和 2.16%、12.13%、11.47%, 存在显著性差异; 促根剂明显增加了拔节期水稻根系干重, 由低到高各施氮水平下的增幅依次为 27.40%、8.52%、26.12%、6.85%、7.21%。促根剂有一定的增产效果, 并且在氮肥用量大时效果更为明显。在 250 kg/hm² 施肥水平, 促根剂处理比不添加促根剂的处理增产 5.79%, 达到显著性差异水平。促根剂在一定程度上提高了水稻吸氮量、氮素农学利用率、氮素吸收利用率, 高氮肥施用水平下表现明显, 250 kg/hm² 下分别高出不添加促根剂的处理 7.14%、33.26%、10.91%。

关键词: 促根剂; 水稻; 生长; 产量; 氮素利用率

中图分类号: S511.4, S143.1

氮素是现代高度集约农业生产最重要的营养元素, 氮肥的施用从 20 世纪初就被人类所重视, 其增产效应也是有目共睹的, 美国科学家 Torbert 等^[1]认为如果立即停止施用氮肥, 全世界的农作物产量将减少 40%~50%。我国是农业大国, 据世界粮农组织统计^[2], 目前我国氮肥用量占全球氮肥用量的 30%, 是美国的 6.9 倍, 已成为世界第一氮肥消费大国。施用大量氮肥能使作物大幅增产, 但同时由此带来的负面效应也引起了广泛的关注。据有关文献资料统计^[3-4], 在过去的 30 年中, 氮肥利用率呈直线下降趋势, 20 世纪 70 年代为 50%~60%, 80 年代为 40%, 90 年代后的表现利用率只有 30%~35%, 高产地区已降至 30% 以下。不仅仅肥效利用率大幅度降低, 其引起的环境负效应也越来越严重。由于氮肥的不合理施用引起了一系列土壤-水体-大气环境及农产品品质问题, 包括土壤酸化^[5]、土壤次生盐渍化^[6-7]、地下水污染^[8]、地表水富营养化^[9-10]、温室气体排放加剧温室效应^[11-12]、农产品品质下降^[13]等。

目前增加产量、提高氮素利用率的措施主要是从 3 个方面着手: 作物品种、管理措施及肥料品种。针对前两个方面科研工作者们进行了大量的试验研究, 发表了一系列关于水稻氮高效基因型品种、优质高产、

抗病等新品种的研究成果^[14-15], 同时开展了一系列实时实地氮肥管理、测土配方施肥、水肥调节、平衡施肥等措施^[16-19]。美国测土配方施肥开始较早, 在长期开展试验研究工作的基础上, 各州都建立了土壤养分丰缺和推荐施肥指标体系^[20]。与美国相比, 我国由于土地利用类型变化大, 土壤利用方式多种多样, 加之农户分散、地块面积小, 养分变异大, 测土配方施肥、实时实地施肥措施受地域限制较大, 难以像美国那样进行大面积推广, 所以要提高肥料利用率寻找其他途径是必要的。近些年来关于绿肥、有机肥、新型肥料、控释缓释肥等肥料品种的研究^[21-22]已经取得了很大的成功。新型肥料添加剂的研究在国外已经较为普遍^[23-24], 我国在该方面的研究则相对较少。

苏南地区是我国重要的水稻产区之一, 由于光照、温度、水分等条件适宜, 养分供应充足, 稻米品质也高, 但是氮肥用量大、利用率低, 施肥也引起了一系列环境问题^[25-26]。本试验旨在研究一种新型肥料添加剂(促根剂)对太湖地区水稻氮素吸收能力的影响, 探索减少太湖地区氮肥用量、提高氮素利用率的途径。

1 材料与方法

1.1 试验设计

①基金项目: 国家 973 计划项目(2009CB118600-973)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-440)资助。

* 通讯作者(yanxy@issas.ac.cn)

作者简介: 杨晓云(1985—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事氮肥高效利用方面研究。E-mail: yangxy@issas.ac.cn

试验于2009年6—11月在江苏省常熟市中国科学院常熟生态农业试验站进行。供试水稻为常育3号。土壤基本理化性状分别为: 有机质 27.8 g/kg, 全氮 1.81 g/kg, 碱解氮 97.5 mg/kg, 有效磷 6.8 mg/kg, 速效钾 72.1 mg/kg, pH 5.5。

