



基于细胞代谢调控进行精准施肥的增产优质效果

清华大学化工系

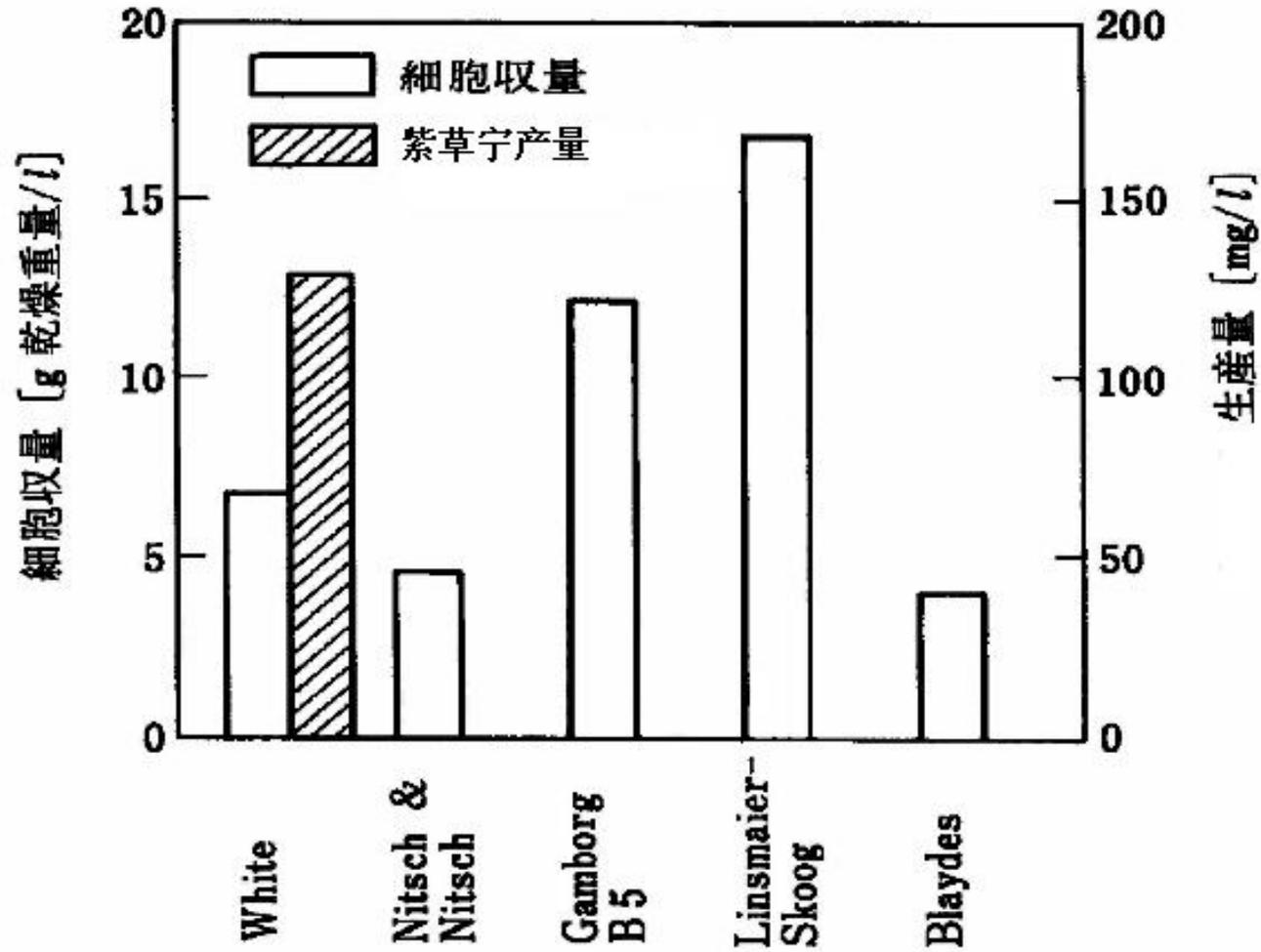
浙江清华长三角研究院

郭志刚

- 一、细胞代谢调控技术**
- 二、农作物精准施肥的理论基础**
- 三、数种农作物均衡施肥的实验结果**
- 四、其他农作物均衡营养肥的减肥效果**
- 五、农作物精准施肥的战略意义**



