植物营养与肥料学报 2013,19(6):1287-1296
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0602

不同水分管理下覆膜旱植稻营养特性及其与光合生理的相关性研究

陈恺林[1], 刘 洋[1], 张玉烛[1*], 方宝华[1], 黄泽辉[1], 刘功朋[2], 李 超[2]
(1 湖南省水稻研究所,湖南长沙 410125; 2 湖南农业大学,湖南长沙 410125)

摘要: 本研究以超级杂交稻 P88s/1128 为材料,研究了覆膜栽培下不同水分管理方式对超级杂交稻产量及钙(Ca)、硅(SiO_2)吸收特性的影响,并探讨了硅、钙吸收总量与蒸腾速率之间的相关性。结果表明,覆膜栽培条件下旱作水稻产量比无膜栽培提高了3.64%;覆膜栽培下湿润处理后穗部钙吸收量为1.58kg/hm^2,显著高于灌水处理;栽培模式和水分管理2种处理因子均对水稻后期钙、硅的积累量具有一定的影响且存在显著的交互作用;覆膜旱植栽培下超级稻后期蒸腾速率与穗部硅的吸收呈显著正相关($r=0.8561^*$,$P=0.0066$)。覆膜和后期灌水提高了群体蒸腾速率,有利于营养物质的吸收,同时促进了茎叶中储存的碳水化合物向穗部转运,另一方面,蜡熟期过高的蒸腾速率会导致茎秆中碳水化合物过量输出,可能带来倒伏风险。

关键词: 覆膜; 水分; 钙; 二氧化硅; 蒸腾速率; 相关性
中图分类号: S511.01; S365 **文献标识码**: A **文章编号**: 1008-505X(2013)06-1287-10

Relationships between nutrition uptake characteristics and photosynthetic physiology under different water managements of mulching upland rice

CHEN Kai-lin[1], LIU Yang[1], ZHANG Yu-zhu[1*], FANG Bao-hua[1], HUANG Ze-hui[1], LIU Gong-peng[2], LI Chao[2]
(*1 Hunan Rice Research Institute, Changsha 410125, China; 2 Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China*)

Abstract: Absorption characteristics of Ca and SiO_2 and transpiration rate under mulching cultivation of upland rice were studied by using P88s/1128 as material and with different water managements as treatment. The result shows that the mulching has a significant effect on yield but not on yield component. The absorption amount of calcium in panicle is 1.58 kg/ha under the mulching and moist treatment which is significantly higher than that of the irrigation treatment. The cultivation mode and water management have some influence on the accumulation of SiO_2 and Ca at the late stage, and the interaction of these two processing factors is significant. The corrrelation between the SiO_2 quantity of panicle absorbed and transpiration rate is significant($r=0.8561^*$, $P=0.0066$). Mulching and irrigation at the later stages has promoting effects for transpiration rate which is beneficial for absorbing nutrition and carbohydrate translation from stem to panicle. But it would easy to lodging if the transpiration rate so high that carbohydrate in the stems exports excessively.

Key words: mulching; water; Ca; SiO_2; transpiration rate; correlation

近年来,农业旱灾明显加重,预计我国未来10~50年干旱面积将有扩大趋势,出现阶段性干旱和季节性连续干旱的可能性增大,给农业生产和粮食安全带来严重威胁[1-2]。水稻覆膜旱植采用无水层湿润栽培模式,较常规淹水栽培节水80%左右,是一项高效节水栽培措施[3-5]。

收稿日期: 2013-01-23 **接受日期**: 2013-07-02
基金项目: "十二·五"科技支撑计划重大项目粮食丰产科技工程"长江中游南部(湖南)双季稻持续丰产高效技术集成创新与示范"(2011BAD16B01);"长江中游南部(湖南)水稻丰产节水节肥技术集成与示范"(2013BAD07B11)项目资助。
作者简介: 陈恺林(1955—),男,湖南长沙人,副研究员,主要从事水稻高效栽培技术研究。E-mail: chenkailin123@sina.com
刘洋与第一作者同等贡献。E-mail: liuyang5339@sina.com * 通信作者 E-mail: yuzhuzhang@hotmail.com