试验设置 11 个处理, 3 次重复, 共 33 个小区, 小区面积 30.6 m² (9.0 m × 3.4 m), 采用随机区组设计。11 个处理分别为: CK、N1 (施氮 50 kg/hm²)、N2 (施氮 100 kg/hm²)、N3 (施氮 150 kg/hm²)、N4 (施氮 200 kg/hm²)、N5 (施氮 250 kg/hm²)、N1G (施氮 50 kg/hm² + 促根剂)、N2G (施氮 100 kg/hm² + 促根剂)、N3G (施氮 150 kg/hm² + 促根剂)、N4G (施氮 200 kg/hm² + 促根剂)、N5G (施氮 250 kg/hm² + 促根剂), 其中促根剂用量统一为 100 kg/hm²。各处理施用等量磷钾肥, 分别为磷肥 (P₂O₅) 125 kg/hm²、钾肥 (K₂O) 125 kg/hm²。试验中氮肥为普通尿素 (N: 46%), 磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅: 16%), 钾肥为氯化钾 (K₂O: 60%)。磷钾肥和促根剂作为基肥, 氮肥按基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 4:3:3 进行。所用促根剂为一种新型肥料添加剂, 含有一定比例的氨基酸、腐殖质、草药提取物以及根腐病防治剂等成分, 由中科院和无锡德冠生物有限公司联合生产。由于氨基酸中氮含量非常低, 不能起到供应氮肥的效果, 故将此添加剂视为不含氮素成分。

试验于 6 月 20 日移栽并施基肥, 7 月 3 日和 8 月 6 日分施追肥; 10 月 25 日进行水稻收获; 分别于分蘖初期 (7 月 3 日)、最大有效分蘖期 (7 月 28 日)、拔节期 (8 月 18 日)、抽穗期 (9 月 5 日)、灌浆期 (9 月 23 日) 取植株样。其他田间管理措施同当地农业作业习惯。

1.2 测定项目与方法

生物量测定: 于各典型生长期取植株样, 烘干称重, 测定其地上部、地下部生物量。

植株氮素测定: 浓硫酸消煮-半微量蒸馏法测定茎叶和籽粒的全氮含量。

产量测定: 于水稻收获后实打实收、烤种计产。

相关参数的计算方法:

氮素农学利用率 (kg/kg) = (施氮区产量 - 空白区产量) / 施氮量

氮素吸收利用率 (%) = (施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量) / 施氮量 × 100%

数据采用 Excel 2003 和 SPSS16.0 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 促根剂对水稻各生育期生物量积累的影响

各生长期地上部生物量都随施氮量增加而增加。对相同施氮水平下添加促根剂和不添加促根剂处理进行方差分析, 结果如表 1 所示。低氮水平下 (50、100 kg/hm²), 施用和不施用促根剂的处理差异显著。中高氮处理各生育期的生物量各时期有所差异。拔节期 200 kg/hm² 施用水平 (N4) 下添加促根剂处理高出 17.81%; 抽穗期在中高氮施用水平 (150、200、250 kg/hm²) 下, 添加促根剂处理比对应不添加促根剂的处理分别高出 17.95%、8.63%、11.09%, 表明促根剂在此时期起到增加水稻地上部生物量的效果。灌浆期 150、200、250 kg/hm² 施氮水平下, 添加促根剂处理比相对应的不添加促根剂的处理分别高出 2.16%、12.13%、11.47%。综上所述, 促根剂促进了水稻的生长。

表 1 各处理水稻各生长期生物量变化

Table 1 Rice biomass changes in each growth period under different treatments

| 处理 | 分蘖期 (g/株) | 最大分蘖期 (g/株) | 拔节期 (g/株) | 抽穗期 (g/株) | 灌浆期 (g/株) |
|-------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| CK | 1.65 | 15.48 | 19.19 | 41.97 | 51.13 |
| N1 -G | 1.65 b | 15.96 b | 33.53 b | 44.18 b | 67.19 b |
| +G | 2.35 a | 19.62 a | 40.67 a | 49.66 a | 71.86 a |
| N2 -G | 1.90 b | 18.41 b | 43.14 a | 50.67 b | 74.68 b |
| +G | 2.43 a | 19.90 a | 44.01 a | 59.20 a | 79.51 a |
| N3 -G | 2.35 a | 25.48 a | 43.83 a | 53.21 b | 75.85 b |
| +G | 2.11 a | 23.34 a | 44.23 a | 62.76 a | 77.49 a |
| N4 -G | 2.08 b | 20.43 a | 40.83 b | 58.84 b | 74.96 b |
| +G | 2.40 a | 19.54 a | 48.10 a | 63.92 a | 84.05 a |
| N5 -G | 2.22 a | 19.02 a | 49.01 a | 62.12 b | 83.16 b |
| +G | 2.41 a | 22.50 a | 47.58 a | 69.01 a | 92.70 a |

