

稻叶分段硅同位素组成 及硅、钾、钠、钙、镁分布特征*

孙立¹, 吴良欢¹, 丁悌平², 田世洪²

(1. 浙江大学环境与资源学院//环境修复与生态健康教育部重点实验室, 浙江 杭州 310029;
2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 稳定性硅同位素在植物体内的组成模式对研究硅生物循环、植物硅积累的机理具有重大意义。通过水培试验, 研究了成熟期水稻叶内硅同位素组成及 Si、K、Na、Ca 和 Mg 营养元素的分布情况。试验结果表明, 将水稻叶沿长轴按叶鞘、叶片基段、叶片中段和叶片顶段 4 部分划分后, 各段的 Si 质量分数和 $\delta^{30}\text{Si}$ 值都存在显著差异, 并呈现从叶下部到上部逐渐增加的一致趋势。在测定的其它营养元素中, 只有 Ca 在水稻叶中的分布与 Si 类似, K 和 Na 在叶鞘中的质量分数高于叶片, Mg 在叶不同部位质量分数没有显著差异。本试验中水稻叶不同部位 $\delta^{30}\text{Si}$ 值变化范围是 $-0.25\% \sim 0.23\%$, 超出了目前已知陆生植物样品 $\delta^{30}\text{Si}$ 值的变化范围 ($-0.17\% \sim 0.25\%$)。试验结果显示了水稻叶内硅分布主要受蒸腾作用的影响, 硅同位素在叶中的分馏属于同位素动力学分馏。

关键词: 硅; 同位素分馏; 水稻; 分布

中图分类号: O613.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 04-0094-06

生物体组织中的碳、氢、氧和氮等稳定同位素的变化特征已被广泛应用于生理和生态研究^[1-3]。近年来, 随着硅同位素测试精度的提高和快速测量技术的出现, 生物体硅同位素组成及其变化规律也开始逐渐引起人们的关注。

硅是地壳和土壤中质量分数仅次于氧的第二大元素。它几乎存在于所有生长于土壤中的植物体内, 其在植物干物质中的质量分数范围约为 0.1% ~ 10%, 相当于或甚至超过常量元素 (如钙、镁等)^[4]。对大多数高等植物来说, 硅还没有被列为生长的必需元素, 只有少数几种植物如木贼属植物 (*Equisetaceae*) 和一些含硅量高的禾本科植物的正常生长必需硅元素。但硅对植物的形态结构、生长发育以及抗逆能力的有益作用被越来越多的为人们所重视^[5]。硅一般以单硅酸的形式通过植物根部进入植株, 随蒸腾流运输到植物不同组织和器官中, 不可逆的沉积在细胞腔、细胞壁、胞间隙或细胞外层结构中, 形成一种水化的非晶质 SiO_2 (即 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 或聚合硅胶、蛋白石)^[4]。

人们已经发现生物体在吸收硅时硅同位素会产生分馏效应, 在生物和环境形成不同的硅同位素特征值, 并试图利用这种变化来探索区域或全球的生物硅循环^[6]。目前, 此类研究还是以海洋和河流系统为主要对象^[7-10]。但陆生植物硅质量分数

及硅同位素组成的变化近来也逐渐引起人们的注意^[11]。人们发现, 与藻类、海绵体和放射虫等低等生物不同, 陆生植物内部不同器官之间也存在明显的硅同位素分馏现象^[12-14]。我们在对不同基因型野生水稻调查时, 观察到水稻不同器官的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值变化有较为一致的规律, 即籽粒 > 稻壳 > 茎叶 > 根^[15]。然而, 对植株硅同位素数据做更加清楚的解释和利用还需要进一步了解和掌握植株不同组织器官间硅同位素分馏的规律。水稻是典型的喜硅植物, 其茎叶干物质中含 SiO_2 可达 15% ~ 20%, 一直是人们研究硅素营养机理的模型植物^[4]。同时水稻是重要的粮食作物, 种植面积广泛, 其生长繁殖对硅生物地球化学循环有重要的影响^[5, 15]。因此, 本次试验采用溶液培养方法研究了水稻叶不同部位的硅同位素组成、硅及其它营养元素质量分数的变化。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2005 年 4 - 8 月在浙江大学华家池校区玻璃温室进行, 供试水稻品种为浙农 952 (*Oryza sativa* L. cv. Zhenong 952), 采用盆栽水培方法。种子用 $\varphi = 10\%$ 双氧水消毒 5 min, 然后用蒸馏水反复冲洗, 最后将种子铺在润湿的滤纸上置于 25

