

三峡库区脐橙生长元素农业地球化学研究^①

刘国华^{1,2}, 杨林章^{2*}, 夏立忠², 李运东², 马力²

(1 南京林业大学, 南京 210037; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 利用田间试验研究了三峡库区福罗斯特脐橙 (*Citrus sinensis*) 体内营养元素 (N、P、K、Ca、Mg、Zn、Mn、Cu、Fe) 的分布特征及其农业地球化学行为。结果表明: 大量元素中, 树干(枝) Ca 含量最高, 花器官中 K 含量最高, 根系与叶片中大量元素含量分布基本相同, 大量元素在脐橙中的含量分配与土壤中的分配基本一致, 均为脐橙强烈摄取元素; 微量元素 Zn、Mn、Cu 为中等摄取元素, Fe 为极微弱摄取元素, 土壤背景为营养元素的主要控制因素。叶、花、根为大量元素与微量元素较为富集的器官, 而树干、果实对各营养元素的富集程度较弱。该地区土壤具有缺 N、少 P、富 K 的特点, 因此需合理调整有机、无机肥的比例, 提高土壤 N、P 的供应量。

关键词: 三峡库区; 脐橙; 生长元素; 农业地球化学

中图分类号: S158.3

脐橙是我国柑桔类水果主要品种之一, 目前关于脐橙的研究主要集中于脐橙生长环境、病虫害防治、栽培贮藏技术与品种改良等方面^[1-5], 国内外仅见少量关于脐橙元素的研究^[6-12], 而对脐橙生长元素的农业地球化学行为的研究鲜见报道。三峡库区低海拔区域资源条件适宜, 是我国传统的柑桔产业区之一。然而, 由于以山地资源为主, 地形复杂、不同地质时期母岩出露破碎、土壤类型交错分布、土壤肥力空间变异较大, 增加了养分管理的难度。长期以来, 果农一直凭经验施肥, 影响了脐橙单产的提高和品质的改善, 不利于提高经济效益。目前, 三峡库区多数柑桔园建设标准低、管理粗放, 不平衡施肥现象较为普遍, 重 N 轻 P、K, 微量元素需求及缺失也被忽略^[13]。本文对三峡库区脐橙生长元素的分布特征及其农业地球化学行为进行初步探索, 这对改进脐橙品种质量、扩大种植规模、调整肥料施用量等均具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本次采样地点为湖北省宜昌市秭归县水田坝乡, 区域属亚热带大陆性季风气候, 年平均气温 16.7℃, 极端最高气温 42.9℃, 极端最低气温 -9.0℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的有效积温 5 584.2℃, 年降雨量 1 013.1 mm, 无霜期 306 天^[14]。

1.2 取样方法

在每个选定的采样点, 分别采集脐橙的根、干、叶、花、果; 采集各器官时, 每个采样点在 500 m × 500 m 的范围内, 随机采取 30 棵不同植株的叶、果、花、干、根分器官组成分析样, 各器官株间采样重量近一致; 花取样时间为 2009 年 4 月 14 号, 新叶取样时间为 6 月 20 日, 青果取样时间为 6 月 17 日, 一年叶、二年叶、熟果与根取样时间均为 12 月 12 日。野外采样后用清水冲洗泥土与杂物。分不同层次取土, 每层土壤样品设 5 个重复, 风干过筛 (20 目和 100 目)。

1.3 样品处理及分析

植株样品: 用蒸馏水淋净后放入 80℃ 鼓风干燥箱中烘 30 min 后降温到 65℃ 渐渐去尽水分称重, 玛瑙研钵研磨, 过 0.25 mm 尼龙筛后进行元素含量测定。N 用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮蒸馏法测定; P 采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮钼锑抗比色法测定; K 采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮火焰光度计法测定; Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 采用浓 HNO_3 消煮-原子吸收分光光度法测定。

土壤样品: 土壤全 N 采用凯氏蒸馏法测定; 全 P 采用 NaOH 熔融, 钼锑抗比色法测定; 土壤全 K 采用 NaOH 熔融, 原子吸收分光光度法测定; 土壤有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 采用浓 HCl 浸提, 原子吸收分光光度法测定^[15]。

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871147) 和中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-YW-08-01) 资助。