注: N1~N5 表示 50~250 kg/hm² 施氮水平, -G 表示不添加促根剂处理, +G 表示添加促根剂处理; 相同施氮水平下数据字母不同表示添加促根剂和不添加促根剂处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下表同。

由于各处理根系干重在拔节期达到整个生长季的最大值, 因此将拔节期根重列于图 1。如图所示, 各施肥处理根系干重均显著高于 CK。在各施氮水平下, 添加促根剂处理根系干重均高于不添加促根剂的处理, 依次高出 27.40%、8.52%、26.12%、6.45%、7.21%, 这说明促根剂促进了根系的生长。

2.2 促根剂对水稻产量的影响

试验中各处理产量随施氮量增加而增加, 其中, 不添加促根剂处理在 200、250 kg/hm² 施氮水平下达到最大产量, 均为 8.29 t/hm²; 添加促根剂处理在 150 kg/hm² 施氮水平下产量就已经达到 8.22 t/hm², 增加施

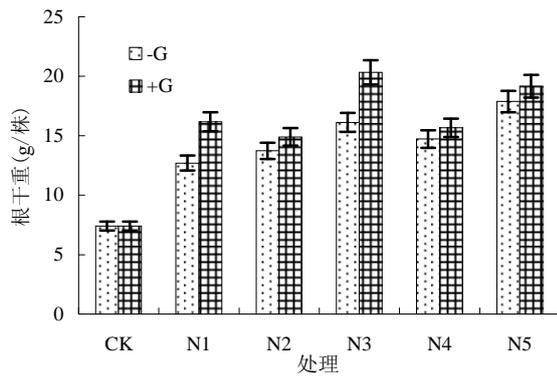


图 1 各处理水稻拔节期根系干重变化

Fig. 1 Changes of root dry weight in jointing periods under different treatments

氮量到 200、250 kg/hm² 时，产量分别达到 8.54、8.77 t/hm²。对水稻产量进行肥料处理-施氮量-区组多因素

方差分析的结果如表 2 所示。施氮量与水稻产量相关性达到 $P < 0.01$ 显著水平，施肥处理间相关性达到 $P < 0.05$ 显著水平。

本试验施氮量-产量反应曲线如图 2 所示。添加促根剂处理产量均高出相同施氮水平下不添加促根剂处理，50、100、150、200、250 kg/hm² 施氮水平下，增产率依次为 3.32%、1.62%、1.23%、3.02%、5.79%，其中在高氮肥施用量下(250 kg/hm²)增产效果最大(表 2)，达到极显著水平。产量方程表示为 $y = cx^2 + bx + a$ ，其中二次项系数 c 表示由施氮量变化引起的单位施氮量的增产效果，一次项系数 b 为反映单位施氮量增产作用的斜率， a 表示无氮区产量。二次项系数 c 为负数表明随施氮量增加，单位施氮量的增产效果随肥料用量的增加而下降，符合报酬递减规律。添加促根剂处理 c 值为 -0.0255，而不施促根剂的处理 c 值为 -0.0321，这意味着施用促根剂后减缓了报酬递减幅度。

表 2 不同处理对水稻产量的影响

Table 2 Effects on rice yield under different treatments

| 变异来源 | 自由度 | 方差 | 均方差根 | F 值 | Pr | 方差贡献率 (%) |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 总变异 | 29 | 5.128 | - | - | - | 100.00 |
| 误差 | 22 | 1.40 | 0.064 | - | - | 27.26 |
| 处理组合 | 7 | 3.73 | 0.53 | 8.39 | 0.000 | 72.74 |
| 肥料处理 | 1 | 0.45 | 0.451 | 7.10 | 0.014 | 8.78 |
| 施氮量 | 4 | 2.82 | 0.704 | 11.08 | 0.000 | 54.99 |
| 区组 | 2 | 0.46 | 0.231 | 3.64 | 0.043 | 8.97 |