* 收稿日期: 2007 - 11 - 14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40473011)

作者简介: 孙立 (1979 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 吴良欢; E-mail: finm@zju.edu.cn

℃恒温箱内培养10 d。选择8株匀称、健壮的幼苗移栽到塑料盆中。盆长、宽、深分别为60、40、24 cm, 周围包有遮光黑布, 盆上盖板均布8个定植孔。每只塑料盆盛有50 L营养液, 营养元素浓度采用国际水稻研究所提供的配方^[16]。

所用的硅源为 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (分析纯), 经 H_2SO_4 中和后使用。营养液供硅初始浓度为16 mmol/L。已有研究表明, 单硅酸在25℃, pH=6的水溶液中的溶解度为大约为2 mmol/L, 在超饱和和硅酸溶液中过剩的单硅酸会迅速发生凝聚, 形成单硅酸与硅酸多聚物的平衡体系^[17]。因而在本试验超饱和供硅的营养液中, 单硅酸浓度约为2 mmol/L, 这一供硅浓度与国际水稻所推荐水稻营养液的供硅浓度(1.6~2.5 mmol/L)相匹配。我们采用超饱和供硅和大剂量营养液的水培方式, 主要目的是使营养液中供硅量始终大于植物对硅的吸收量, 以避免硅源耗竭产生的同位素效应对试验的影响, 以及频繁更换营养液所造成的营养液中硅同位素组成的波动。配制营养液的水为蒸馏水, 每14天更换营养液一次, 期间每7天检测一次营养液中N、P、K、Ca和Mg的质量分数, 根据剩余量补充营养物。每日通气和补充由于蒸腾作用所损失的蒸馏水, 并调节营养液pH值在6.0~6.1之间。整个试验设3次重复。

幼苗移栽106 d后, 水稻成熟时收获。将植株叶剥下, 用蒸馏水反复冲洗干净, 然后用吸湿纸吸干。如图1, 将每张稻叶沿着叶的长轴分为叶鞘、叶片基段、叶片中段和叶片顶段(此后分别称为LS, LBB, LBM, LBT)4部分, 置于80℃烘箱中鼓风烘干72 h。烘干的样品经磨细过0.5 mm筛后供元素分析用。

1.2 分析测定项目和方法

(1) SiO_2 提取与硅质量分数的测定: 参照文献[15]的方法进行。称取1 g粉碎后的植株干样置于铂金坩埚中, 在马弗炉中于650~700℃下灰化5 h。将灰化后的样品置于100 mL的塑料烧杯中, 加入10 mL盐酸(1:1)在100℃下溶解, 之后加入5 mL浓硝酸, 加热蒸发至近干。反复加入同样的盐酸和硝酸溶解蒸干3次。再加入15 mL稀盐酸($w=5\%$)煮沸2 min。将所得溶液用滤纸过滤, 并用热的稀盐酸($w=5\%$)和蒸馏水分别润洗滤纸5次。将带有 SiO_2 沉淀的滤纸放入铂金坩埚在马弗炉中于650~700℃下灰化5 h后, 再于1000℃下煅烧1 h, 得到 SiO_2 样品。用质量法计算出植株中硅质量分数。本方法提取 SiO_2 时, 不会改变硅同位素丰度。