* 通讯作者 (lzyang@issas.ac.cn)

作者简介: 刘国华 (1979—), 男, 山东青州人, 博士, 助理研究员, 主要从事植物营养方面的研究。E-mail: ghliu@issas.ac.cn

2 结果与分析

2.1 三峡库区脐橙园土壤元素含量

表 1、表 2 为三峡库区不同土层养分平均含量及土壤养分分级标准，结果表明，试验地 0~20 cm 土壤全 N、全 P、全 K 含量较高，随着土层深度的增加，土壤中养分含量不同程度地下降。由土壤养分分级标准来看，试验地土壤 N、P 含量缺乏，因试验区域为紫色砂岩类母岩富含 K 素，因此土壤全 K 含量较高，达 10.1 g/kg，这与韩庆忠等^[14]研究结果相同，但低于整个三峡库区紫色土 K 素平均含量 20.65 g/kg^[16]，说

明该地区种植脐橙对土壤 K 素的利用率较高。该地区微量元素除 Zn 为适量外，其余 3 种元素均为高量，说明该试验区的微量元素并不缺乏。大量元素缺乏的原因：①果园生产力高，每年果实带走大量营养物质；②三峡库区以山地资源为主，由于长期人为耕种，水土流失严重，土壤生态系统退化，因此土壤出现薄层化、沙砾化、贫营养化趋势^[11]。随着脐橙产业带的建设，一定程度上有利于保持水土，减少 N、P 养分的流失，但脐橙园缺 N 少 P 现状，必须通过有机和无机态养分配合输入，提高土壤 N、P 的供应量^[17]。

表 1 三峡库区不同土层土壤养分平均含量

Table 1 Average contents of soil nutrients at different soil layers in the Three Gorge Region

| 元素形态 | 土层 (cm) | 大量元素 (g/kg) | | | | | 微量元素 (mg/kg) | | | |
|------|---------|-------------|------|-------|-------|------|--------------|--------|-------|--------|
| | | N | P | K | Ca | Mg | Zn | Mn | Cu | Fe |
| 全量 | 0~20 | 0.98 | 0.56 | 11.84 | 17.63 | 0.69 | 87.27 | 773.4 | 32.13 | 38.20* |
| | 20~40 | 0.68 | 0.20 | 8.34 | 11.26 | 0.24 | 79.21 | 692.16 | 28.25 | 36.90* |
| | 平均值 | 0.80 | 0.40 | 10.10 | 14.40 | 0.50 | 83.24 | 732.78 | 30.19 | 37.60* |
| 有效态 | 0~20 | 0.091 | 0.37 | 0.39 | 1.86 | 0.13 | 2.86 | 61 | 1.08 | 57.76 |
| | 20~40 | 0.059 | 0.07 | 0.08 | 2.57 | 0.13 | 2.12 | 59.12 | 1.22 | 47.42 |
| | 平均值 | 0.075 | 0.22 | 0.235 | 2.20 | 0.13 | 2.49 | 60.06 | 1.15 | 52.59 |

注：有效态 N 为碱解氮；Fe 在土壤中为常量元素，但在植物体内为微量元素，本文将它视为微量元素进行对比分析；有效态 Fe 用 mg/kg 表示，全量 Fe 的实测值若也用 mg/kg 则其数量级较大，本文以 g/kg 表示。

表 2 土壤养分分级标准

Table 2 Classification standards of soil nutrients

| 土壤指标 | 极缺 | 缺乏 | 适量 | 高量 |
|---------------|-------|----------|---------|---------|
| 全 N (g/kg) | <0.2 | 0.2~0.8 | 0.8~1.0 | >1.0 |
| 全 P (g/kg) | <0.2 | 0.2~0.8 | 0.8~1.0 | >1.0 |
| 全 K (g/kg) | <1.08 | 1.08~2.0 | 2.0~2.5 | >2.5 |
| 有效 Cu (mg/kg) | <0.3 | 0.3~0.5 | 0.5~1.0 | 1.0~2.0 |
| 有效 Fe (mg/kg) | <5 | 5~10 | 10~20 | 20~50 |
| 有效 Zn (mg/kg) | <0.5 | 0.5~1.0 | 1.0~5.0 | 5.0~10 |
| 有效 Mn (mg/kg) | <2 | 2~5 | 5~20 | 20~50 |