一、细胞代谢调控技术



二、农作物精准施肥的理论基础

农作物均衡施肥的概念

所谓农作物均衡施肥是根据农作物在不同生长发育阶段以及在不同土壤和气候环境中对氮、磷、钾大量元素以及钙、镁、硫、铁、锰、锌、硼等中微量元素的吸收率和总需求量而设计的全营养均衡营养肥。该配方肥不仅能满足农作物不同生长发育阶段的养分需求，并能大幅度提高肥料的利用率，减少肥料用量，减少营养元素在土壤中残留，提高农作物的产量及品质，增强农作物的抗病能力。

更重要的是，通过营养元素对作物的代谢调控作用，定向促进某些目标成分的合成，从而显著提高其营养和应用价值，改善农产品的风味和口感。



三、数种农作物均衡营养肥的实验效果

- 1、水稻均衡营养肥
- 2、茶叶均衡营养肥
- 3、豌豆均衡营养肥
- 4、柑橘均衡营养肥
- 5、马铃薯均衡营养肥



3.1 水稻均衡营养肥的增产及节肥效果

| 施肥种类 | 施肥量 公斤/亩 | N 公斤/亩 | P ₂ O ₅ 公斤/亩 | K ₂ O 公斤/亩 | 肥料成本 元/亩 | 产量 公斤/亩 |
|------------|-------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|------------|
| 水稻 均衡肥 | 40~50 | 7~10.5 | 2.7~3 | 9~13.7 | 100~125 | 550~870 |
| 农民常规 施肥 | 70~100 | 19~29 | 5~6 | 5~6 | 140~180 | 500~800 |
| 相比较 | -42~50% | -63% | -46~50% | +44~56% | -40~44% | +8~10% |

- 1) 减少施肥量，大幅度减氮减磷；
- 2) 降低肥料成本；
- 3) 植株营养生长与生殖生长平衡，有利于抽穗结实；
- 4) 植株健壮，抗病性增强，减少农药使用次数与使用量；
- 5) 水稻产量高，口感好，品质高，耐储存。



施用水稻均衡营养肥的水稻生长状态



不同施肥处理的稻谷与秸秆营养元素含量（100%）

| 部位 | 肥料 | TN | TP | TK | Ca | Mg | S | Fe |
|----|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|
| 稻谷 | 均衡肥 | 0.40±0.07 | 0.06±0.01 | 0.57±0.02 | 0.18±0.00 | 0.32±0.06 | 0.063±0.01 | 0.014±0.002 |
| | 常规肥 | 0.40±0.01 | 0.11±0.01 | 0.54±0.25 | 0.25±0.02 | 0.33±0.06 | 0.018±0.00 | 0.011±0.001 |
| 秸秆 | 均衡肥 | 0.63±0.03 | 0.25±0.04 | 1.85±0.03 | 0.54±0.00 | 0.36±0.05 | 0.087±0.01 | 0.042±0.003 |
| | 常规肥 | 0.71±0.10 | 0.24±0.01 | 1.92±0.06 | 0.48±0.09 | 0.60±0.05 | 0.190±0.02 | 0.042±0.002 |

