

文章编号:1000-8551(2019)09-1865-08

不同类型土壤对水稻硅同位素分馏的影响

肖 晗^{1,2} 孙 燕³ 周静杰¹ 马庆旭¹ 谢懿楠¹
吴良欢^{1,2,*} 胡兆平^{2,*}

(¹浙江大学环境与资源学院/教育部环境修复与生态健康重点实验室,浙江 杭州 310058;²金正大生态工程集团股份有限公司/养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室,山东 临沂 276000;³西安理工大学水利水电学院/
省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室培育基地,陕西 西安 710048)

摘 要:为探明不同类型土壤对水稻硅同位素组成及分馏的影响,本研究以红壤、黑土和褐土作为供试土壤,以水稻品种嘉 58 作为供试材料进行盆栽试验,测定土壤理化性质,水稻各器官干重、硅含量、硅同位素组成等指标。结果表明,不同类型土壤对水稻硅同位素分馏效应均影响明显,红壤、黑土、褐土栽培的水稻硅同位素分馏系数($\alpha_{\text{Pre-Dsi}}$)分别为 0.998 8、0.997 8、0.997 5,其中褐土栽培的水稻体内硅同位素分馏程度最大,黑土次之,红壤最小;相关性分析表明,水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(整株和叶片)与土壤 pH 值、有机质、有效硅、游离氧化铁和游离氧化铝含量之间均存在极显著相关性($P<0.01$),其中土壤游离氧化铁、游离氧化铝含量随着土壤风化程度的增加均呈升高趋势。由此推断,水稻硅同位素组成可能主要受土壤 pH 值、有机质、有效硅含量及土壤风化程度的影响。本研究结果为利用硅稳定同位素示踪技术探索自然界的硅循环模式提供了理论依据。

关键词:土壤类型;水稻;硅同位素;同位素分馏

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.09.1865

植物通过吸收、转运、沉淀硅(Si)等过程影响陆地硅的生物地球化学循环。研究发现当生物体吸收利用硅时,会产生明显的硅同位素分馏现象^[1-2]。近年来,随着硅稳定同位素技术的快速发展,利用硅同位素特征值研究生物体与环境之间的硅生物地球化学循环,已成为人们了解自然规律的重要手段之一。通过研究水稻^[3-5]、竹子^[6]、香蕉^[7-8]、黄瓜^[9]、玉米^[10]等高等植物硅同位素特征值($\delta^{30}\text{Si}$ 值)发现,其体内不同器官 $\delta^{30}\text{Si}$ 值表现出规律性变化,即除根部外, $\delta^{30}\text{Si}$ 值从基部器官到顶部器官表现出明显增加的趋势。近年来,硅同位素信号与环境因子(尤其是土壤环境)之间的关系开始引起人们的关注。研究表明,对土壤硅同位素信号而言,当原生矿物发生风化时,轻硅同位素会优先进入次生矿物中,导致土壤溶液相对富集更多的重硅同位素^[11-13];此外,土壤中的铁、铝氧化物在吸附硅时同样会优先吸附轻硅同位素^[13-15]。研究发现对植

物硅同位素信号而言,植株 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与土壤可溶性硅 $\delta^{30}\text{Si}$ 值、有机质含量均呈正相关关系^[6, 10],同时还受到土壤风化程度的影响^[16]。上述研究初步揭示了植物体内的硅同位素分馏规律,而关于在硅同位素发生沉淀的过程中,其生长环境中的非生物因素(土壤类型、铁铝氧化物含量等)发挥何种作用,以及植物是否与其所生长的外界环境中非生物因子之间存在某些定量关系尚鲜见报道。

水稻(*Oryza sativa*)是典型的喜硅植物,其体内 SiO_2 含量可达 10%~15%^[17],根部硅累积量甚至是 N、P、K 等大量元素的数倍^[18-19],因此常作为研究硅营养机理的模式植物。此外,水稻是世界上最重要的粮食作物之一,种植面积广泛,其生长发育对自然界中的硅生物地球化学循环有着重要的影响^[3, 5]。本试验在土培条件下,研究不同类型土壤对水稻体内硅同位素组成及分馏的影响,以期利用硅稳定同位素技术探索

收稿日期:2018-09-20 接受日期:2018-12-04

基金项目:国家自然科学基金(31572194)

作者简介:肖晗,女,主要从事植物营养生理与生态研究。E-mail: xiaohan9494@126.com

* 通讯作者:吴良欢,男,教授,主要从事植物营养与养分资源综合管理。E-mail: finm@zju.edu.cn;

胡兆平,男,高级工程师,主要从事养分资源利用与新型肥料研发工作。E-mail: huzhaoping@kingenta.com。同为通讯作者。

自然界的硅循环模式提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种:粳稻嘉 58,由嘉兴市农业科学研究院提供。