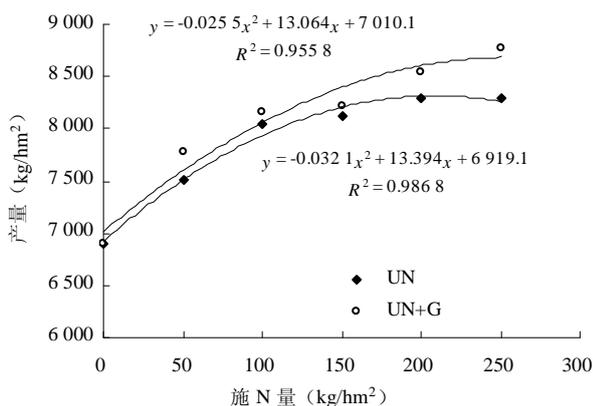


图 2 水稻产量-施氮量反应曲线

Fig. 2 Response curves of rice yield-N application

2.3 促根剂对水稻氮肥利用率的影响

多因素方差分析结果显示，不同施氮水平下水稻吸氮量差异极显著 ($a = 0.00$)，而促根剂对植株总吸

氮量无显著影响 ($a = 0.056$)，然而，促根剂的施用似乎改变了氮素吸收曲线。如表 3 所示，不施用促根剂的处理，氮肥施用量超过 200 kg/hm² 时，水稻吸氮量不再增加，而施用促根剂的处理，水稻吸氮量在 50 ~ 250 kg/hm² 范围内一直随施氮量增加呈现上升趋势，说明促根剂能提高水稻在高氮条件下的氮素吸收能力。随施氮量增加，两种处理的氮素农学利用率均呈现下降趋势，但在相同施氮水平下，施用促根剂的处理均显著高出未添加促根剂的处理。除 200 kg/hm² 施氮水平外，其他相同施氮水平下添加促根剂能显著提高氮素吸收利用率，提高幅度为 5.28% ~ 16.67%。

3 讨论

朱兆良等^[27]在太湖地区的研究结果显示，在 2004—2006 年水稻最高产量平均为 8.40 t/hm²，相对应的氮肥施用量为 240 kg/hm²。本试验中不添加促根剂的处理在 200、250 kg/hm² 施肥水平下达到产量最高，最高

表3 不同处理下水稻氮肥利用率

Table 3 Nitrogen fertilizer use efficiencies of different treatments

| 处理 | 吸氮量 (kg/hm ²) | 氮素农学利用率 (kg/kg) | 氮素吸收利用率 (%) | 促根剂处理与对应处理的增减 (%) | |
|----|------------------------------|--------------------|----------------|-------------------|---------|
| | | | | 氮素农学利用率 | 氮素吸收利用率 |
| N1 | -G | 128.47 | 12.98 | | |
| | +G | 131.95 | 18.06 | 39.15 | 16.67 |
| N2 | -G | 145.71 | 11.67 | | |
| | +G | 147.73 | 12.99 | 11.32 | 5.28 |
| N3 | -G | 149.80 | 8.33 | | |
| | +G | 157.89 | 8.56 | 2.78 | 10.46 |
| N4 | -G | 176.74 | 7.08 | | |
| | +G | 167.50 | 8.25 | 17.86 | -8.07 |
| N5 | -G | 177.25 | 5.70 | | |
| | +G | 189.90 | 7.59 | 33.26 | 10.91 |

产量为 8.29 t/hm², 这与朱兆良先生的结果一致。从产量-施氮量曲线可看出水稻产量随施肥量增加有所升高, 但增产效益趋于降低, 符合“报酬递减律”效应。在本试验中添加促根剂均能提高水稻产量, 并且在高施氮水平下差异达到显著水平。不添加促根剂的处理产量-施氮量曲线的二次项系数 c 值的绝对值(0.032 1)与朱兆良等^[27]的值(0.034 2)相吻合, 添加促根剂后 c 值的绝对值(0.025 5)明显小于前二者, 而且 250 kg/hm² 施氮水平下添加促根剂增产效果大于 200 kg/hm² 施氮水平下的效果。以上说明, 促根剂具有减缓“报酬递减规律”、增加水稻产量的潜力, 尤其是在较高氮素施用量的情况下。

这种促根剂的增产机理尚不明确, 但是从本试验结果看, 氮用量低时, 促根剂的效果不明显, 而在高氮水平下, 促根剂显著增加了氮的吸收量及水稻产量。可能的原因是: 在氮施用量低时, 土壤中氮含量是限制水稻生长的关键因素; 在高施氮水平下, 土壤中供氮量充足, 消除了氮含量对水稻生长的限制性, 此时水稻本身的吸氮能力成为限制性因素。这说明促根剂可能是通过提高水稻本身的吸氮能力而增加了氮素吸收利用和产量。

参考文献:

- [1] Torbert HA, Hoelt RG, Heuvel RMV, Mulvane RL. Effect of moisture regime on recovery and utilization of fertilizer N applied to corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 23(13/14): 1409-1426
- [2] FAO. *Statistical Databases*, 2001, <http://www.fao.org>
- [3] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失. *土壤学报*, 2002, 39(增刊): 12-25
- [4] 朱兆良. 我国氮肥的适用现状、存在问题和对策 // 李庆逵, 朱兆良, 于天仁主编. 中国持续农业发展中的肥料问题. 南昌: 江西科技出版社, 1998: 38-51
- [5] 徐仁扣, Coventry DR. 某些农业措施对土壤酸化的影响. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 385-388
- [6] 李先珍, 王耀林, 张志斌. 京郊蔬菜大棚土壤盐离子积累状况研究初报. *中国蔬菜*, 1993(4): 15-17
- [7] 童有为, 陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究. *园艺学报*, 1991, 18(2): 159-162
- [8] 张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 80-87
- [9] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1-6
- [10] 朱兆良. 氮肥管理与粮食生产和环境. *土壤学报*, 2002, 39(增刊): 3-11
- [11] Xing GX. N₂O emission from cropland in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52: 249-254
- [12] Xing GX, Yan XY. Direct nitrous oxide emissions from agricultural fields in China estimated by the revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gases. *Environmental Science & Policy*, 1999, 2: 355-361
- [13] 任祖淦, 邱孝煊, 蔡元呈, 李贞合, 王琳. 氮肥施用与蔬菜硝酸盐积累的相关研究. *生态学报*, 1998, 18(5): 523-528
- [14] 黄农荣, 钟旭华, 郑海波. 水稻氮高效基因型及其评价指标的筛选. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 29-34
- [15] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 王东升, 叶利庭, 沈其荣. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价. *土壤学报*, 2008, 45(2): 267-273
- [16] 闫湘, 金继运, 何萍, 梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展.

- 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459
- [17] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 王强, 汤蕾蕾, 龚伟华, 徐波, 彭少兵, Buresh R J. 实时实地氮肥管理对不同杂交水稻氮肥利用率的影响. 中国农业科学, 2008, 41(2): 470-479
- [18] 李方敏, 廖宗文, 艾天成. 平衡施肥理论与肥料高效利用. 磷肥与复肥, 2004, 19(5): 66-67, 70
- [19] 侯彦林, 任军. 生态平衡施肥技术产业化模式和机制研究. 土壤通报, 2003, 34(3): 191-194
- [20] 美国土壤肥料技术研究与推广. http://e-nw.shac.gov.cn/wmfw/hwzc/hwkj/200802/t20080226_228252.htm
- [21] 卢萍, 杨林章, 单玉华, 韩勇. 绿肥和秸秆还田对稻田土壤供氮能力及产量的影响. 土壤通报, 2007, 38(1): 39-42
- [22] 徐明岗, 李东初, 李菊梅, 秦道珠, 八木一行, 宝川靖和. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3 133-3 139
- [23] Purakayastha TJ, Katyal JC. Evaluation of compacted urea fertilizers prepared with acid and non-acid producing chemical additives in three soils varying in pH and cation exchange capacity I. NH_3 volatilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51: 107-115
- [24] Oxley JC, Smith JL, Rogers E, Yu M. Ammonium nitrate: Thermal stability and explosivity modifiers. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 23-45
- [25] 李伟波, 吴留松, 廖海秋. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究. 土壤学报, 1997, 34(1): 67-73
- [26] 郭红岩, 王晓蓉, 朱建国, 李国平. 太湖流域非点源氮污染对水质影响的量化研究. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 150-153
- [27] 朱兆良, 张绍林, 尹斌, 颜晓元. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 1-5

Effects of Fertilizer Additive on Rice Growth, Yield and Nitrogen Utilization in Taihu Lake Region

YANG Xiao-yun^{1,2}, LI Wen-jun^{1,2}, YAN Xiao-yuan¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A field experiment was conducted in Taihu Lake region to study the effect of a fertilizer additive on rice growth, yield and nitrogen use efficiency. The results showed that the fertilizer additive significantly increased rice biomass by 17.95%, 8.63% and 11.09% at heading stage and by 2.16%, 12.13% and 11.47% at filling stage respectively for N application rates of 150, 200 and 250 kg/hm² respectively. This fertilizer additive also significantly increased root biomass by 7.21% - 27.40% at elongation stage under different N application rates. Yield increase was not as high as biomass, but increased significantly under 250 kg/hm² treatment, being 5.79%. The fertilizer additive apparently increased rice N uptake, agronomic N use efficiency (AE) and apparent N recovery efficiency (NRE), and the increase was significant under high N application rate, being 7.14%, 33.26% and 10.91% respectively under 250 kg/hm² treatment.

Key words: Fertilizer additive, Rice, Growth, Yield, N use efficiency