不同施肥处理单位面积收获的营养物质含量（kg/667m²）

| 部位 | 肥料 | TN | TP | TK | Ca | Mg | S | Fe |
|-------|-----|------|------|-------|------|------|------|------|
| 稻谷 | 均衡肥 | 3.17 | 0.48 | 4.53 | 1.44 | 2.53 | 0.51 | 0.11 |
| | 常规肥 | 2.9 | 0.8 | 3.94 | 1.83 | 2.41 | 0.13 | 0.08 |
| 秸秆 | 均衡肥 | 2.93 | 1.14 | 8.55 | 2.49 | 1.65 | 0.4 | 0.19 |
| | 常规肥 | 2.76 | 0.92 | 7.49 | 1.87 | 2.34 | 0.74 | 0.16 |
| 稻谷+秸秆 | 均衡肥 | 6.1 | 1.62 | 13.08 | 3.93 | 4.18 | 0.91 | 0.31 |
| | 常规肥 | 5.65 | 1.72 | 11.43 | 3.7 | 4.75 | 0.87 | 0.24 |

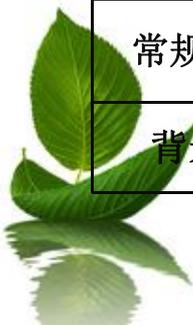


不同施肥处理单位面积杂交稻营养物质消耗量及吸收率 (kg/667m²)

| 施肥处理 | 总施肥量 | 总N吸收比 | 总P吸收比 | 总K吸收比 |
|-------|------|-----------|----------|------------|
| 均衡营养肥 | 47 | 6.1/9.0 | 1.62/2.7 | 13.08/13.7 |
| | | 67.8% | 60% | 95.5% |
| 常规施肥 | 100 | 5.65/17.5 | 1.72/2.0 | 11.43/4.5 |
| | | 32.3% | 86% | >100% |

水稻种植前后土壤中主要营养物质的含量变化

| 施肥处理 | 施肥量 (kg/667m ²) | 总N (g/kg) | 可溶性P (mg/kg) | 可溶性K (mg/kg) |
|-------|-----------------------------|-----------|--------------|--------------|
| 均衡营养肥 | 47 | 2.15±0.1 | 43.10±4.6 | 219.77±4.7 |
| 常规施肥 | 100 | 1.94±0.1 | 14.43±0.1 | 164.23±5.1 |
| 背景值 | 0 | 2.01 | 39.8 | 237 |



3.2 绿茶均衡营养肥的节肥效果

| 施肥种类 | 施肥量 公斤/亩 | N 公斤/亩 | P ₂ O ₅ 公斤/亩 | K ₂ O 公斤/亩 | 肥料成本 元/亩 | 产量 公斤/亩 |
|------------|------------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|------------|
| 绿茶 均衡肥 | 40 | 5.2 | 1.6 | 3.8 | 200 | 40~50 |
| 农民常规施 肥 | 有机肥100 复合肥100 | 15 | 15 | 15 | 450 | 40~50 |
| 相比较 | -60% | -63% | -89% | -74% | -55% | 0 |

- 1) 大幅度减氮减磷；
- 2) 降低肥料成本；
- 3) 植株生长平衡，有利于侧芽萌发；
- 4) 抗病性增强，减少农药与使用量。
- 5) 腋芽增多，口感和品质提高。



施用茶树均衡营养肥的茶树生长状态

清华长三角学院茶叶
配方肥料对比实验区



不同施肥处理与不同产地龙井茶中各类营养物质合成量

| 样品名 | 含水率% | 水浸出物% | 维生素C % | CAF % | 茶多酚% |
|------|------------|--------------------|------------|-------------------|--------------------|
| 常规肥 | 3.81±0.28a | 42.66±0.66a | 0.03±0.00a | 2.82±0.24b | 21.48±1.96a |
| 营养肥 | 4.55±0.01b | 43.11±1.31a | 0.03±0.01a | 2.73±0.18c | 20.53±1.34b |
| 梅家坞 | 4.9±0.18bc | 41.41±0.65ab | 0.03±0.01a | 2.85±0.21b | 20.4±0.84bc |
| 西湖龙井 | 2.54±0.17d | 39.78±0.72bc | 0.02±0.00a | 3.41±0.17a | 20.3±0.08c |