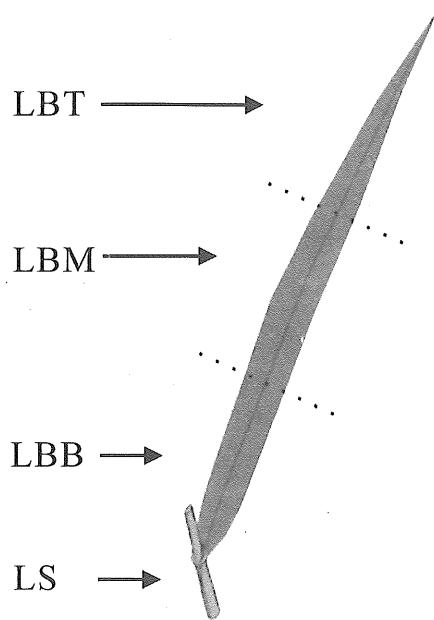


图1 水稻叶分段示意图

Fig. 1 The view of rice leaf sampled

LS: 叶鞘; LBB: 叶片基段; LBM: 叶片中段; LBT: 叶片顶段(下同)

(2) 其它元素的测定: 上述步骤中所得滤液定容后, 用ICP-MS测量K、Na、Ca和Mg的质量分数。

(3) 硅同位素的测定: 参照文献[15]的方法进行。将提取的 SiO_2 样品, 与 BrF_3 在真空中反应后得到气态 SiF_4 , 样品通过同位素质谱仪(MAT-253)测量其硅同位素丰度。测试结果用 $\delta^{30}\text{Si}$ 相对于美国国家标准局石英砂标准NBS-28表示。

$$\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}} (\%) = \left[\left(\frac{{}^{30}\text{Si}}{{}^{28}\text{Si}} \right)_{\text{Sample}} / \left(\frac{{}^{30}\text{Si}}{{}^{28}\text{Si}} \right)_{\text{NBS-28}} - 1 \right] \times 10^3$$

测试所得 $\delta^{30}\text{Si}$ 精度优于 $\pm 0.01\%$ (2σ)。

以上数据测试工作, 元素质量分数分析和硅同位素测定分别在中国地质科学院国家地质实验测试中心和矿产资源研究所稳定同位素地球化学实验室完成。

试验数据统计分析采用Duncan's新复极差检验法。

2 结果与分析

2.1 水稻叶不同部位生物量和硅质量分数变化

由表1看出, 本试验中水稻叶沿长轴分段后, 所得各部分干质量变化顺序为 $\text{LS} > \text{LBM} > \text{LBB} > \text{LBT}$ 。稻叶硅质量分数的变化范围为5.27%~18.73%, 平均值为10.14%。考虑到本试验水稻为水培供硅充分条件下生长, 因此叶平均硅质量分

数略高于野外大田取样的观测值^[15]。叶各段硅质量分数差异显著, 且呈现由下部至上部逐渐增大的趋势, 即硅质量分数变化顺序为 $LS < LBB < LBM <$

LBT。硅在水稻叶中各段的累积量相差并不大, 叶鞘和叶片中段在硅的分配比例中略高于叶片基段和顶段。

表 1 水稻叶不同部位生物量、Si 质量分数、Si 积累量和分配比例¹⁾

Tab. 1 Biomass (dry wt), Si concentration, accumulation and distribution in different parts of rice leaf

部位 ²⁾	干质量/(g·株 ⁻¹)	Si 质量分数/%	Si 积累量/(g·株 ⁻¹)	Si 分配比例/%
LS	8.126 ± 1.324 a	5.27 ± 0.37 d	0.426 ± 0.039 a	28.10
LBB	2.465 ± 0.216 b	13.30 ± 0.59 c	0.324 ± 0.016 b	21.37
LBM	2.570 ± 0.203 b	16.19 ± 0.64 b	0.415 ± 0.017 a	27.38
LBT	1.888 ± 0.194 b	18.73 ± 0.86 a	0.351 ± 0.040 b	23.15
叶 ³⁾	15.049	10.14	1.516	