注：全 N 等级含量按绿色食品质量标准土壤肥力等级 NY/T391-2000，全 P、K 等级含量参照第二次全国土壤普查养分分级标准，有效态养分含量参照鲁建巍等^[18]调查结果。

2.2 脐橙生长元素及其生物富集系数

2.2.1 脐橙植株中的营养元素分布特征 通常植物生长所需的根系是植物吸收水分及土壤介质营养元素的吸收器，其大量元素含量 N>Ca>K>P>Mg，且 N 与 Ca 的含量是 P、Mg 的 10~15 倍（图 1），可见根对于 N、Ca 具有较强的吸收能力；树干的大量元素含量

以 Ca 最高，其次依次为 N>K>P≈Mg；叶是植物吸收大气养分的主要器官，其大量元素含量次序为 N>Ca>K>P≈Mg，叶片中 N、Ca 含量均高于其余器官，且为同一器官其余元素含量的 10~20 倍，由此可见，叶片对 N、Ca 具有很强的吸收能力，这与唐将等^[9]的研究结果相同。果实是脐橙的食用部分，在组成果实的大量元素中，含量最高的是 N 与 K，两者含量近一致，Mg 的含量最低，营养元素的含量规律为：N>K>Ca>P>Mg，这与 Storey 等^[12]的研究结果相同；在脐橙花器官中，K 的含量最高，其余依次为 N>Ca>P>Mg。从脐橙各器官（除花、果实）纵向分析，N、P、K 的含量以叶的含量最高，均以叶>根系>树干，它们具有相同的吸收特点；花器官中的 N、P、K 含量也均高于根系与树干。

大量元素在脐橙中的含量分配与土壤中的分配基本一致。据李继承等^[7]研究，脐橙植株体内的矿质元素 N、P、K、Ca 等含量水平主要取决于对同种元素的处理，随处理含量的增高而增高，各相关系数均达到极显著水平，由此可见，柑桔各器官大量元素含量主要取决于土壤中元素背景含量。