硅、钙元素对植株的生长发育、生理生化以及新陈代谢过程均有着举足轻重的作用[6-9]，研究表明，水稻体内的钙含量与稻米的直链淀粉以及淀粉谱的黏滞特性密切相关[10]；硅能增强水稻抗病性，提高根系抗氧化能力，还能起到改善株型、抗倒伏的作用[11-12]。Verma、Sandalio 研究认为硅钙介质可降低镉污染毒害[13-14]，然而，覆膜旱植栽培模式下水稻硅、钙吸收特性的研究鲜有报道。本试验以超级杂交稻品种为材料，在覆膜旱植栽培模式下研究了不同水分管理方式对其生殖生长期硅、钙吸收特性及在各器官分配规律的影响，并观测后期群体光合特性，以期探明硅、钙吸收特性与植株蒸腾速率之间的相关性，为超级稻覆膜旱植栽培技术提供技术支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试材料为超级杂交稻 P88S/1128，由湖南省杂交水稻研究中心提供。试验于 2011 年在湖南省水稻研究所试验地进行，5 月 15 日播种，10 月 6 日收割，全生育期共 145 d。施肥量为复合肥（N∶P∶K 为 12∶5∶8）500 kg/hm^2、枯饼 500 kg/hm^2、尿素 100 kg/hm^2。试验为双因素设计，设覆膜（Mulching，M）和无膜（Bare，B）两种栽培模式，两种模式下设 4 种水分管理方式：1）湿润处理［SR，中期（幼穗分化～抽穗）和后期（齐穗～成熟）湿润］；2）中水处理（ZS，中期灌水，后期湿润）；3）后水处理（HS，中期湿润，后期灌水）；4）全水处理（QS，中期和后期灌水）。灌水期间保持田间水层 3～5 cm，湿润期间保持土壤含水量在 60%～90% 之间，用便携式土壤水分测定仪（TDR－300，美国）进行监测，雨天及时排水，干旱及时灌溉。移栽前大田土壤自然晒干，用机械粉碎泥土后做厢，旱作栽培。栽植密度为 1.91 ×10^5 plant/hm^2，小区面积 24 m^2，每处理重复 3 次。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 产量及其构成因素　在成熟期每个小区取 5 蔸水稻植株，考察每穗实粒数、空秕粒数、结实率和千粒重等产量结构因素。结实率＝每穗实粒数/（每穗实粒数＋每穗空秕粒数）。收获时各小区单打单收 12 m^2，晒干后称重，并按照稻谷水分标准折算出产量。

1.2.2 光合生理指标的测定　于齐穗期、乳熟期和蜡熟期用 Li-6400 便携式光合系统测定仪（美国 LI－COR 制造）测定剑叶、倒 2 叶和倒 3 叶的光合速率和蒸腾速率，每个处理重复测定 5 次。选择晴好天气，测定时间在 9：00～11：00 之间，测定时光强设定为 1000 μmol/（m^2 · s），气体流速为 600 μmol/s。

1.2.3 SiO_2、Ca 的测定　于齐穗期、蜡熟期和成熟期取植株地上部分样，分茎、叶、穗 3 部分，在 120℃杀青 3h，在 80℃烘干至恒重后称重并粉碎，过 100 目筛，备用。

钙（Ca）用硝酸＋高氯酸消化后用原子吸收分光光度计测定，计算公式为：

$$X(mg/kg) = (C - C_0) \times V \times f \times 100/m \times 10000$$

式中：C—测定样品中钙元素浓度（mg/L）；C_0—空白值；V—样品定容体积（mL）；f—稀释倍数；m—样品重（g）。

硅（SiO_2）的测定：用 $H_2SO_4 - H_2O_2$ 消煮后放入高温电炉中 920℃灼烧 30 min，冷却后用万分之一天平称重。计算公式为：

$$全\ SiO_2(\%) = (W_1 - W_2)/W \times 100$$

式中：W_1—SiO_2 加坩埚重（g）；W_2—空坩埚重（g）；W—样品重（g）。

植株各器官中元素吸收总量 ＝ 器官干物质重量×器官中矿质元素含量

植株矿质元素积累总量 ＝ 茎秆中积累量＋叶片中积累量＋稻穗中积累量

成熟期单位面积积累总量 ＝ 成熟期单株积累量×面积/移栽密度

1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 软件进行分析，利用 SPSS13.0 软件进行方差分析，采用 Two-Way ANOVA 方法，LSD 法多重比较。

2 结果与分析

2.1 覆膜旱植下超级稻产量及其构成

与常规稻相比，超级杂交稻具有叶面积系数（LAI）高、库容大、生育期长、抗性强等优点，因此，产量较高，一般在 12～21 t/hm^2 之间[15]。本研究结果表明（表 1），超级杂交稻在覆膜栽培模式下产量为 11788.8 kg/hm^2，比无膜栽培提高了 3.64%，从产量构成因素分析来看，主要是由于覆膜显著提高了每穗实粒数和结实率。覆膜栽培下，中水（ZS）、后水（HS）处理各产量构成因素差异不大；无膜栽培下，ZS 处理的总颖花数和每穗实粒数比 HS、湿润（SR）处理显著增多。无论在覆膜或无覆膜情况下的产量均为全水（QS）处理产量最高，SR

表 1　超级杂交稻在不同水分管理模式下的产量及其构成

Table 1　Yields and yield components under different water managements of hybrid rice

处理 Treatment		有效穗数 Valid panicle ($\times 10^4/hm^2$)	每穗总粒数 Total grains per panicle (No./panicle)	总颖花数 Total spikelets ($\times 10^4/hm^2$)	每穗实粒数 Grain No. per panicle (No./panicle)	结实率 Ripening percentage (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
覆膜 M	QS	236.36 a	209.20 b	49446 ab	200.12 a	95.66 a	28.87 a	12699.6 a
	ZS	215.91 b	221.87 a	47903 ab	209.93 a	94.62 a	27.08 a	11688.3 a
	HS	229.55 ab	227.07 a	52125 a	210.27 a	92.60 a	28.35 a	12115.7 a
	SR	238.64 a	185.55 c	44279 b	169.85 b	91.54 a	27.03 a	10651.6 b
无膜 B	QS	240.91 a	224.25 a	54024 a	191.51 a	85.40 a	28.59 a	12249.8 a
	ZS	234.09 a	218.04 ab	51040 a	189.06 a	86.71 a	27.52 ab	11640.5 a
	HS	235.54 a	204.86 b	48254 b	175.61 b	85.72 a	27.86 ab	11484.1 a
	SR	243.18 a	190.71 c	46376 b	145.47 c	76.28 b	26.95 b	10125.2 b
平均 Mean	M	230.12 a	211.00 a	48556 a	197.52 a	93.61 a	27.83 a	11788.8 a
	B	238.43 a	210.00 a	50069 a	175.41 b	83.53 b	27.73 a	11374.9 a