供试土壤:红壤(red soil, RS)、黑土(black soil, BS)和褐土(cinnamon soil, CS),其中红壤采自浙江省

金华市琅琊镇新朱村(29°01′12″ N, 119°28′14″ E),黑土采自吉林省长春市城西乡跃进村(43°57′02″ N, 125°12′38″ E),褐土采自山西省长治市郊区老顶山镇关村(36°13′06″ N, 113°08′46″ E),土壤均取自耕作层(0~20 cm)。土壤采集后去除肉眼可见的石块、植物根系和土壤动物,置于阴凉、通风处自然风干,过筛(孔径 2 mm)后用于盆栽试验。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 不同类型土壤基本理化性质
Table 1 Basic chemical properties of different soil types

土壤类型 Soil type	pH 值 pH value	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK /(mg·kg ⁻¹)	有效硅 ASi /(mg·kg ⁻¹)	游离氧化铁 Fe _d /(g·kg ⁻¹)	游离氧化铝 Al _d /(g·kg ⁻¹)
红壤 RS	4.39±0.01	9.10±0.22	0.41±0.04	46.11±1.36	2.34±0.17	61.33±9.61	109.44±0.31	33.67±0.02	8.98±0.46
黑土 BS	5.95±0.01	29.91±0.34	1.79±0.01	151.50±2.92	105.96±7.78	249.33±0.33	208.61±5.59	9.39±0.05	5.27±0.07
褐土 CS	7.45±0.02	46.01±0.56	1.41±0.12	74.11±5.16	10.31±0.17	418.00±34.03	221.21±1.83	13.44±0.14	5.20±0.01

注:数据均为平均值±标准误($n=3$)。下同。
Note: OM: Organic matter. TN: Total N. AN: Alkali-hydrolyzed N. AP: Available P. ASi: Available Si. Fe_d: Free iron oxide. Al_d: Free aluminum oxide. Data are expressed as means ± standard error of the mean ($n=3$). The same as following.

1.2 试验设计

试验于 2017 年在浙江大学紫金港校区日光网室中进行。盆栽试验采用无盖圆形胶质盆(上口径 28 cm,下口径 19 cm,高 22 cm),每个盆钵装土 6.0 kg,按照 N 0.15 g·kg⁻¹(尿素)、P₂O₅ 0.1 g·kg⁻¹(过磷酸钙)、K₂O 0.15 g·kg⁻¹(硫酸钾)施入土壤。其中,磷、钾肥全部作为基肥一次性施入,氮肥 50%作为基肥施入,另外 50%作为穗肥以溶液形式在幼穗分化后期施入土壤。大田育秧后将水稻幼苗移栽至盆钵,每盆 3 穴,每穴 3 株,重复 3 次,一盆作为一个重复,采用随机区组排列。在水稻成熟期时采集水稻样品,每盆随机选择一穴,将水稻按照根、茎、叶、稻壳和糙米分为 5 部分,一穴水稻相同器官混为一个样品,自来水洗净后,用去离子水洗涤 3~4 次,105℃杀青 30 min,65℃烘干后称重,磨细过筛(100 目)后备用,用于元素测定分析。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植物硅含量测定 称取 0.3 g 植物样品于瓷坩埚中,550℃灰化 3 h,然后用 50 mL 0.08 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液将灰分全部洗入 100 mL 塑料瓶中,加入 2 mL 40%氢氟酸(HF),振荡 1 h 后静置过夜。吸取悬液 1 mL 于 50 mL 离心管中,用 0.32% H₃BO₃ 溶液定容至 50 mL,取 1.5 mL 样品溶液于 10 mL 离心管中,加入 1.5 mL 显色剂(0.08 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 和 2%钼酸

铵溶液组成的 1:1 混合液),摇匀后静止 5 min,加入 1.5 mL 3.3%酒石酸和 1.5 mL 0.4%抗坏血酸,摇匀,10 min 后利用 TU-1810 紫外可见分光光度计(北京普仪公司)在 811 nm 波长下测定吸光值^[20],按照公式计算样品硅含量(%):

$$\text{样品硅含量} = \frac{\rho \times V}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ρ :从工作曲线上查得 SiO₂ 的质量浓度,mg·L⁻¹;V:样品总体积,L;10:换算系数;m:烘干后样品质量,g。

1.3.2 植物二氧化硅提取 称取 5 mg 样品与 60~70 mg NaOH·H₂O 混匀,置于 7 mL 四氟乙烯—全氟烷氧基乙烯基醚共聚物(PFA)溶样杯(南京瑞尼克公司)中,200℃高温熔融 3 d。冷却后,向 PFA 溶样杯中加入 2 mL 超纯水置于 DB-3 恒温电热板(常州普仪公司)上加热 1~2 h 使样品溶解。若产生褐色沉淀物,将上述溶液及沉淀全部转移至 10 mL 离心管中,11 000 r·min⁻¹离心 4 min,分离上清液和沉淀物,将沉淀物转移至 PFA 溶样杯中,加入 200 μL 7 mol·L⁻¹ HNO₃,在恒温电热板上加热 5~6 h 使其溶解。选用聚丙烯柱作为淋洗柱,填充物为 AG50-X8 树脂(Bio-Rad 公司,USA)。首先对树脂进行淋洗:依次加入 1 mL 8% HF 淋洗 1 次,1.5 mL 超纯水淋洗 3 次,1.5 mL 6~7 mol·L⁻¹ HCl 淋洗 3 次,1.5 mL 超纯水淋洗 3 次,