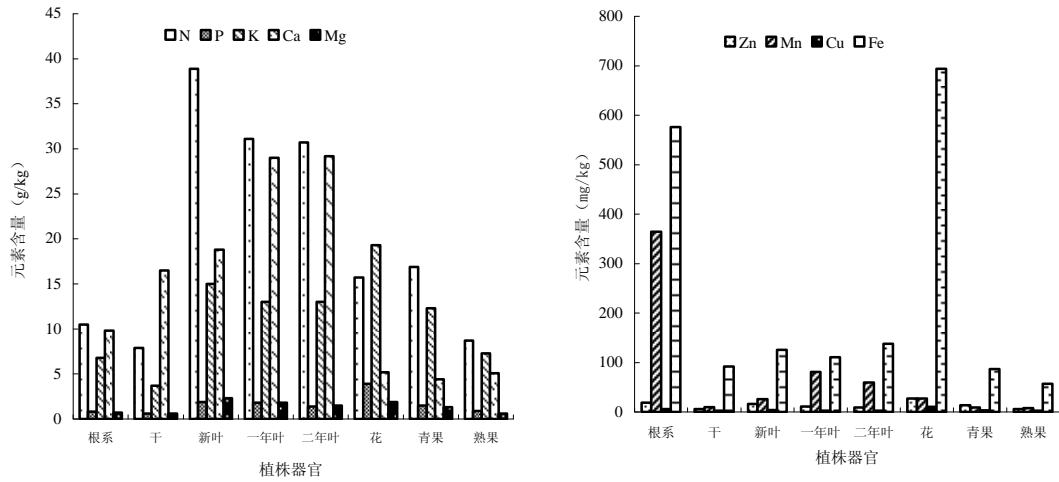


图 1 脐橙各器官营养元素含量

Fig. 1 Nutrient content in different navel oranges

在脐橙的不同器官中，微量元素 Fe 含量最高，其余依次为 Mn>Zn>Cu (图 1)。在各器官中，Fe 含量最高的是花，达 693.53 mg/kg，其余依次为根>叶>树干>果实。Mn 在各器官中的含量高低依次为根系>叶>花>树干>果实。Zn 含量最高的为花，其次为根、叶、果实、树干。Cu 含量最高的为花，其次为根、树干、果实、叶。其中，果实、叶、树干中含量基本相同，各器官含 Cu 量仅相差 2 倍，为所有微量元素中元素含量相差最小的，可见 Cu 在不同器官中的分配较为均匀。在上述 4 种微量元素中，根系、树干、叶片含量高低次序相同，均为 Fe>Mn>Zn>Cu；果实含量高低次序为 Fe>Mn>Zn>Cu；花含量高低次序为 Fe>Zn>Mn>Cu (图 1)。

2.2.2 脐橙对元素的生物富集系数 脐橙对元素的生物富集系数表示脐橙植株从土壤中摄取元素强烈程度，生物富集系数： $X_j = T_j/S$ 。式中， T_j 是元素在 j 介质（器官）中的含量， S 是在土壤中的含量（施肥圈土壤元素全量）， X_j 是 j 介质对元素的生物富集系数^[19]。按脐橙对元素吸收程度的大小，将生物富集系数分为 4 个等级：I：强烈摄取元素 ($X_j \geq 1$)；II：中等摄取元素 ($X_j \geq 0.1$)；III：微弱摄取元素 ($X_j \geq 0.01$)；IV：极微弱摄取元素 ($X_j \leq 0.01$)。

生物富集系数包含了脐橙对元素需要的程度、摄入量及该元素在土壤中的丰度等含义。一般说，生物富集系数较大 ($X_j \geq 0.1$) 的元素，是脐橙从土壤中主动选择吸收的组分，为其生理必需元素。但是，生物富集系数小的元素，不一定都不是脐橙需要的元素。

因为尽管某元素为脐橙必需，但是由于它在土壤中含量太高，以致计算出的生物富集系数小。分别计算了脐橙植株对 9 个元素的生物富集系数及全体平均值 (表 3)。由表可知，脐橙对元素的生物富集系数分等级如下：大量元素均为脐橙强烈摄取元素；微量元素 Zn、Mn、Cu 为中等摄取元素，Fe 为极微弱摄取元素。由表 3 可看出，脐橙新叶、花、青果对各元素的生物富集系数均较大，在生长期时，需要大量来自于土壤的营养元素维持其生理活动^[20]。此时，如果土壤元素供给不足就会发生缺素现象，会影响脐橙的生长。

2.3 各营养元素在脐橙器官内的转运特征

转运系数是描述元素从根部（土壤）到植物各器官间迁移富集的重要地球化学参数^[20]，从转运系数 (表 4) 可以看出，对于大量元素，叶是最富集的器官，与树干相比，各元素的转运系数介于 1.76 ~ 3.91，与根相比，各元素转运系数介于 1.9 ~ 2.97，与果实相比，各元素转运系数介于 1.78 ~ 5.71，说明叶至脐橙其他器官总体转移富集强度较强。花与树干相比，除 Ca 的转运系数较低外，其余元素转运系数介于 1.99 ~ 6.50。树干与其他器官相比，对于 N、P、K、Mg 的转运系数均小于 1。从根到树干，各大量元素的转移系数介于 0.59 ~ 1.84 之间。

微量元素从根到树干、果实，转运系数均远小于 1，特别是 Mn，根到果实转运系数仅为 0.022，说明相对于根，树干、果实对微量元素的生物富集量微弱，尤其对 Mn 的生物富集量极其微弱；从树干到叶，对 Zn、Mn、Fe 转运系数介于 1.35 ~ 7.23，说明从树干到