注(Note): M—覆膜栽培 Mulching cultivation; B—无膜栽培 Bare cultivation; QS—全水处理 Irrigation in the whole growing period; ZS—中水处理 Irrigation form spike differentiating stage to heading stage; HS—后水处理 Irrigation form full-heading stage to mature stage; SR—湿润处理 No irrigation in the whole growing period. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

处理产量最低;覆膜和无膜 2 种栽培模式下,QS 处理的产量分别为 12699.6 和 12249.8 kg/hm^2,较 SR 处理分别提高 19.23% 和 20.98%;ZS、HS 处理产量略低于 QS 处理,但显著高于 SR 处理。

2.2　钙、硅的吸收和积累特性

2.2.1 钙的积累与分配　从表 2 可以看出,齐穗期,QS 处理在覆膜和无膜 2 种栽培模式下茎秆中的钙含量分别为 7.21 和 7.48 kg/hm^2,均显著低于 ZS、HS、SR 处理; HS 处理穗部钙含量最低,覆膜与无膜栽培下分别为 0.18、0.17 kg/hm^2; 在植株吸收总量上,覆膜与无膜栽培差异不大,而茎秆中钙含量覆膜栽培比无膜栽培低 8.18%。蜡熟期,ZS 处理在覆膜和无膜栽培下其茎秆中钙含量最低,分别为 13.98、13.41 kg/hm^2,SR 处理叶片中钙含量和总吸收量均最低。成熟期,覆膜栽培下钙积累总量为 HS > QS > ZS > SR,无膜栽培下为 QS > HS > ZS > SR; SR 处理在覆膜和无膜栽培下钙吸收总量在 68.5 kg/hm^2 左右,显著低于 QS、ZS、HS 处理;但 SR 处理在覆膜栽培下,穗部钙含量达 1.58 kg/hm^2,显著高于其他处理,有利于稻米营养品质的提升。

表 3 显示,从不同器官来看,水稻吸收的钙主要分配在叶中,茎鞘次之,穗部最低。随着生育期的推延,叶片中的钙向茎、穗转运,分配到叶片中钙的比例逐渐降低,茎鞘和穗中的分配比例增加。处理间的比较表明,成熟期,SR 处理的穗部钙的分配比例最大,达到 2.31%,ZS 处理次之,HS 处理最低; SR 和 ZS 处理的穗部钙含量的分配比例高于 QS、HS 处理,湿润和中水处理穗部钙的分配比例平均为 2.14%,与全水和后水处理相比增幅达 18.22%,表明后期湿润有利于植株钙向穗部的运转与分配。

2.2.2 硅的积累与分配　表 4 结果表明,齐穗期,茎秆中 SiO_2 累积量以 QS 处理最多,无膜栽培模式下水稻茎中硅的累积量低于覆膜栽培,无膜栽培下 4 种水分处理硅累积量平均为 290 kg/hm^2,比覆膜栽培高 30.9%,差异达显著水平;叶片中硅累积量以 ZS 处理最少,无膜栽培下 4 种水分处理硅累积量均不同程度高于覆膜栽培。齐穗期,覆膜对穗部的硅吸收具有促进作用,此外,QS 处理的穗中硅累积量在覆膜和无膜栽培下均较高,分别为 130 和 80 kg/hm^2。蜡熟期,覆膜与无膜栽培下各器官的硅吸收量基本相同,但不同水分处理下差异显著;茎秆的硅吸收量在 SR 处理下较低,覆膜、无膜栽培下分别

表2 不同水分管理模式下各生育期覆膜栽培水稻植株钙积累量(kg/hm²)

Table 2 Accumulation of calcium under different water management

处理 Treatment		齐穗期 Full-heading stage				蜡熟期 Wax ripeness stage				成熟期 Maturation stage			
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	合计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	合计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	合计 Total
覆膜 M	QS	7.21 c	43.50 b	0.20 b	50.91 c	16.28 a	53.87 b	0.70 c	70.86 b	18.42 ab	60.11 ab	1.43 b	79.97 ab
	ZS	7.69 b	43.98 b	0.25 a	51.92 bc	13.98 b	49.93 bc	1.22 a	65.14 c	17.13 b	56.80 b	1.48 ab	75.41 b
	HS	7.73 b	48.63 a	0.18 b	56.53 a	17.20 a	59.67 a	0.68 c	77.56 a	19.59 a	62.86 a	1.43 b	83.89 a
	SR	8.25 a	45.03 ab	0.23 a	53.51 ab	15.99 a	47.60 c	0.88 b	64.47 c	17.83 ab	49.07 c	1.58 a	68.49 c
无膜 B	QS	7.48 c	48.82 a	0.23 a	56.53 a	17.68 a	52.80 ab	1.19 a	71.66 a	21.77 a	57.22 b	1.43 a	80.41 a
	ZS	9.78 a	44.06 b	0.19 b	54.04 a	13.41 b	54.37 a	0.75 b	68.55 ab	17.68 b	58.16 b	1.44 a	77.29 a
	HS	7.96 bc	40.14 c	0.17 c	48.29 b	14.52 b	50.83 b	1.08 a	66.44 bc	17.62 b	64.47 a	1.36 ab	77.73 a
	SR	8.44 b	41.99 bc	0.21 b	50.66 b	17.05 a	45.01 c	0.78 b	62.86 c	18.32 b	39.29 c	1.32 b	68.51 b
平均 Mean	M	7.73 b	45.30 a	0.21 a	53.22 a	15.88 a	52.78 a	0.88 a	69.50 a	18.25 a	57.22 a	1.49 a	76.94 a
	B	8.42 a	43.75 a	0.21 a	52.38 a	15.67 a	50.75 a	0.96 a	67.38 a	18.84 a	54.79	1.40	75.99 a