1) 数据后伴随的不同小写字母表示稻叶不同部位之间在 $P=0.05$ 差异显著; 2) LS: 叶鞘; LBB: 叶片基段; LBM: 叶片中段; LBT: 叶片顶段; 3) 由平均值计算

2.2 水稻叶不同部位营养元素变化

本试验检测了 K、Na、Ca 和 Mg 4 种阳离子营养元素在水稻叶各段的分配模式 (以干质量计, 下同)。由图 2 看出, 各元素变化规律并不相同。只有 Ca 在叶片各段的质量分数变化 ($3.08 \sim 7.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 模式与 Si 相同, 也展现出由叶下部至上部的增加趋势, 即各段 Ca 质量分数变化顺序为 $LS < LBB < LBM < LBT$ 。K 在叶各段的质量分数变化模式与 Ca 和 Si 完全相反, 从叶鞘至叶片顶段呈逐渐降低的趋势, 其变化范围是 $6.82 \sim 15.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Na 质量分数变化范围是 $0.48 \sim 3.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是测量的各元素中质量分数变化最大的, 叶鞘中 Na 质量分数大约是叶片中的 7 倍, 而在叶片上中下三段中 Na 质量分数并没有明显的变化。Mg 在水稻叶中质量分数变化范围是 $3.15 \sim 3.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各段没有显著差异。

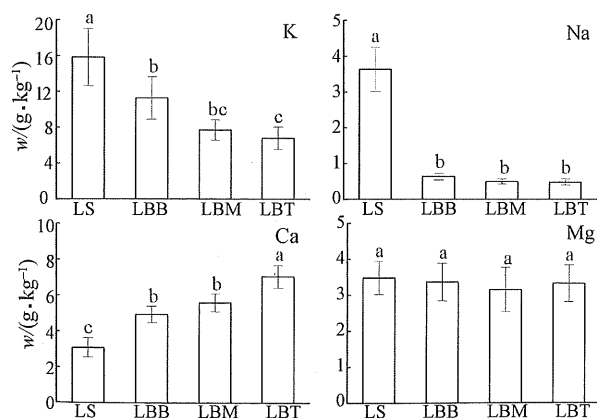


图 2 水稻叶不同部位 K、Na、Ca 和 Mg 质量分数

Fig. 2 K, Na, Ca and Mg concentration in different parts of rice leaf

以干质量计, 不同小写字母表示稻叶不同部位之间在 $P=0.05$ 差异显著 (下同)

2.3 水稻叶不同部位硅同位素组成变化

由图 3 看出, 水稻叶各段的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值差异显著, 但各段自身的 $\delta^{30}\text{Si}$ 测量值比较稳定。叶鞘的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值最小, 在 $-0.22\% \sim -0.25\%$ 之间, 平均值为 -0.24% ; 叶片基段的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值在 $0.06\% \sim 0.08\%$ 之间, 平均值为 0.07% ; 叶片中段的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值在 $0.12\% \sim 0.14\%$ 之间, 平均值为 0.13% ; 叶片顶段的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值最大, 在 $0.22\% \sim 0.23\%$ 之间, 平均值为 0.23% 。与硅质量分数变化模式相比 (图 3), 水稻叶各段的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值也同样呈现出从叶鞘至叶片顶段逐渐升高的趋势。