重复 HCl-H₂O 淋洗过程 3 次。将上述已消解完全的样品溶液转移至淋洗柱中,加入超纯水,液体收集至 15 mL 离心管中,用超纯水进行稀释使溶液中 SiO₂ 的含量约为 2 ppm^[21-22]。

1.3.3 植物硅同位素组成测定 将上述提取的水稻 SiO₂ 硅同位素组成采用 Neptune Plus 多接受等离子体质谱仪 (Thermo Fisher, Germany) 进行检测,检测结果用 δ³⁰Si (‰) 相对于石英砂标准物质 NBS-28 表示。

$$\delta^{30}\text{Si} = \left[\frac{R_{\text{待测样品}}}{R_{\text{标准样品}}} - 1 \right] \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中,R_{待测样品}:待测样品中重硅同位素与轻硅同位素之间的丰度比,即³⁰Si/²⁸Si;R_{标准样品}:标准样品中重硅同位素与轻硅同位素之间的丰度比,标准样品采用美国国家标准局石英砂硅同位素标准物质 NBS-28。当 δ³⁰Si 值为正,说明样品中的重硅同位素含量高于标准物质;当 δ³⁰Si 值为负,说明样品中重硅同位素含量低于标准物质。对于同一体系 2 种物质 A、B 而言,若 δ_A³⁰Si 值在数值上大于 δ_B³⁰Si 值,表明物质 A 相对于物质 B 重。本试验中测试所得 δ³⁰Si 精度优于±0.01% (2σ)。

样品中的硅同位素组成测定在北京科荟测试技术有限公司进行。

1.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析,差异显著性检验采用 Duncan 新复极差法 (P<0.05);相关性分析采用 Pearson 相关分析;采用 Orgin 8.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型土壤水稻硅积累

由表 2 可知,红壤、黑土、褐土上种植的水稻体内各器官硅含量的变化范围分别为 0.18%~7.61%、0.12%~12.81%、0.13%~19.06%,变化幅度表现为褐土>黑土>红壤,3 种土壤均以稻壳硅含量为最高,叶片次之,其中褐土种植的水稻的硅含量明显高于黑土和红壤。3 种土壤上种植的水稻硅分配比例均以叶片最高,叶片硅分配比例超过整株的 50%,其中褐土种植的水稻叶片的硅分配比例明显高于黑土和红壤。

表 2 水稻不同器官干重,硅含量、积累量和分配比例
Table 2 Dry weight, Si concentration, Si accumulation, Si distribution in different organs of rice

土壤类型 Soil type	器官 Organ	干重 Dry weight/(g·plant ⁻¹)	硅含量 Si content/%	硅积累量 Si accumulation/(g·plant ⁻¹)	硅分配比例 Proportion of Si
红壤 RS	根	2.68±0.13hi	3.42±0.10g	0.092±0.006efg	0.103±0.007h
	茎	6.61±0.22de	1.91±0.12h	0.126±0.010ef	0.141±0.005g
	叶	10.34±0.18b	4.72±0.07f	0.487±0.003c	0.548±0.003c
	稻壳	2.32±0hi	7.61±0.13e	0.177±0.003de	0.198±0.004de
	糙米	4.57±0.12fg	0.18±0.01i	0.008±0g	0.010±0j
黑土 BS	根	3.37±0.45gh	3.37±0.03g	0.113±0.015efg	0.045±0.003i
	茎	8.90±1.01c	5.16±0.03f	0.458±0.049c	0.184±0.005ef
	叶	16.22±1.49a	9.11±0.10d	1.475±0.126a	0.595±0.009b
	稻壳	3.30±0.19gh	12.81±0.10c	0.422±0.0245c	0.172±0.013f
	糙米	7.59±0.02cd	0.12±0.02i	0.009±0.001g	0.004±0.001j
褐土 CS	根	1.33±0.02i	3.84±0.03g	0.024±0fg	0.041±0.001i
	茎	3.28±0.14gh	5.15±0.05f	0.169±0.006de	0.137±0.003g
	叶	5.51±0.05ef	13.81±0.05b	0.760±0.005b	0.616±0.008a
	稻壳	1.31±0.03i	19.06±0.65a	0.251±0.015d	0.203±0.009d
	糙米	2.49±0.04hi	0.13±0i	0.003±0g	0.003±0j

注:同列不同小写字母表示同一器官的不同土壤类型间差异显著 (P<0.05)。下同。硅积累量=水稻器官干重×硅含量。硅分配比例为水稻器官硅积累量占整株硅积累量的比例。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different soil types of the same organ at 0.05 level. The same as following. Si accumulation=dry weight in rice organ × Si content in rice organ. Proportion of Si means the proportion of Si accumulation of rice organ in total rice.