注(Note): M—覆膜栽培 Mulching cultivation; B—无膜栽培 Bare cultivation; QS—全水处理 Irrigation in the whole growing period; ZS—中水处理 Irrigation form spike differentiating stage to heading stage; HS—后水处理 Irrigation form full-heading stage to mature stage; SR—湿润处理 No irrigation in the whole growing period. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表3 不同水分管理覆膜栽培水稻不同生育时期钙在各器官的分配(%)

Table 3 Partitioning of calcium in different organs under different water management

处理 Treatment		齐穗期 Full-heading stage			蜡熟期 Wax ripeness stage			成熟期 Maturation stage		
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle
覆膜 M	QS	14.17 ab	85.45 a	0.38 b	22.99 ab	76.03 a	0.98 c	23.05 b	75.16 a	1.79 b
	ZS	14.80 a	84.72 a	0.48 a	21.48 b	76.65 a	1.87 a	22.72 b	75.32 a	1.97 b
	HS	13.68 b	86.00 a	0.33 b	22.19 b	76.93 a	0.88 c	23.36 b	74.93 a	1.71 b
	SR	15.41 a	84.17 a	0.39 ab	24.80 a	73.83 a	1.37 b	26.03 a	71.66 a	2.31 a
无膜 B	QS	13.23 c	86.35 a	0.41 a	24.69 bc	73.68 ab	1.66 a	27.08 a	71.18 a	1.78 b
	ZS	18.12 a	81.52 a	0.36 a	19.58 c	79.33 a	1.09 b	22.87 b	75.26 a	1.86 ab
	HS	16.49 b	83.14 a	0.36 a	21.85 b	76.52 ab	1.63 a	22.67 b	75.58 a	1.75 b
	SR	16.69 b	82.90 a	0.41 a	27.12 a	71.63 b	1.25 b	26.75 a	71.33 a	1.92 a

注(Note): M—覆膜栽培 Mulching cultivation; B—无膜栽培 Bare cultivation; QS—全水处理 Irrigation in the whole growing period; ZS—中水处理 Irrigation form spike differentiating stage to heading stage; HS—后水处理 Irrigation form full-heading stage to mature stage; SR—湿润处理 No irrigation in the whole growing period. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

为340、360 kg/hm²;叶片的硅吸收量在QS处理下较高,覆膜、无膜栽培下分别为420和490 kg/hm²。成熟期,覆膜栽培模式下穗部硅吸收量比无膜栽培高18.7%,植株吸收总量高9.4%,均达到显著差异水平;茎秆硅的吸收量以QS、ZS处理较多,HS、SR处理较少;叶片硅吸收量以SR处理最低;穗部硅吸收量差异较大,覆膜栽培下表现为QS > ZS > HS > SR,无膜栽培下为ZS > HS > SR > QS。

齐穗期叶片是硅的主要储藏器官,其次是茎秆,穗部中硅的分配最少;硅在茎、叶、穗中分配比例,

表 4　不同水分管理模式下各生育期水稻植株硅积累量(kg/hm²)

Table 4　SiO_2 accumulation under different water management

处理 Treatment		齐穗期 Full-heading stage				蜡熟期 Wax ripeness stage				成熟期 Maturation stage			
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	合计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	合计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	合计 Total
覆膜 M	QS	480 a	560 a	130 a	1170 a	450 a	410 a	320 a	1170 a	580 a	560 a	480 a	1620 a
	ZS	410 b	330 c	140 a	890 c	370 b	420 a	280 a	1080 ab	480 b	540 ab	390 b	1410 b
	HS	400 b	490 b	110 b	1010 b	350 b	350 b	290 a	980 bc	430 b	500 b	350 bc	1280 c
	SR	380 b	400 c	130 a	910 c	340 b	340 b	280 a	960 c	480 b	520 ab	320 c	1320 bc
无膜 B	QS	340 a	700 a	80 a	1120 a	340 c	340 c	320 a	1010 b	480 ab	520 a	290 b	1280 a
	ZS	280 b	530 c	70 b	870 b	480 a	490 a	340 a	1320 a	510 a	470 ab	350 a	1330 a
	HS	270b	680 a	80 a	1040 a	410 b	380 b	270 b	1060 b	470 ab	510 a	330 a	1310 a
	SR	270 b	610 b	70 b	950 b	360 c	290 c	270 b	910 c	440 b	440 b	310 b	1180 b
平均 Mean	M	420 a	450 b	130 a	990 a	370 a	380 a	290 a	1050 a	490 a	530 a	380 a	1400 a
	B	290 b	630 a	70 b	990 a	400 a	380 a	300 a	1080 a	480 a	490 a	320 b	1280 b