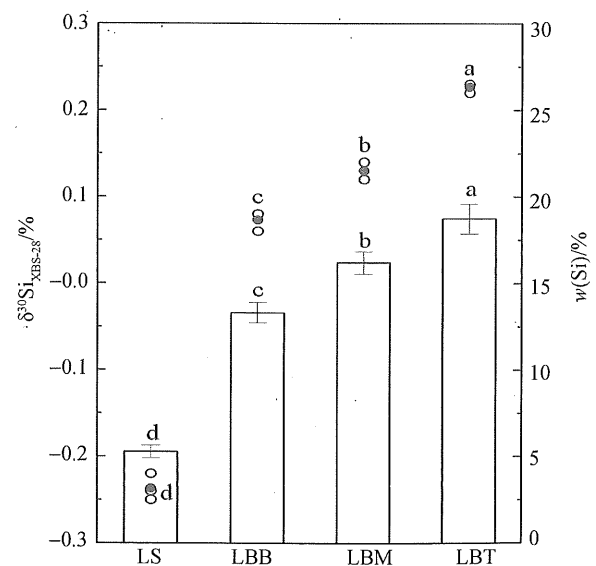


图 3 水稻叶不同部位 Si 同位素组成和 Si 质量分数

Fig. 3 Si isotope composition and Si concentration in different parts of rice leaf

以干质量计, 硅同位素单次测量值 (空心圆点); 硅同位素平均值 (实心圆点); 硅质量分数 (柱状图)

3 讨论

3.1 硅及其它元素在水稻叶中的分配规律

已有研究表明, 硅在植株地上部的运输是随蒸腾流以单硅酸的形式运输到植物不同组织和器官中, 随着水分的流失(蒸发)硅酸浓度逐渐升高, 发生脱水聚合, 并最终 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 的形式不可逆的沉淀下来。而韧皮部的汁液中硅质量分数极低, 可以忽略不计^[18]。何电源^[19]发现水稻植株内硅质量分数为: 颖壳>叶片>叶鞘>茎>根。梁永超等^[20]测定, 水稻各器官中 SiO_2 质量分数大小依次为谷壳(15%)、叶片(12%)、叶鞘(10%)、茎(5%)、根(2%)。这种硅主要的沉积部位同主要的蒸腾作用部位相一致的“末端分布现象”被认为是由于硅在水稻地上部分各器官的分布主要受蒸腾作用的影响。本试验对水稻叶的分段研究中也观察到叶中有同样的“末端分布现象”, 即从叶鞘到叶片顶端硅质量分数逐渐增加。这一结果显示了硅更多的积累在蒸腾流的末端, 从而也进一步证实了蒸腾作用对水稻硅分布的影响。

本试验同时研究了K、Na、Ca和Mg在水稻叶中的分布模式, 发现它们并不一致(图2)。只有Ca在叶中的分布与Si类似, 我们认为这是由于Ca在植株地上部的运输方式与Si基本相同。研究表明植物Ca的长距离运输主要发生在木质部, Ca在韧皮部浓度很低, 难以在韧皮部运输, 其运输的动力主要是蒸腾作用。Ca由蒸腾液流从木质部到达旺盛生长的枝梢、幼叶、花、果及顶端分生组织后几乎不再分配与运输^[21]。K、Na和Mg在植株中的运输虽然也是受蒸腾作用影响, 但都具有很强的移动性, 能够通过韧皮部从老叶转移到幼叶和生长点部位, 具有随生长中心的转移而转移的特点^[21-22]。在本试验中发现K、Na和Mg在水稻叶中的分布模式也不相同, 只有Mg在叶鞘和叶片各段的分布比较均匀, 各段的Mg质量分数没有明显差异。Na在叶鞘中的质量分数都明显高于叶片, 并且二者的差距大约是7倍, 而在叶片中的分布比较均匀。Gong等^[23]在对水稻幼苗的研究时也发现了叶鞘中Na质量分数高于叶片的现象, 但是目前植物Na生理研究还处于探索阶段, 其在植物体内分布的成因有待进一步研究。郑宪滨等^[24]在烟株K分布的研究中发现在供K充足的条件下, 下部烟叶K质量分数最高, 中部次之, 上部最低, 认为K在老叶中能够获得较多的积累。本研究K在叶中的质量分数整体呈现了由叶下部至叶上部逐渐降低的趋势, 可能也是相似的原因。水稻在供K