2.2 不同土壤类型水稻硅同位素组成

由表 3 可知,红壤、黑土、褐土种植的水稻地上部各器官中, $\delta^{30}\text{Si}$ 值从基部器官到顶部器官呈现出明显增加的趋势,糙米最高,茎部最低。红壤、黑土和褐土上种植的水稻的各器官之间 $\delta^{30}\text{Si}$ 值的变化幅度不同,变化范围分别为 $-2.04\text{‰} \sim 0.31\text{‰}$ 、 $-2.21\text{‰} \sim 0.96\text{‰}$ 、

$-1.94\text{‰} \sim 2.14\text{‰}$,其中褐土最大,变化幅度为 4.08‰ ;黑土次之,变化幅度为 3.17‰ ;红壤最小,变化幅度仅为 2.35‰ ,表明水稻体内硅同位素分馏潜力依次为褐土>黑土>红壤。3 种土壤种植的水稻整株 $\delta^{30}\text{Si}$ 值存在显著差异,依次表现为褐土>黑土>红壤。

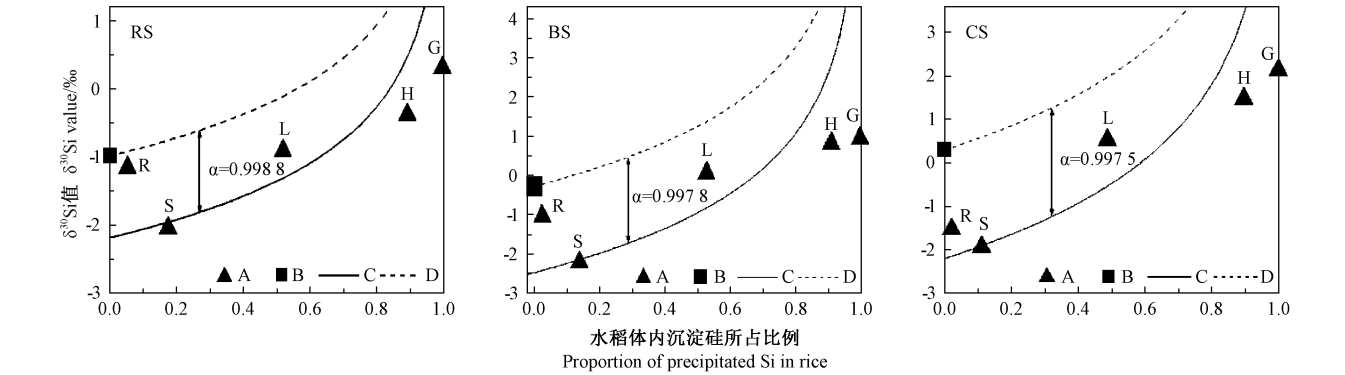
表 3 不同类型土壤水稻不同器官 $\delta^{30}\text{Si}$ 值
Table 3 The $\delta^{30}\text{Si}$ value of different organs of rice under different types of soil /‰

土壤类型 Soil type	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	稻壳 Husk	糙米 Grain	整株 Total
红壤 RS	-1.15 ± 0.18	-2.04 ± 0.02	-0.91 ± 0.06	-0.38 ± 0.03	0.31 ± 0.10	$-0.98 \pm 0.05\text{c}$
黑土 BS	-1.03 ± 0.03	-2.21 ± 0.03	0.06 ± 0.04	0.82 ± 0.12	0.96 ± 0.14	$-0.27 \pm 0.02\text{b}$
褐土 CS	-1.53 ± 0.19	-1.94 ± 0.07	0.53 ± 0.03	1.48 ± 0.05	2.14 ± 0.02	$0.30 \pm 0.03\text{a}$

2.3 不同类型土壤水稻硅同位素分馏系数

由图 1 可知,红壤、黑土、褐土种植的水稻体内硅同位素分馏系数 $\alpha_{\text{Pre-Dsi}}$ 分别为 0.998 8、0.997 8、

0.997 5,表明 3 种土壤类型中,褐土种植的水稻硅同位素分馏程度最大,黑土次之,红壤最小。



注:R:根;S:茎;L:叶;H:稻壳;G:糙米;A:水稻不同器官 $\delta^{30}\text{Si}$ 值;B:水稻整株 $\delta^{30}\text{Si}$ 值;
C:水稻体内沉淀硅同位素组成变化;D:水稻体内溶解硅同位素组成变化。
Note: R: Root. S: Stem. L: Leaf. H: Husk. G: Grain. A: The $\delta^{30}\text{Si}$ values in rice organs. B: The $\delta^{30}\text{Si}$ value in total rice.
C: The variation of precipitated Si isotope composition in rice. D: The variation of precipitated Si isotope composition in rice.