表3 脐橙植株对各营养元素的生物富集系数

Table 3 Absorption coefficients of elements in the navel orange plants

| 器官 | 大量元素 | | | | | 微量元素 | | | |
|-----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | N | P | K | Ca | Mg | Zn | Mn | Cu | Fe |
| 根系 | 13.125 | 2.105 | 0.673 | 0.681 | 1.489 | 0.228 | 0.497 | 0.191 | 0.015 |
| 干 | 9.875 | 1.579 | 0.366 | 1.146 | 1.277 | 0.066 | 0.013 | 0.088 | 0.002 |
| 新叶 | 48.625 | 5.000 | 1.485 | 1.306 | 4.894 | 0.194 | 0.035 | 0.130 | 0.003 |
| 一年叶 | 38.875 | 4.737 | 1.287 | 2.014 | 3.830 | 0.135 | 0.110 | 0.090 | 0.003 |
| 二年叶 | 38.375 | 3.684 | 1.287 | 2.028 | 3.191 | 0.106 | 0.081 | 0.080 | 0.004 |
| 花 | 19.625 | 10.263 | 1.911 | 0.361 | 4.043 | 0.329 | 0.037 | 0.333 | 0.018 |
| 青果 | 21.125 | 3.947 | 1.218 | 0.306 | 2.766 | 0.162 | 0.012 | 0.108 | 0.002 |
| 熟果 | 10.875 | 2.368 | 0.723 | 0.354 | 1.277 | 0.074 | 0.011 | 0.089 | 0.002 |
| 平均值 | 25.063 | 4.210 | 1.119 | 1.025 | 2.846 | 0.162 | 0.100 | 0.139 | 0.006 |
| 标准差 | 14.845 | 2.742 | 0.5 | 0.718 | 1.388 | 0.088 | 1.645 | 0.087 | 0.007 |

表4 脐橙不同器官大量元素和微量元素转运特征

Table 4 Translocation characteristics of macroelements and microelements in different organ of navel oranges

| 器官 | 大量元素 | | | | | 微量元素 | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | N | P | K | Ca | Mg | Zn | Mn | Cu | Fe |
| 干/根 | 0.75 | 0.75 | 0.54 | 1.69 | 0.85 | 0.29 | 0.03 | 0.46 | 0.16 |
| 果实/根 | 0.83 | 1.12 | 1.08 | 0.52 | 0.85 | 0.32 | 0.02 | 0.47 | 0.10 |
| 花/根 | 1.49 | 4.76 | 2.86 | 0.53 | 2.70 | 1.45 | 0.07 | 1.75 | 1.20 |
| 叶/根 | 2.94 | 2.00 | 1.91 | 2.97 | 2.29 | 0.53 | 0.19 | 0.44 | 0.22 |
| 叶/干 | 3.91 | 2.67 | 3.51 | 1.76 | 2.67 | 1.82 | 7.23 | 0.96 | 1.35 |
| 叶/果实 | 3.55 | 1.78 | 1.78 | 5.71 | 2.67 | 1.64 | 8.71 | 0.95 | 2.17 |
| 叶/花 | 1.97 | 0.41 | 0.67 | 5.60 | 0.84 | 0.37 | 2.60 | 0.25 | 0.18 |
| 花/干 | 1.99 | 6.50 | 5.22 | 0.32 | 3.17 | 4.96 | 2.78 | 3.77 | 7.54 |
| 花/果实 | 1.80 | 4.33 | 2.64 | 1.02 | 3.17 | 4.46 | 3.35 | 3.74 | 12.13 |

叶有富集的特点，但叶与根相比，转运系数均小于1，微量元素在根部富集，向上传输时在树干存储较小，在叶部略有富集。从花到树干、叶、根，对Zn、Cu、Fe转运系数均大于1，说明这4种微量元素在花部富集。

3 结论

试验地脐橙园土壤具有缺N、低P、富K的特点，土壤速效态N、P、K含量差异较大，土壤中微量元素含量为三峡库区紫色土微量元素含量的中等水平，但并不缺乏。脐橙在生长过程中，需要大量来自于土壤的营养元素维持其生理活动，因此，该试验区脐橙园必须采取针对性措施，一方面提高有机肥施用量，培肥土壤，提高N、P养分含量，同时根据脐橙生理需求，适时补充N、P、K养分，提高养分供应强度。

脐橙必需大量元素、微量元素在脐橙果树体内具

有不同的生物地球化学行为，大量元素、微量元素在脐橙各器官的分配含量与地壳土壤背景值的分异含量趋势基本一致，土壤背景是这3类元素的主要控制因素。在脐橙各器官中，叶、花、根为大量元素与微量元素较为富集的器官，而树干、果实对各营养元素的富集程度较弱。