注(Note): M—覆膜栽培 Mulching cultivation; B—无膜栽培 Bare cultivation; QS—全水处理 Irrigation in the whole growing period; ZS—中水处理 Irrigation form spike differentiating stage to heading stage; HS—后水处理 Irrigation form full-heading stage to mature stage; SR—湿润处理 No irrigation in the whole growing period. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

覆膜与无膜栽培之间差异明显(图 1)。覆膜栽培模式下 4 种水分处理植株所吸收的硅在叶片中分配率在 37.75%～49.14%之间,而在无膜栽培模式下叶片中硅的分配率均在 60.0 以上; 茎秆中硅的分配率与叶片有所不同,覆膜栽培下 QS、ZS、HS、SR 分别为 41.08%、46.65%、39.51% 和 41.89%,显著高于无膜栽培,表明覆膜栽培能提高硅向茎秆转运及分配。茎秆中硅的分配在覆膜和无膜栽培下均以 ZS 处理最多,其次为 QS、SR 处理,HS 处理分配率最低,表明后期复水不利于硅向茎秆分配。覆膜栽培下穗部硅的分配较多,分配率在 10.98%～15.60%之间,而无膜栽培较低,在 4 种不同的水分处理下分配率均在 7.5%左右。

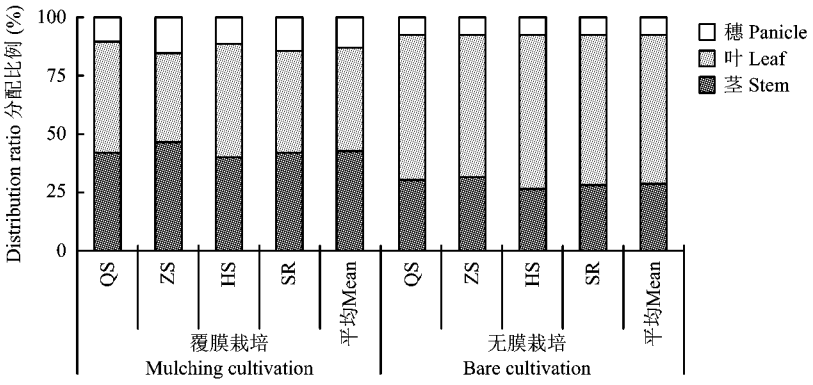

图 1　穗期硅吸收总量在各器官中的分配

Fag. 1　Partitioning of SiO_2 in organs at the full-heading stage

[注(Note): QS—全水处理 Irrigation in the whole growing period; ZS—中水处理 Irrigation form spike differentiating stage to heading stage; HS—后水处理 Irrigation form full-heading stage to mature stage; SR—湿润处理 No irrigation in the whole growing period.]

2.2.3 栽培模式和水分管理对钙、硅积累量影响的方差分析　表 5 所示,栽培模式和水分管理 2 个处理因子均对钙、硅积累量具有一定影响且存在显著的交互作用。齐穗期,栽培模式对各器官中钙积累

表5 栽培模式和水分管理对钙、硅积累量影响的方差分析（*P*值）

Table 5 Analysis results of ANOVA for the effects of cultivation mode and water management on Ca and SiO_2 accumulation (*P* value)

因子 Factor		齐穗期 Full-heading stage			蜡熟期 Wax ripeness stage			成熟期 Maturation stage		
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle
Ca积累量 Accum. of Ca	栽培模式(C)						<0.05		<0.01	<0.01
	水分管理(W)		<0.05	<0.01	<0.05				<0.05	
	C×W			<0.01						
SiO_2积累量 Accum. of SiO_2	栽培模式(C)			<0.05						
	水分管理(W)		<0.01	<0.05		<0.05				<0.05
	C×W		<0.05	<0.05					<0.01	

注(Note)：C—Cultivation mode；W—Water management.

量的影响不明显，而水分管理对叶、穗中钙的积累量影响显著；栽培模式和水分管理均对穗中硅积累量影响显著，2种处理具有显著的交互作用（$P<0.05$）。蜡熟期，各器官中钙、硅积累量也不同程度地受栽培模式和水分管理的影响，但2个处理因子的交互作用不显著。成熟期，叶片中钙积累量受到单个处理因子影响显著，但交互作用不明显；而叶片中硅积累量受单个处理因子的影响不显著，但2个因子的交互作用对其有显著影响。

2.3 覆膜旱植下叶片生理特性

2.3.1 光合速率 试验结果表明（表6），覆膜能有效提高后期叶片光合能力，4种水分处理在齐穗、乳熟、蜡熟3个时期的平均光合速率均表现为覆膜栽培大于无膜栽培。覆膜栽培下QS、ZS、HS、SR

表6 水分管理对超级杂交稻光合速率和蒸腾速率的影响

Table 6 Effect of different water management on the photosynthetic rate and transpiration rate