图 1 SiO_2 在水稻各器官沉淀时 Si 同位素分馏曲线

Fig.1 A plot displaying the Si isotope fractionation among Si precipitated of different rice organs

2.4 土壤有效硅、水稻硅同位素特征值与土壤理化性质之间的相关性分析

由表 4 可知,水稻叶片 $\delta^{30}\text{Si}$ 值和整株 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与土壤 pH 值、有机质及有效硅含量均呈极显著正相关,与土壤游离氧化铁、游离氧化铝含量均呈极显著负相关。水稻整株 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与土壤全氮含量呈显著正相关;而水稻叶片 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与土壤全氮呈极显著正相关,与速效钾含量呈显著正相关。土壤有效硅含量与土壤 pH 值、有机质、全氮及速效钾含量呈极显著正相关,与碱解氮含量呈显著正相关,与土壤游离氧化铁、游离氧化

铝含量呈极显著负相关。

3 讨论

3.1 不同土壤类型对水稻硅同位素分馏的影响

研究发现植物从土壤中吸收硅元素时,硅在植物体内以植硅体的形式存在;而当植物凋亡后,会以枯枝落叶的形式返还到土壤中,其中 92.5%的植硅体可以再次被植物吸收利用^[23],且植硅体的溶解速率大于土壤中其他硅酸盐矿物,是土壤中土壤有效硅的主要来

表 4 土壤有效硅、水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlations between available Si of soils, $\delta^{30}\text{Si}$ values of rice and soil chemical properties

土壤理化指标 Soil chemical properties	土壤有效硅 Available Si of soil	水稻叶片 $\delta^{30}\text{Si}$ 值 $\delta^{30}\text{Si}$ values of rice leaves	水稻整株 $\delta^{30}\text{Si}$ 值 $\delta^{30}\text{Si}$ values of bulk rice
pH 值 pH value	0.913 **	0.977 **	0.994 **
有机质 OM	0.933 **	0.986 **	0.995 **
全氮 TN	0.908 **	0.820 **	0.739 *
碱解氮 AN	0.720 *	0.553	0.434
有效磷 AP	0.452	0.255	0.126
速效钾 AK	0.824 **	0.673 *	0.559
有效硅 ASi	n.d.	0.970 **	0.927 **
游离氧化铁 Fe_d	-0.961 **	-0.880 **	-0.829 **
游离氧化铝 Al_d	-0.970 **	-0.939 **	-0.902 **

注：* 和 ** 分别代表在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著和极显著；n.d.表示数据不存在。
Note: * and ** represent significant and extremely significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively. n.d. means no data.

源^[24-25],这与本研究结果相同。本研究中,整株水稻的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与土壤有效硅之间存在极显著正相关关系,证实了植硅体可能是植物吸收硅的主要来源。

研究表明,水稻体内的硅同位素组成变化属于类似瑞利(Rayleigh)分馏行为^[3]。瑞利分馏模型是指溶液中的 $\text{H}_4^{28}\text{SiO}_4$ 优先聚合发生沉淀,沉淀硅的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值低于溶液中剩余溶解硅的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值,导致反应体系中沉淀硅和溶解硅的同位素组成均呈现指数形式升高的过程^[26-27]。沉淀硅与溶解硅之间的硅同位素分馏系数用 $\alpha_{\text{Pre-Dsi}}$ 表示,用来指示沉淀硅同位素比值(R_{Pre})与溶解硅同位素比值(R_{Dsi})之商。 $|\alpha_{\text{Pre-Dsi}}-1|$ 值越大,说明沉淀硅同位素与溶解硅同位素之间的质量差异越大,硅同位素分馏程度越大。依据上述理论,将本试验中红壤、黑土、褐土上种植的水稻体内各器官中 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与水稻体内沉积硅所占比例进行作图(图 1),结果表明,红壤、黑土、褐土种植的水稻体内硅同位素分馏程度表现为褐土>黑土>红壤,表明种植于褐土上的水稻体内硅同位素分馏效应最强,黑土次之,红壤最弱。本研究还发现水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(整株和叶片)、土壤有效硅含量与土壤有机质含量存在极显著正相关关系,由此推测,褐土种植的水稻体内硅同位素分馏程度最大的原因可能与褐土有机质含量较高有关。有机质含量越高,表明土壤中植硅体含量可能越高,导致水稻体内硅含量越高,水稻体内硅同位素分馏效应越强。研究发现成熟期水稻体内硅同位素分馏程度大于开花期,推测可能是由于成熟期水稻个体更大^[28]。然而,比较竹子和水稻体内硅同位素分馏系数 $\alpha_{\text{Pre-Dsi}}$ 时发现,竹子的个体虽然远大于水稻,但其体内的硅同位素分馏程度却与成熟期水稻接近,表明植物体内硅同位素分馏