充足的水培条件下生长, 因而K在水稻叶生长时间长的部位累积较多。由于本试验对水稻叶采用分段的研究方法还未见其它报导, 因此上述试验结果还有待进一步的生理学研究检验, 但所观察到的现象对植物生理和营养研究具有潜在的意义。

3.2 硅同位素在水稻叶中的分馏规律

在 SiO_2 由高浓度 H_4SiO_4 溶液中沉淀的硅同位素分馏实验中发现, SiO_2 沉淀过程符合动力学同位素分馏的一般原理, $\text{H}_4^{28}\text{SiO}_4$ 总是优先反应、沉淀, 形成 $\delta^{30}\text{Si}$ 较低的 SiO_2 , 而使溶液中残留的溶解硅相对富集 ^{30}Si ^[25]。在蒸腾作用的驱动下, 在溶液向上流动的过程中, 随着相对质量较轻的 ^{28}Si 的逐渐沉淀, 剩余溶解硅的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值逐渐升高, 导致沉淀的 SiO_2 的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值也逐渐升高, 最终在蒸腾流末端沉淀出的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值最高的 SiO_2 。本试验硅同位素在水稻叶中的分馏呈现出从叶下部到叶上部 $\delta^{30}\text{Si}$ 值逐渐增大的趋势, 与蒸腾流方向一致。在对水稻和竹子不同器官的硅同位素的研究中也发现从植株下部器官到上部器官 $\delta^{30}\text{Si}$ 值逐渐升高的变化趋势^[12,15]。因此, 植物体内硅同位素的变化模式也证实了蒸腾作用对硅分布的影响。

硅同位素的变化可能会成为一种重要的信息来示踪硅在生物体各部分的运移途径。已有研究尝试利用植物与其生长环境之间存在的硅同位素分馏探讨植物吸收硅的机理^[14-15]。在水稻研究中Ding等发现植物会优先吸收环境中的轻硅同位素, 并认为这一结果显示水稻吸收硅时被动运输的成分是不能够被排除的, 水稻对硅的吸收可能是一种主动、被动运输同时存在的方式^[15]。稳定性同位素在植物体内的分馏模式与植物生理生化过程密切相关, 本研究显示Ca与Si在稻叶中具有相似的分布特征, 我们推测植物体内钙同位素可能存在与硅同位素类似的分馏; 而K、Na和Mg在稻叶中的变化模式与Ca和Si有明显的区别, 它们都显示了很强的可移动性, 其同位素组成在植物体内的分布特征可能与Si有较大的差别。目前植株硅同位素分馏的研究在国际上刚刚起步, 硅同位素信号在植物硅生理方面的应用具有广阔的前景, 也将成为人们今后研究的重点。

3.3 稻叶硅同位素组成的其它应用

由沉积在植物体内的硅($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)构成的“植硅体”(phytolith), 在植物死亡或凋谢之后可以返回土层。它具有耐腐蚀、抗高温特性, 可以在岩石和土壤中保存相当一段时间, 目前发现植硅体最古老地层是下第三系^[26]。由于植硅体记录了

它所起源的植物和环境的特征,目前在植硅体分析在古环境研究、考古学、地质学以及植物学、农学和医学等领域得到广泛的应用^[27-28]。植硅体的另一个优势在于它的硅同位素与植物体中的硅同位素密切相关,而且后生成岩作用不会对地层中植硅体硅同位素值产生显著影响,因此有研究尝试以植硅体硅同位素组成为工具来探索自然界硅循环模式^[6,29]。目前对生物体的硅同位素组成的分析数据仍然十分有限,已观察到的陆生植硅体的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值范围是 $-0.17\% \sim 0.25\%$,其取样分析都是以植物整体或整个器官进行,测量其植硅体 $\delta^{30}\text{Si}$ 的平均值^[11]。本研究发现仅在水稻单一器官叶中 $\delta^{30}\text{Si}$ 值的范围($-0.25\% \sim 0.23\%$)已经超过了之前报导的数据。这一结果表明硅同位素分馏不仅存在于生长环境不同的植株之间,而且存在于植物器官之间,甚至存在于同一器官的不同部位。因此,在利用植硅体硅同位素组成探索植物生长环境时,还需要做大量的深入的探索性工作。