生育期 Growth stage	覆膜M					无膜B				
	QS	ZS	HS	SR	平均 Mean	QS	ZS	HS	SR	平均 Mean
光合速率 Photosynthetic rate [CO_2 μmol/(m^2·s)]										
齐穗期 Full heading stage	12.76 a	12.32 ab	11.59 ab	11.14 b	11.95	12.29 a	11.65 a	11.34 a	11.27 a	11.64
乳熟期 Milk ripeness stage	15.99 a	14.25 ab	15.69 a	13.24 b	14.79	15.51 a	13.98 ab	15.07 a	12.97 b	14.38
蜡熟期 Wax ripeness stage	14.18 a	13.29 ab	14.07 a	12.47 b	13.50	14.00 a	12.35 ab	13.77 a	11.85 b	12.99
平均 Mean	14.31	13.29	13.78	12.28	13.42	13.93	12.66	13.39	12.03	13.00
蒸腾速率 Transpiration rate [H_2O μmol/(m^2·s)]										
齐穗期 Full heading stage	15.39 a	14.50 ab	14.16 ab	13.65 ab	14.40	13.93 a	13.76 a	12.98 a	13.11 a	13.45
乳熟期 Milk ripeness stage	19.67 a	18.13 ab	19.20 a	17.32 bc	18.58	19.45 a	17.17 b	19.01 a	16.27 b	17.98
蜡熟期 Wax ripeness stage	18.55 a	16.31 c	18.28 a	14.98 d	17.71	18.35 a	17.07 ab	16.66 b	14.74 c	16.71
平均 Mean	17.87	17.22	17.21	15.48	16.90	17.24	16.00	16.22	14.71	16.04

注(Note)：M—覆膜栽培 Mulching cultivation；B—无膜栽培 Bare cultivation；QS—全水处理 Irrigation in the whole growing period；ZS—中水处理 Irrigation form spike differentiating stage to heading stage；HS—后水处理 Irrigation form full-heading stage to mature stage；SR—湿润处理 No irrigation in the whole growing period. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

处理的平均净光合速率分别为 CO_2 14.31、13.29、13.78、12.28 μmol/(m^2·s),高出无膜栽培 2.66%～3.93%。邹君等人的研究认为淹灌下水稻光合速率很强[16],本研究结果为不同水分管理之间 QS 处理各时期的净光合速率均显著高于 SR 处理,在覆膜和无膜栽培下 QS 处理比 SR 处理分别高出 16.53%、15.79%。

2.3.2 蒸腾作用　从表 6 还可以看出,覆膜栽培有效提高了超级杂交稻生育后期蒸腾速率,在齐穗期、乳熟期、蜡熟期分别比无膜栽培高 7.1%、3.3%、6.0%。从不同水分处理来看,齐穗期,覆膜和无膜栽培下 4 种水分处理间蒸腾速率在 H_2O 13.11～16.39 μmol/(m^2·s)之间,QS 处理与 SR 处理差异显著;乳熟期,由于 HS 处理开始灌水,蒸腾速率与齐穗期相比大幅提高,覆膜和无膜栽培下均超过了 H_2O 19.0 μmol/(m^2·s),显著高于 SR 处理;蜡熟期不同水分处理间差异最为显著,覆膜栽培下蒸腾速率从大到小依次为 QS > HS > ZS > SR,除了 QS 与 ZS 之间,其它处理间均差异显著,无膜处理条件下表现为 QS > ZS > HS > SR。方差分析发现,QS、ZS 和 SR 处理在覆膜和无膜栽培模式下差异不明显,而 HS 处理在覆膜栽培下显著高于无膜栽培。

2.4　蒸腾速率与物质吸收的相关分析

2.4.1 蒸腾对干物质积累的影响　蒸腾作用能产生叶子至根系的水势梯度所带来的根系吸水力和水分向上输导力,同时能带动光合合成物质在植物体内的积累和转运。本文在研究超级杂交稻覆膜旱植群体光合特性的基础上,分析了生育后期冠层蒸腾速率与干物质积累之间的联系(表 7)。经方差及线性回归分析表明,齐穗期、乳熟期和蜡熟期水稻群体蒸腾速率与植株干物质积累量存在正相关,其中齐穗期相关性显著($P = 0.0181$),表明齐穗期较强的蒸腾速率能促进大群体的形成,为高产打下基础。从不同器官干物质积累量分析来看,穗部与茎叶各有差异,穗部干物质积累的多少与蒸腾速率呈正相关,尤其是齐穗期和蜡熟期显著相关,相关系数达到 $r = 0.7997^*$ 和 $r = 0.7086^*$;在水稻生长后期,茎叶中储存的碳水化合物向外运输,茎叶中干物质积累的多少与后期蒸腾速率均呈负相关,其中蜡熟期达极显著水平($r = -0.8474^{**}$),因此应适当控制蜡熟期群体蒸腾速率,避免茎叶中过多的物质向外输出从而引起倒伏。

表 7　超级杂交稻群体冠层蒸腾速率与齐穗期～成熟期干物质积累的相关性

Table 7　Relationship between transpiration and dry matter accumulation of hybrid rice

项目 Item		齐穗期 Full heading stage	乳熟期 Milk ripeness stage	蜡熟期 Wax ripeness stage
植株干物质积累量	r	0.7959*	0.3084	0.4902
Dry matter accumulation of plant	p	0.0181	0.4575	0.2175
穗部干物质积累量	r	0.7997*	0.5082	0.7086*
Dry matter accumulation of panicle	p	0.0172	0.1985	0.0491
茎叶干物质积累量	r	-0.5369	-0.6819	-0.8474**
Dry matter accumulation of stem	p	0.1701	0.0625	0.0079

注(Note):“*”表示相关性达 5% 显著水平 Means significant correlated at the 5% level;“**”表示相关性达 1% 极显著水平 Means significant correlated at the 1% level.