效应强弱可能不仅与植株个体大小有关^[6, 28]。本研究结果表明,种植于 3 种土壤上的水稻干重依次为黑土>红壤>褐土,硅同位素分馏程度依次表现为褐土>黑土>红壤。由此推测,造成该现象的可能原因是一方面种植于黑土上的水稻干重大于红壤,表明相对红壤,种植于黑土上的水稻植株个体更大,硅同位素分馏效应更强;另一方面褐土有效硅含量高于黑土,且中性土可能比酸性土具有更强的供硅能力^[29],导致种植于褐土上的水稻体内硅含量高于黑土,进而导致种植于褐土上的水稻体内硅同位素分馏效应强于黑土。本研究结果表明,红壤种植的水稻体内硅同位素的分馏程度最小,可能是由于红壤采自南方,土壤风化程度较高,一方面土壤有机质含量较低^[30-31],使得土壤中植硅体的含量可能较少;另一方面脱硅富铁铝化作用强烈,降低了土壤溶液中硅含量,导致土壤有效硅含量低,不利于硅同位素在水稻体内的分馏。

3.2 不同土壤类型对水稻硅同位素组成的影响

土壤有效硅是指土壤中可供当季作物吸收利用的硅,通常作为土壤供硅能力的重要指标^[32]。叶片是水稻主要的硅累积器官。本研究中,叶片 SiO_2 累积量超过水稻整株的 50%,故将土壤有效硅、水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(整株和叶片)与土壤理化性质进行相关性分析,以研究不同类型土壤对水稻硅同位素特征值的影响。本研究发现土壤有效硅、水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(整株和叶片)与土壤 pH 值呈极显著正相关,可能是由于在酸性、中性和微碱性环境下,土壤有效硅含量与 pH 值呈正相关^[33],且中性水田土壤的供硅能力强于酸性土^[30]。本研究结果表明,水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(整株和叶片)与土壤有机质含量呈极显著正相关关系,这可能是由于土壤

有机质含量越高,土壤中植硅体含量越高^[6]。本研究中,在采集野外土壤前,黑土和褐土中种植的作物均为玉米,一方面,玉米从土壤溶液中吸收硅时会优先选择轻硅同位素,使土壤溶液相对富集重硅同位素^[10];另一方面,在我国玉米生产中,玉米被收获后,秸秆大多数会被移走,直接还田的比例较少。据报道,2010 年我国玉米秸秆产量约 22 156 万 t,而直接还田的比例仅占玉米秸秆资源总量的 17.6%^[34],使得土壤中被玉米吸收所消耗掉的轻硅同位素无法完全得到补充,导致土壤溶液中的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值进一步升高,而土壤溶液中的硅又是植物吸收硅的主要来源,因此导致植株 $\delta^{30}\text{Si}$ 值升高^[35]。此外,本研究还发现,黑土中游离氧化铁和游离氧化铝的含量均低于褐土,黑土栽培的水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(整株和叶片)亦低于褐土,原因可能是在一定范围内,土壤风化程度越高,土壤中铁、铝氧化物的含量越高,吸附土壤中的有效硅含量就越多^[16],且会优先吸附轻硅同位素,导致土壤溶液相对富集重硅同位素^[13],最终导致水稻体内 $\delta^{30}\text{Si}$ 值的升高。但也有研究表明,土壤溶液中的硅酸可以从铁、铝氧化物表面被解吸后得到补充。Ding 等^[36-37] 研究发现黄河水和长江水硅同位素组成存在差异的原因之一可能是长江流域红壤中铁氧化物对硅酸的吸附—解吸作用更强烈。本研究中,土壤有效硅含量、水稻 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(叶片和整株)与土壤游离氧化铁、游离氧化铝含量均存在显著负相关,推测原因主要有:一是,红壤风化程度高,脱硅富铁铝化作用强,导致大量硅损失,土壤有效硅含量较低;二是,红壤排水性能较差,含水量较高,土壤溶液中的铁、铝氧化物对硅酸的吸附—解吸作用强烈;三是,红壤此前从未种植过任何作物,有机质含量相对较低,但红壤游离氧化铁、氧化铝含量一般较高。然而,关于土壤中游离铁、铝氧化物对硅的吸附—解吸过程具体机理仍缺乏明确的认识,且本研究仅选取了 3 种土壤,土壤类型偏少,今后还需选取更多类型的土壤进行深入研究。

4 结论

本研究结果表明,红壤、黑土和褐土栽培的水稻体内硅同位素分馏潜力和分馏程度均表现为褐土>黑土>红壤,水稻硅同位素信号主要受土壤 pH 值、有机质、有效硅、游离氧化铁和游离氧化铝含量的影响。本研究初步探明了水稻体内硅同位素组成及分馏与红壤、黑土及褐土之间的关系,为进一步研究植物体内硅同位素信号与土壤环境之间的关系奠定了良好基础。今