参考文献:

- [1] BARBOUR M M. Stable oxygen isotope composition of plant tissue: A review[J]. *Functional Plant Biology*, 2007, 34 (2): 83-94.
- [2] EVANS R D. Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition[J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6 (3): 121-126.
- [3] HOBBI E A, WERNER R A. Intramolecular, compound-specific, and bulk carbon isotope patterns in C-3 and C-4 plants: A review and synthesis[J]. *New Phytologist*, 2004, 161 (2): 371-385.
- [4] EPSTEIN E. Silicon[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50: 641-664.
- [5] RAVEN J A. Cycling silicon - the role of accumulation in plants - Commentary[J]. *New Phytologist*, 2003, 158 (3): 419-421.
- [6] BASILE - DOELSCH I, MEUNIER J D, PARRON C. Another continental pool in the terrestrial silicon cycle[J]. *Nature*, 2005, 433 (7024): 399-402.
- [7] DE LA ROCHA C L, BRZEZINSKI M A, DENIRO M J. Fractionation of silicon isotopes by marine diatoms during biogenic silica formation[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (23): 5051-5056.
- [8] DE LA ROCHA C L, BRZEZINSKI M A, DENIRO M J, et al. Silicon - isotope composition of diatoms as an indicator of past oceanic change[J]. *Nature*, 1998, 395: 680-683.
- [9] DE LA ROCHA C L. Silicon isotope fractionation by marine sponges and the reconstruction of the silicon isotope composition of ancient deep water[J]. *Geology*, 2003, 31 (5): 423-426.
- [10] REYNOLDS B C, FRANK M, HALLIDAY A N. Silicon isotope fractionation during nutrient utilization in the North Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244 (1-2): 431-443.
- [11] BASILE - DOELSCH I. Si stable isotopes in the Earth's surface: A review[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88 (1-3): 252-256.
- [12] DING T P, WAN D F, WANG C Y, et al. Large and systematic silicon isotope fractionation discovered in single sticks of bamboo[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2003, 67 (18): A79.
- [13] OPFERGELT S, CARDINAL D, HENRIET C, et al. Silicon isotope fractionation between plant parts in banana: In situ vs. in vitro[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88 (1-3): 224-227.
- [14] OPFERGELT S, CARDINAL D, HENRIET C, et al. Silicon isotopic fractionation by banana (*Musa* spp.) grown in a continuous nutrient flow device[J]. *Plant and Soil*, 2006, 285 (1-2): 333-345.
- [15] DING T P, MA G R, SHUI M X, et al. Silicon isotope study on rice plants from the Zhejiang province, China[J]. *Chemical Geology*, 2005, 218 (1-2): 41-50.
- [16] YOSHIDA, S. Routine procedures for growing rice plants in culture solution[M]//YOSHIDA S, FORNO D A, COCK J H, et al. In laboratory manual for physiological studies of rice. Manila: International Rice Research Institute, 1976: 61-66.
- [17] CONRAD C F, ICOPINI G A, YASUHARA H, et al. Modeling the kinetics of silica nanocolloid formation and precipitation in geologically relevant aqueous solutions[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2007, 71 (3): 531-542.
- [18] MA J F, YAMAJI N. Silicon uptake and accumulation in higher plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2006, 11 (8): 392-397.
- [19] 何电源. 土壤和植物中的硅[J]. *土壤学进展*, 1980, 5: 1-10.
HE Dianyuan. Silicon in soil and plants[J]. *Progress in Soil Science*, 1980, 5: 1-10.
- [20] 梁永超, 张永春, 马同生. 植物的硅素营养[J]. *土壤学进展*, 1993, 21 (3): 7-14.
LIANG Yongchao, ZHANG Yongchun, MA Tongsheng. Silicon nutrition in plant[J]. *Progress in Soil Science*, 1993, 21 (3): 7-14.
- [21] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 56-167.
LU Jingling. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 56-167.