2.4.2 蒸腾对钙、硅积累的影响　从表 8 可以看出,覆膜栽培模式下超级杂交稻对钙的吸收与乳熟期、蜡熟期叶片的蒸腾速率存在显著正相关,其中乳熟期其相关系数 $r = 0.7978^*$ ($P = 0.0177$),蜡熟期 $r = 0.7862^*$ ($P = 0.0207$),表明钙元素的吸收与蒸腾速率关系密切,较强的蒸腾作用能促进营养物质向各器官的运输。蒸腾速率能促进植株对钙的吸收,与茎叶钙吸收量显著相关,表明后期较大的蒸腾速率虽能促进植株对钙素营养的吸收,但在强大的蒸腾拉力作用下,大部分钙素营养运转至茎叶储存,而向穗部(稻谷)中运转的较少。

硅能显著提高稻米碱消值,在一定程度上降低直链淀粉含量,对提高大米的蒸煮品质和食味品质有一定作用[17]。本研究表明,覆膜旱植栽培下超级杂交稻在齐穗期蒸腾速率与硅元素的吸收量无显著相关;乳熟期和蜡熟期冠层蒸腾速率与植株及茎叶

表8 超级杂交稻群体冠层蒸腾速率与齐穗期～成熟期钙、硅吸收的相关性

Table 8 Relationship between transpiration and Ca and SiO_2 uptakes of hybrid rice

项目 Item		齐穗期 Full heading stage	乳熟期 Milk ripeness stage	蜡熟期 Wax ripeness stage
植株 Ca 吸收量	r	0.3732	0.7978*	0.7862*
Ca uptake of plant	p	0.3624	0.0177	0.0207
穗部 Ca 吸收量	r	0.3254	0.1018	0.0300
Ca uptake of panicle	p	0.4316	0.8105	0.9436
茎叶 Ca 吸收量	r	0.2814	0.8152*	0.7076*
Ca uptake of stem	p	0.4996	0.0136	0.0495
植株 SiO_2 吸收量	r	0.5111	-0.1597	-0.1024
SiO_2 uptake of plant	p	0.1954	0.7055	0.8094
穗部 SiO_2 吸收量	r	0.1099	0.7318*	0.8561**
SiO_2 uptake of panicle	p	0.7956	0.0390	0.0066
茎叶 SiO_2 吸收量	r	0.2989	-0.3132	-0.3174
SiO_2 uptake of stem	p	0.4719	0.4500	0.4436

注(Note):“*”表示相关性达5%显著水平 Means significant correlated at the 5% level. “**”表示相关性达1%极显著水平 Means significant correlated at the 1% level.

中硅的吸收量呈不显著的负相关,而穗部硅吸收量与蒸腾速率正相关,在乳熟期和蜡熟期均达到显著水平,相关系数分别为 $r=0.7318$ 和 $r=0.8561$。由此可见,在超级杂交稻高产群体的基础上,后期较快的蒸腾速率拉动了物质向上运输,促进了硅向穗部转运,有利于超级杂交稻高产、优质的协调发展。

3 讨论

3.1 覆膜旱植对产量的影响

张自常等人研究认为,水稻覆膜旱种对产量和米质均有负面影响[18],本研究中的旱植保持土壤含水量在60%以上,并未使水稻受到水分胁迫,覆膜栽培提高了旱植水稻的每穗实粒数和结实率,产量比无膜栽培有所提高,与路兴花等人研究结果一致[19];生育后期不同时段灌水对最终产量及其构成因子的影响不明显,如后期不灌溉,仅保持土壤湿润,水稻产量显著下降,这与裴岗等人的研究结果一致[20]。

3.2 硅、钙吸收特性

前人作过不少研究,周平安[21]认为,施用钾、硅、钙矿物肥增产效果明显;Seebold 等[22]及 Hayasaka 等[23]的研究认为硅能提高水稻的抗病性;硅、钙、钾等元素能提高水稻产量、品质及抗逆性[24-25],可见硅、钙等元素在水稻生长中起着重要作用。本研究探讨了不同水分管理对覆膜旱植水稻硅、钙吸收特性,发现覆膜旱植栽培模式下,幼穗分化～抽穗期灌水有利于硅向茎秆、钙向穗部的转运;齐穗～成熟期湿润管理有利于钙元素向穗部运转与分配;覆膜旱植使硅元素在水稻器官中的分配更为合理,茎秆中硅含量显著高于无膜栽培,增强了茎秆的抗虫性和抗倒伏能力;植株吸收的钙大部分存储于茎叶,仅2%左右的钙运转至在穗部,如何改善栽培措施提高超级杂交稻后期钙元素向穗部转运效率还有待进一步研究。

3.3 光合生理特性

关于覆膜栽培与光合生理的关系前人作了很多研究,但主要集中于玉米、冬小麦等作物[26-27]。卢从明研究认为[28],在轻度水分胁迫下,气孔关闭,光合速率下降,本研究表明,覆膜旱植并未降低水稻叶片生理特性,其光合速率和蒸腾速率反而有所提高,这主要是由于本试验设计的旱植栽培保持土壤含水量在60%以上,水稻并未受到水分胁迫。