后可集中于土壤类型和植物类型选择的多样化、植物与土壤之间的硅同位素分馏机理等方面深入研究,进一步寻找植物与不同生长环境之间硅同位素分馏的定量关系,构建植物—土壤硅同位素分馏模型,为研究区域性和全球性的硅生物地球化学循环提供试验证据。

参考文献:

- [1] 孙立, 吴良欢, 丁梯平, 田世洪. 稻叶分段硅同位素组成及硅、钾、钠、钙、镁分布特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 94-99
- [2] 丁梯平, 田世红, 孙立, 马国瑞, 周剑雄, 吴良欢, 万德芳, 水茂兴, 王成玉, 陈振宇, 高建飞. 植物中硅矿化作用的硅同位素示踪研究[J]. 地球学报, 2009, 30(2): 129-142
- [3] Ding T P, Ma G R, Shui M X, Wan D F, Li R H. Silicon isotope study on rice plants from the Zhejiang province, China [J]. Chemical Geology, 2005, 218: 41-50
- [4] Ding T P, Tian S H, Sun L, Wu L H, Zhou J X, Chen Z Y. Silicon isotope fractionation between rice plants and nutrient solution and its significance to the study of the silicon cycle [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2008, 72(23): 5600-5615
- [5] Sun L, Wu L H, Ding T P, Tian S H. Silicon isotope fractionation in rice plants, an experimental study on rice growth under hydroponic conditions [J]. Plant and Soil, 2008, 304(1/2): 291-300
- [6] Ding T P, Zhou J X, Wan D F, Chen Z Y, Wang C Y, Zhang F. Silicon isotope fractionation in bamboo and its significance to the biogeochemical cycle of silicon [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2008, 72(5): 1381-1395
- [7] Opfergelt S, Cardinal D, Henriot C, André L, Delvaux B. Silicon isotope fractionation between plant parts in banana: *in situ* vs. *in vitro* [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88: 224-227
- [8] Opfergelt S, Cardinal D, Henriot C, Draye X, André L, Delvaux B. Silicon isotopic fractionation by banana (*Musa* spp.) grown in a continuous nutrient flow device [J]. Plant and Soil, 2006, 285(1/2): 333-345
- [9] Sun Y, Wu L, Li X, Sun L, Gao J, Ding T. Silicon isotope fractionation in rice and cucumber plants over a life cycle: Laboratory studies at different external silicon concentrations [J]. Journal of Geophysical Research, 2016, 121(11): 2829-2841
- [10] Sun Y, Wu L H, Li X Y, Sun L, Gao J F, Ding T P, Zhu Y H. Silicon isotope fractionation in maize and its biogeochemical significance [J]. Analytical Letters, 2017, 50(15): 2475-2490
- [11] Opfergelt S, Pierre D. Silicon isotopes and continental weathering processes: Assessing controls on Si transfer to the ocean [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2012, 344(11/12): 723-738
- [12] Frings P J, Clymans W, Fontorbe G, Rocha C L D L, Conley D J. The continental Si cycle and its impact on the ocean Si isotope budget [J]. Chemical Geology, 2016, 425: 12-36
- [13] Jill N S, Luc A, Jonathan D, Damien C, Daniel J C, Gregory F S, Jonathan D, Justin D, Claudia E, Michael J E, Patric J F, Patricia Grasse, Katharine H, Melanie J L, Panagiotis M, Virginia N P,