| 样品名 | 氨基酸含量% | 可溶性糖% | 蛋白质含量% | 黄酮含量% |
|------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 常规肥 | 3.48±0.025c | 4.34±0.07b | 2.84±0.08a | 0.63±0.01bc |
| 营养肥 | 3.20±0.04d | 5.08±0.02a | 2.95±0.05a | 0.78±0.01a |
| 梅家坞 | 4.54±0.02a | 4.2±0.06b | 2.87±0.03a | 0.68±0.02b |
| 西湖龙井 | 3.88±0.02b | 4.26±0.038b | 2.84±0.07a | 0.65±0.01c |

注：p<0.05



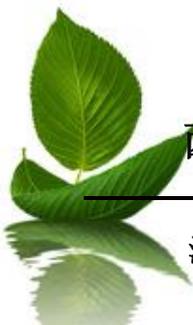
不同施肥处理与不同产地茶叶的非酯化儿茶素合成量

| 品种 | 总儿茶素 (%) | GC (%) | EGC (%) | C (%) | EC (%) |
|------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 常规肥 | 16.10±0.75a | 0.95±0.11b | 2.56±0.34a | 1.61±0.28b | 0.87±0.18a |
| 营养肥 | 14.24±0.92b | 1.19±0.03a | 1.40±0.44b | 1.81±0.05a | 0.76±0.12b |
| 梅家坞 | 14.28±0.82b | 0.65±0.04b | 1.90±0.18b | 1.81±0.13a | 0.78±0.11b |
| 西湖龙井 | 16.45±1.01a | 0.80±0.09c | 2.70±0.01a | 1.80±0.16a | 0.84±0.10a |

不同施肥处理与不同产地茶叶的糖基化儿茶素合成量

| 品种 | EGCG (%) | GCG (%) | ECG (%) | CG (%) |
|------|------------|------------|------------|------------|
| 常规肥 | 5.82±0.27a | 1.58±0.08a | 2.34±0.40c | 0.38±0.19b |
| 营养肥 | 5.05±0.66c | 1.55±0.45a | 2.23±0.13c | 0.26±0.01c |
| 梅家坞 | 4.45±0.41d | 1.46±0.20b | 2.77±0.30b | 0.47±0.07a |
| 西湖龙井 | 5.32±0.42b | 1.37±1.17c | 3.16±0.43a | 0.46±0.01a |

注: p<0.05



3.3 豌豆均衡营养肥的增产及节肥效果

| 施肥种类 | 施肥量 公斤/亩 | N 公斤/亩 | P ₂ O ₅ 公斤/亩 | K ₂ O 公斤/亩 | 肥料成本 元/亩 | 产量 公斤/亩 |
|------------|---------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|------------|
| 豌豆 均衡肥 | 40 | 4.8 | 0.67 | 5.5 | 120 | 276.9 |
| 农民常规 施肥 | 复合肥33 尿素20 | 14.2 | 4.95 | 4.95 | 122.5 | 269.5 |
| 相比较 | | -66% | -86% | +12% | 0 | +2.7% |

- 1) 减少施肥量，大幅度减氮减磷；
- 2) 植株营养生长与生殖生长平衡，有利于结实；
- 3) 植株健壮，抗病性增强，减少农药使用量；
- 4) 豌豆品质好，口感香甜。