参考文献：

- [1] 罗明, 沈烨. 海拔高度对脐橙营养生长与果实品质的影响. 四川果树, 1996, 24(4): 3-4
- [2] 张人庆. 奉节脐橙基地开发评述. 四川果树, 1996, 24(2): 35-36
- [3] 石健泉, 沈丽娟, 卢美玲. 广西甜橙品种资源特性评价. 中国柑桔, 1995, 24(4): 14-16
- [4] 童文彬, 胡水泉, 陈莲芳. 脐橙溃疡病的防治措施. 中国南方果树, 1996, 25(2): 28

- [5] 杨有柱. 提高脐橙入果率的果实品质的技术措施. 中国南方果树, 1997, 26(3): 20-21
- [6] 庄伊美, 王仁玕, 谢志南. 巴林脐橙叶片元素含量适宜指标研究. 亚热带植物通讯, 1997, 26(2): 1-6
- [7] 李继承, 李先信, 彭俊彩. 五种矿质元素对脐橙树体营养状况的影响. 湖南农业大学学报, 1999, 25(1): 36-39
- [8] 吴香尧, 童纯茵. 四川眉山脐橙果树各器官及其土壤中稀土元素分布特征研究. 成都理工学院学报, 2002, 29(3): 346-349
- [9] 唐将, 李勇, 付绍红, 邓富银, 赵琦, 雷家立. 奉节脐橙不同器官元素含量分布特征. 生态学报, 2005, 25(1): 31-36
- [10] 汪振立, 徐明, 邓通德, 贺小雄, 陈水木, 欧阳锦盛, 幸青明. 自然土壤环境下脐橙植物体稀土积累特征. 中国稀土学报, 2009, 27(5): 704-710
- [11] Taylor BK, Dimsey RT. Rootstock and scion effects on the leaf nutrient composition of citrus. Aust. J. Exp. Agric., 1993, 33: 363-371
- [12] Storey R, Treeby MT. Seasonal changes in nutrient concentrations of navel orange fruit. Scientia Horticulturae, 2000, 84: 62-67
- [13] 杨林章, 董元华, 马毅杰. 三峡库首地区土地资源潜力与生态环境建设. 北京: 水利水电出版社, 2007: 191-212
- [14] 韩庆忠, 夏立忠, 向琳, 王功明, 杨爱民. 三峡库区脐橙园土壤养分、酸度变化特征与施肥管理对策—以秭归县水田坝乡为例. 土壤, 2008, 40(4): 602-607
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 205-226
- [16] 董杰, 罗丽丽, 杨达源, 陈可锋. 三峡库区紫色土坡地土壤退化特征: 土壤养分贫瘠化. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 58-64
- [17] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96
- [18] 鲁建巍, 陈防, 王富华. 湖北省柑桔园土壤养分分级研究. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 390-394
- [19] 曾群望. 云南东部烤烟农业地质背景相关性研究. 云南地质, 1994, 13(2): 122-132
- [20] 叶荣, 李蔚萍. 桂东南荔枝生长营养元素农业地球化学研究. 地学前缘, 2006, 13(1): 119-127

Agro-geochemistry Study on Nutrient Elements in Frost Navel Orange in The Three Gorges Region

LIU Guo-hua^{1, 2}, YANG Lin-zhang², XIA Li-zhong², LI Yun-dong², MA Li²

(1 Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Under the field condition, the distribution and abundance of the nutrient (N, P, K, Ca, Mg, Zn, Mn, Cu, Fe) in the citrus and the agro-chemistry of the nutrient elements were analyzed in the present study. The results showed that Ca and K had the maximal contents in the trunk and flower respectively. The distribution of macroelement in the root and leaf was similar. The macroelement in the plant parts which was uptaken strongly was consistent with that in the surface soils. The microelement of Zn, Mn and Cu was uptaken moderately, while the uptake of Fe was very weak. The nutrients were controlled strictly by the background contents of the soil. The amounts of elements in the leaf, flower and root were significantly higher than in the other parts of navel organs, while the trunk and fruit was relatively lower. In the test area, the contents of N and P were deficient but K was rich, so the ratio of N and P should be adjusted in order to improve the supply of N and P by the soil.

Key words: Three Gorge Region, Navel orange, Nutrients, Agricultural geochemistry