- [22] EPSTEIN E, BLOOM A J. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives [M]. 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates Publishers, 2005: 203 - 233.
- [23] GONG H J, RANDALL D P, FLOWERS T J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow [J]. Plant Cell and Environment, 2006, 29 (10): 1970 - 1979.
- [24] 郑宪滨, 曹一平, 张福锁, 等. 不同供钾水平下烤烟体内钾的循环、累积和分配[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 6 (2): 166 - 172.
- ZHENG Xianbin, CAO Yiping, ZHANG Fusuo, et al. Circulation, accumulation and distribution of potassium in flue - cured tobacco with different potassium levels [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 6 (2): 166 - 172.
- [25] LI Y H, DING T P, WAN D F. Experimental study of silicon isotope dynamic fractionation and its application in geology[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1995, 14 (3): 212 - 219.
- [26] 姜钦华. 评价《植物硅石分析》一书及学科的应用前景[J]. 地质评论, 1992, 38 (5): 481 - 482.
- JIANG Qinhu. Evaluation on phytolith analysis and its application perspectives[J]. Geological Review, 1992, 38 (5): 481 - 482.
- [27] PARKER A G, ECKERSLEY L, SMITH M M, et al. Holocene vegetation dynamics in the northeastern Rub' al - Khali desert, Arabian peninsula: A phytolith, pollen and carbon isotope study[J]. Journal of Quaternary Science, 2004, 19 (7): 665 - 676.
- [28] PRYCHID C J, RUDALL P J, GREGORY M. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons[J]. Botanical Review, 2003, 69 (4): 377 - 440.
- [29] 张新荣, 胡克, 王东坡, 等. 植硅体研究及其应用的讨论[J]. 世界地质, 2004, 23 (2): 112 - 117.
- ZHANG Xinhua, HU Ke, WANG Dongpo, et al. Discussion on research and application of phytolith [J]. World Geology, 2004, 23 (2): 112 - 117.

Silicon Isotope Compositions and Distribution Patterns of Si, K, Na, Ca, Mg in Different Parts of Rice Leaf

SUN Li¹, WU Liang-huan¹, DING Ti-ping², TIAN Shi-hong²

(1. Ministry of Education Key Lab of Environmental Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;
2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: An understanding of the variations of silicon (Si) isotopes in plant tissues has potentially important applications in elucidating the biogeochemical Si cycle and Si accumulation in plants. Si isotope compositions and Si, K, Na, Ca, Mg distribution among different parts of rice leaf at maturity were studied by hydroponic culture. For $\delta^{30}\text{Si}$ values and Si distribution in different parts of rice leaf, there was a consistent increasing trend from lower to upper tissues (leaf sheath < leaf blade base < leaf blade middle < leaf blade top). Compared with the distribution patterns of K, Na, Ca and Mg in rice leaf, Ca showed a similar pattern with Si. The concentration of K or Na in leaf sheath was higher than that in leaf blade. There was no significant difference in the Mg concentration for each leaf part. It had been reported that the measured $\delta^{30}\text{Si}$ values of phytoliths for surficial material on earth varied from -0.17‰ to 0.25‰. In present experiment, however, the magnitude of $\delta^{30}\text{Si}$ variation among different parts of rice leaf was even greater, ranging from -0.25‰ to 0.23‰. It is suggested that evapotranspiration was the driving force for an upward flow of a silicon - bearing solution and silica translocation in rice leaf. Si isotope fractionation in rice leaf could be recognized as a kinetic isotope fractionation process.

Key words: silicon; isotope fractionation; rice; distribution