豌豆均衡营养肥对鲜食葡萄生长状态的影响



豌豆与秸秆吸收的氮磷钾量

| 处理 | 部位 | 单位 | 全氮 | 全磷 | 全钾 | 处理 | 部位 | 单位 | 全氮 | 全磷 | 全钾 |
|----|---------------|------|------------|------------|-------------|----|---------------|------|-------------|-------------|-------------|
| CK | 豌豆 | % | 3.85 | 0.27 | 0.63 | 实验 | 豌豆 | % | 3.79 | 0.25 | 0.51 |
| | | kg/亩 | 5.89 | 0.41 | 0.96 | | | kg/亩 | 5.95 | 0.39 | 0.8 |
| | 豆秸 | % | 0.14 | 0.06 | 1.04 | | 豆秸 | % | 0.20 | 0.02 | 0.98 |
| | | kg/亩 | 0.21 | 0.09 | 1.59 | | | kg/亩 | 0.31 | 0.03 | 1.54 |
| | 豌豆 + 豆秸 | kg/亩 | 6.1 | 0.5 | 2.55 | | 豌豆 + 豆秸 | kg/亩 | 6.26 | 0.42 | 2.33 |

豌豆对氮磷钾的利用率

| 施肥处理 | 总施肥量 kg/亩 | 单位 | 氮 | 磷 | 钾 |
|------|--------------|---------|-----------------|------------------|-----------------|
| CK | 40 | 吸收量/施肥量 | 6.1/12.3 | 0.5/3 | 2.55/3 |
| | | 吸收率 % | 49.5 | 16.7 | 85 |
| 实验 | 40 | 吸收量/施肥量 | 6.26/4.8 | 0.42/0.67 | 2.33/5.5 |
| | | 吸收率 % | >100 | 62.7 | 42.4 |



不同施肥处理对豌豆品质相关指标的影响

| | 干物质含量 (%) | 百粒重 (g/1000粒) | 可溶性总糖含量 (mg/g) | 可溶性蛋白含量 (mg/g) | 淀粉含量 (mg/g) | 直链淀粉含量 (mg/g) | 支链淀粉含量 (mg/g) | 黄酮含量 (mg/g) |
|----|-----------|---------------|--------------------|----------------|-------------------|---------------|-------------------|------------------|
| 对照 | 91.9±0.1a | 26.4±22.8a | 283.1±21.7b | 104.1±4.7a | 446.2±3.2b | 45.7±0.8a | 400.5±2.7b | 0.98±0.2a |
| 试验 | 92.2±0.1a | 26.6±16.0a | 335.2±27.1a | 101.6±2.5a | 628.3±1.8a | 43.5±1.2a | 584.7±1.6a | 1.33±0.4a |

施肥前后豌豆田土壤养分含量变化

| | pH | EC(us/cm) | 全氮(g/kg) | P ₂ O ₅ (mg/kg) | K ₂ O(mg/kg) | Ca ²⁺ (g/kg) | Mg ²⁺ (g/kg) | 有效Ca ²⁺ (g/kg) | 有效Mg ²⁺ (g/kg) | S ⁶⁺ (mg/kg) | 有机质 (g/kg) |
|----|-----------------|------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| 本底 | 7.4±0.1a | 206.2±68a | 1.5±0.3a | 50.7±8.8a | 161.4±24.3a | 2.5±0.3b | 1.5±0.2b | 1.5±0.2c | 0.45±0.1b | 15.6±3.6a | 18.5±2.1b |
| CK | 6.8±0.2b | 123.3±29a | 1.1±0.1b | 47.7±0.3a | 142.7±7.9a | 2.8±0.2b | 1.7±0.1b | 1.8±0.1b | 0.61±0.1a | 22.0±13.1a | 35.1±2.4a |
| 试验 | 6.3±0.3c | 167.4±110a | 1.2±0.1ab | 48.4±0.3a | 193.2±38.6a | 3.6±0.3a | 2.2±0.2a | 2.6±0.1a | 0.64±0.1a | 23.6±12.8a | 34.1±5.4a |