- George E A S. A review of the stable isotope bio-geochemistry of the global silicon cycle and its associated trace elements[J]. In *Frontiers in Earth Science*, 2018, 5: 1–24
- [14] Delstanche S, Opfergelt S, Cardinal D, Elsass F, André L, Delvaux B. Silicon isotopic fractionation during adsorption of aqueous monosilicic acid onto iron oxide[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(4): 923–934
- [15] Oelze M, Blanckenburg F V, Hoellen D, Dietzel M, Bouchez J. Si stable isotope fractionation during adsorption and the competition between kinetic and equilibrium isotope fractionation: Implications for weathering systems[J]. *Chemical Geology*, 2014, 380: 161–171
- [16] Opfergelt S, Delvaux B, André L, Cardinal D. Plant silicon isotopic signature might reflect soil weathering degree[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 91(2/3): 163–175
- [17] 陆景陵. 植物营养学(上) [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 108–114
- [18] 曾研华, 吴建富, 范呈根, 曾勇军, 谭雪明, 潘晓华, 石庆华. 化肥减施条件下稻草还田供硅对双季稻产量及硅素养分吸收的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(2): 344–352
- [19] Isa M, Bai S Q, Yokoyama T, Ma J F, Ishibashi Y, Yuasa T, Iwaya-Inoue M. Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant, *Isi1* [J]. *Plant and Soil*, 2010, 331(1/2): 361–375
- [20] Vorm P D J V D. Dry ashing of plant material and dissolution of the ash in HF for the colorimetric determination of silicon [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18(11): 1181–1189
- [21] Sander H J M V D B, Pieter Z V, Coos C V B, Bas V D W, Johannes S, Manfred J V B. Determination of silicon isotope ratios in silicate materials by high-resolution MC-ICP-MS using a sodium hydroxide sample digestion method[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2006, 21(8): 734–742
- [22] Sun Y, Wu L, Li X. Experimental determination of silicon isotope fractionation in rice[J]. *PLoS One*, 2016, 11(12): 1–12
- [23] Conley D J. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 681–688
- [24] Cornelis J T, Delvaux B, Cardinal D, André L, Ranger R, Opfergelt S. Tracing mechanisms controlling the release of dissolved silicon in forest soil solutions using Si isotopes and Ge/Si ratios [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(14): 3913–3924
- [25] Struyf E, Smis A, Damme S V, Meire P, Conley D J. The global biogeochemical silicon cycle[J]. *Silicon*, 2009, 1: 207–213
- [26] Celle-Jeanton H, Gonfiantini R, Travi Y, Sol B. Oxygen – 18 variations of rainwater during precipitation: Application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 289: 165–177
- [27] Druhan J L, Kate M. The influence of mixing on stable isotope ratios in porous media: A revised Rayleigh model [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(2): 1101–1124
- [28] 孙立. 水稻硅同位素组成及分馏机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 49–50
- [29] 杨丹, 张玉龙, 杨东伟, 刘鸣达. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究Ⅱ对水稻吸收硅素及产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 764–767
- [30] Guggenberger G, Kaiser K. Dissolved organic matter in soil: Challenging the paradigm of sorptive preservation[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 293–310
- [31] Saidy A R, Smernik R J, Baldock J A, Kaiser K, Sanderman J. The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide[J]. *Geoderma*, 2013, 209–210: 15–21
- [32] 杨丹, 张玉龙. 施用高炉渣对土壤的 pH 和有效硅以及水稻植株含硅量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(3): 446–449
- [33] 俞仁培. 土壤碱化及其防治[M]. 北京: 农业出版社, 1984: 60–62
- [34] 吕开宇, 仇焕广, 白军飞, 徐志刚. 中国玉米秸秆直接还田的现状与发展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(3): 171–176
- [35] Farmer V C, Delbos E, Miller J D. The role of phytolith formation and dissolution in controlling concentrations of silica in soil solutions and streams[J]. *Geoderma*, 2005, 127(1/2): 71–79
- [36] Ding T P, Gao J F, Tian S H, Wang H B, Li M. Silicon isotopic composition of dissolved silicon and suspended particulate matter in the Yellow River, China, with implications for the global silicon cycle[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(21): 6672–6689
- [37] Ding T, Wan D, Wang C, Zhang F. Silicon isotope compositions of dissolved silicon and suspended matter in the Yangtze River, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(2): 205–216

Effects of Different Soil Types on Silicon Isotope Fractionation of Rice

XIAO Han^{1, 2} SUN Yan³ ZHOU Jingjie¹ MA Qingxu¹

XIE Yinan¹ WU Lianghuan^{1, 2, *} HU Zhaoping^{2, *}

(¹Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health/College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058; ²State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization/Kingenta Ecological Engineering Group Co., Ltd., Linyi, Shandong 276000; ³State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China/Water Conservancy and Hydropower College, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048)

Abstract: A plot experiment was carried out to explore the effects of different soil types on Si isotope composition and fractionation of rice. Rice (*Oryza sativa* L. cv. Jia 58) was grown in red soil, black soil and cinnamon soil, respectively. Soil chemical properties, rice dry weight, rice Si content, rice Si isotope composition were determined. The results indicated that different types of soil had a remarkable impact on the rice Si-isotopic fractionation. The Si isotope fractionation factors ($\alpha_{\text{pre-Dsi}}$) of rice grown in red soil, black soil and cinnamon soil were 0.998 8, 0.997 8 and 0.997 5, respectively, illustrating that the extent of Si isotope fractionation of rice planted in cinnamon soil was the strongest, followed by rice in black soil and rice in red soil. Correlation analysis showed that the $\delta^{30}\text{Si}$ values of rice (bulk and leaves) were significant correlated with the contents of organic matter, available Si, free Fe oxide, free Al oxide and pH values of soils ($P < 0.01$), indicating that rice Si-isotopic signature might be primarily affected by pH values, organic matter content, available Si content of soils and the extent of soil weathering since the contents of free Fe oxide and free Al oxide increase with weathering. The results provide a theoretical basis for using Si isotope tracing technology to explore the model of Si cycle in nature.

Keywords: soil types, rice, silicon isotope, isotope fractionation