3.4 柑橘均衡营养肥的节肥效果

| 施肥种类 | 施肥量 公斤/亩 | N 公斤/亩 | P ₂ O ₅ 公斤/亩 | K ₂ O 公斤/亩 | 肥料成本 元/亩 | 产量 公斤/亩 |
|------------|------------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|---------------|
| 柑橘 均衡肥 | 40 | 6~6.4 | 2~2.4 | 2.6~2.9 | 120~160 | 1500~ 2000 |
| 农民常规 施肥 | 尿素 复合肥 有机肥 | 16 | 10 | 11 | 400~500 | 1500~ 2000 |
| 相比较 | | -60% | -76~80% | -73~76% | -68~70% | 0 |

- 1) 减少施肥量，大幅度减氮减磷；
- 2) 大幅度降低肥料成本；
- 3) 植株营养生长与生殖生长平衡，有利于开花结果；
- 4) 植株健壮，抗病性增强，减少农药使用次数与使用量；
- 5) 坐果率高，果实色泽鲜艳，口感好，耐贮存。



施用柑橘均衡营养肥的柑橘生长状态



柑橘均衡营养肥对大里村“本地早”品质的影响

| 项目 | VC (mg/ml) | 有机酸 (mg/ml) | 氨基酸 (mg/g) | 黄酮 (mg/g) | 可溶性糖 (mg/ml) | 类胡萝卜素 (mg/100g) | 可溶性固形物 (%) |
|------|---------------|----------------|---------------|--------------|-----------------|--------------------|---------------|
| 对照处理 | 1.47±0.02a | 0.48±0.03b | 0.35±0.02b | 4.31±0.02a | 100.3±0.7b | 0.32±0.03b | 11.3±0.3a |
| 均衡肥 | 1.15±0.01b | 0.52±0.01a | 0.38±0.01a | 4.49±0.04a | 126.1±4.2a | 0.42±0.01a | 12.3±0.3a |

柑橘均衡营养肥对江村“本地早”品质的影响

| 项目 | VC (mg/ml) | 有机酸 (mg/ml) | 氨基酸 (mg/g) | 黄酮 (mg/g) | 可溶性糖 (mg/ml) | 类胡萝卜素 (mg/100g) | 可溶性固形物 (%) |
|------|---------------|----------------|---------------|--------------|-----------------|--------------------|---------------|
| 对照处理 | 1.47±0.02a | 0.60±0.003a | 0.47±0.02a | 5.38±0.12a | 86.0±1.30b | 0.45±0.01b | 10.0±0.1b |
| 均衡肥 | 1.51±0.04a | 0.51±0.01b | 0.34±0.01b | 4.70±0.06b | 108.7±1.62a | 0.58±0a | 12.3±0.3a |



3.5 马铃薯均衡营养肥的节肥效果

| 施肥种类 | 施肥量 公斤/亩 | N 公斤/亩 | P ₂ O ₅ 公斤/亩 | K ₂ O 公斤/亩 | 产量 公斤/亩 | 肥料成本 元/亩 |
|------------|-------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|------------|-------------|
| 马铃薯 均衡肥 | 70~80 | 4.5~5 | 4~4.5 | 12~13 | 3500 | 240~300 |
| 农民常规 施肥 | 150~250 | 26~28.8 | 16.8~17.7 | 20.8~22.4 | 3500 | 350~500 |
| 减少率 | -53%~68% | -82% | -75% | -42% | 0 | -31~40% |

- 1) 减少施肥量，大幅度减氮减磷；
- 2) 大幅度降低肥料成本；
- 3) 植株营养生长与生殖生长平衡，有利于块茎肥大；
- 4) 植株健壮，抗病性增强，减少农药使用次数与使用量；
- 5) 马铃薯产量高，品质好，口感香甜，耐储存。



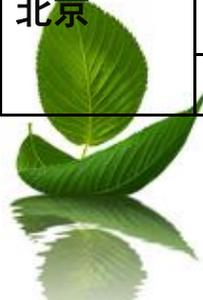
马铃薯品质改善及生长状态

| | 亩产 /公斤 | 淀粉 % | 直链淀粉 % | 干物质含量 % | 维生素C mg/100g |
|--------------|-----------|---------|-----------|------------|-----------------|
| 马铃薯 均衡肥 | 3500 | 18.2 | 19.7 | 22.6 | 58.3 |
| 普通化肥 或复合肥 | 3500 | 14.9 | 12.0 | 19.7 | 44.0 |
| 增加率 % | 0 | +22.1 | +64.2 | +14.7 | +32.5 |



四、其他农作物均衡营养肥的减肥效果

| 农作物/试验地 | 施肥种类 | 施肥量千克/亩 | N千克/亩 | P ₂ O ₅ 千克/亩 | K ₂ O千克/亩 | 产量千克/亩 | 肥料成本元/亩 |
|-----------|--------|---------------|-----------|------------------------------------|----------------------|-----------|---------|
| 玉米/河北, 山东 | 玉米营养肥 | 50~55 | 3.2~4 | 3~3.5 | 9~9.5 | 720 | 150~165 |
| | 农民常规施肥 | 60~70 | 19.8~20.5 | 6~6.5 | 6~6.5 | 600 | 180~200 |
| | 相比较 | -12~21% | -83.8% | -50% | +50% | +20% | -20% |
| 小麦/江苏 | 小麦营养肥 | 40~50 | 8~9 | 2~2.4 | 4.5~6 | 500 | 100~125 |
| | 农民常规施肥 | 50~70 | 16~19 | 6.3 | 6.3 | 450 | 150 |
| | 相比较 | -20~28% | -50~52% | -62~68 | 0~-28% | +10% | -16~33% |
| 棉花/新疆 | 棉花营养肥 | 55~60 | 3.7~4 | 2.6~3 | 8~9 | 290~350 | 230~250 |
| | 农民常规施肥 | 140~180 | 40~50 | 20~25 | 15~20 | 280~320 | 350~500 |
| | 相比较 | -60~66% | -90~92% | -87% | -46~55% | +3~9% | -34~50% |
| 大豆/浙江 | 毛豆营养肥 | 40 | 5 | 1.36 | 5.76 | 700 | 120 |
| | 农民常规施肥 | 60 | 20 | 6 | 6 | 600 | 160~180 |
| | 相比较 | -33% | -75% | -77% | -4% | +16% | -25~33% |
| 桃子/浙江, 北京 | 桃子营养肥 | 30~40 | 3.5~5.2 | 1.2~2.2 | 3.6~6 | 1500~2000 | 150~200 |
| | 农民常规施肥 | 鸡粪1000 复合肥 | 13~19 | 11~18 | 13~15 | 1500~2000 | 350~500 |
| | 相比较 | | -73% | -88% | -60~72% | 0 | -57~60% |



已研发成功的其他农作物均衡营养肥

- 1、葡萄均衡营养肥
- 2、甜菜均衡营养肥
- 3、红薯均衡营养肥
- 4、苹果均衡营养肥
- 5、葵花均衡营养肥
- 6、谷子均衡营养肥
- 7、牧草均衡营养肥
- 8、甜瓜均衡营养肥
- 9、西瓜均衡营养肥
- 10、番茄均衡营养肥
- 11、茄子均衡营养肥
- 12、青椒均衡营养肥
- 13、黄瓜均衡营养肥
- 14、菜豆均衡营养肥
- 15、杨梅均衡营养肥
- 16、草莓均衡营养肥
- 17、生姜抗病配方肥
- 18、火龙果均衡营养肥



五、农作物精准施肥的战略意义

- 1、大幅度节约肥料，降低生产成本；
- 2、促进农业标准化和规范化生产；
- 3、改善农产品风味和品质；
- 4、增强抗病虫性，减少农药用量，利于食品安全；
- 5、利于农业健康、稳定、可持续发展；
- 6、大幅度减少农业面源污染；
- 7、有利于土壤、水环境以及大气环境修复。



敬请专家领导批评指正

谢谢