3.4 蒸腾速率与物质吸收的相关性

水稻氮吸收与蒸腾的相关性前人已有研究[29],认为蒸腾速率和氮吸收速率呈显著正相关;但在 CO_2 浓度升高的条件下,两者相关性不显著。本研

究表明,覆膜旱植下超级稻在生殖生长期的钙吸收量与蒸腾速率均呈正相关关系,其中乳熟期和蜡熟期其相关性达到显著水平。孙立等人[30]研究发现水稻叶内硅分布主要受蒸腾作用的影响,与本研究结果一致,齐穗期植株硅吸收总量与蒸腾速率呈不显著正相关,乳熟期和蜡熟期呈不显著负相关,穗部硅吸收量与蒸腾速率相关性显著。因此认为,覆膜旱植栽培下后期蒸腾速率的提高有利于穗部钙和硅的吸收,对提升稻米品质起到积极作用;另一方面,蒸腾速率的提高促进了茎鞘中钙元素的输入和硅元素的输出,降低了稻米中钙含量,以及植株对病虫害和后期倒伏的抵抗能力。如何通过调节后期群体蒸腾速率,从而达到钙、硅元素在植株各器官中合理分配的目的还有待进一步研究。

在整个生殖生长期,穗部干物质积累与蒸腾速率均呈正相关,其中齐穗期和蜡熟期相关性达显著水平;茎叶干物质积累与蒸腾速率始终呈负相关,到蜡熟期时达到极显著水平。因此,后期较强的蒸腾速率有利于茎叶中储存的物质向外输出,能促进大穗的形成并使子粒饱满,另一方面,如茎秆中碳水化合物过量输出也会带来倒伏的巨大风险。总而言之,在种植超级稻时应通过覆膜、灌溉的方式适当控制水稻生长后期尤其是蜡熟期群体的蒸腾速率,从而调节光合产物及营养物质在茎、叶、穗之间的合理转运和分配,才能达到高效、高产和稳产的目的。

参 考 文 献:

[1] 祁海霞,智协飞,白永清. 中国干旱发生频率的年代际变化特征及趋势分析[J]. 大气科学学报, 2011, 34(4): 447-455.
Qi H X, Zhi X F, Bai Y Q. Inter decadal variation and trend analysis of the drought occurrence frequency in China[J]. Trans. Atm. Sci., 2011, 34(4): 447-455.

[2] 陆桂华,闫桂霞,吴志勇,何海. 近50年来中国干旱化特征分析[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 78-82.
Lu G H, Yan G X, Wu Z Y, He H. Analysis on aridification within last 50 years in China[J]. Water Res. Hydrop. Eng., 2010, 41(3): 78-82.

[3] 路兴花,吴良欢,庞林江. 覆膜后土壤水分对水稻生物学特性和产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(5): 463-467.
Lu X H, Wu L H, Pang L J. Effects of soil moisture under plastic film mulching on the biological and yield characteristics of rice [J]. Acta Agric. Zhejiangensis, 2009, 21(5): 463-467.

[4] 张玉烛,刘洋,曾翔,等. 覆盖方式对旱作水稻后期冠层生理生态特性及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(5): 487-492.
Zhang Y Z, Liu Y, Zeng X *et al*. Effects of mulching mode on canopy physiological, ecological characteristics and yield of rice under dry cultivation[J]. Chin. J. Rice Sci., 2010, 24(5): 487-492.

[5] 蔡昆争,骆世明,方祥. 水稻覆膜旱作对根叶性状、土壤养分和土壤微生物活性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1903-1911.
Cai K Z, Luo S M, Fang X. Effects of film mulching of upland rice on root and leaf traits, soil nutrient content and soil microbial activity[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(6): 1903-1911.

[6] 梁颖,王三根. 钙对离体水稻叶片和地上部衰老的影响[J]. 西南农业大学学报, 1997, 19(2): 121-125.
Liang Y, Wang S G. The effects calcium on detached rice leaves and shoots of aging[J]. J. Southwest Agric. Univ., 1997, 19(2): 121-125.

[7] 段咏新,宋松泉,傅家瑞. 钙对杂交水稻叶片中活性氧防御酶的影响[J]. 生物学杂志, 1999, 16(1): 18-19.
Duan Y X, Song S Q. Fu J R. The effect of calcium on rice leaf protective enzymes of active oxygen[J]. J. Biol., 1999, 16(1): 18-19.

[8] 刘峰,张军,张文吉. 氧化钙对水稻幼苗的生理作用研究[J]. 植物学通报, 2001, 18(4): 490-495.
Liu F, Zhang J, Zhang W J. Calcium oxide on rice seedling physiological function research[J]. Chin. Bull. Bot., 2001, 18(4): 490-495.

[9] 朱晓军,杨劲松,梁水超,等. 盐胁迫下钙对水稻幼苗光合作用及相关生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1497-1503.
Zhu X J, Yang J S, Liang Y C *et al*. Effects of exogenous calcium on photosynthesis and its related physiological characteristics of rice seedlings under salt stress[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(10): 1497-1503.

[10] 王士梅,朴钟泽,李培德,申广勤. 钙增效剂对稻米中钙等矿质元素积累及稻米品质的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(2): 185-188.
Wang S M, Piao Z Z, Li P D, Shen G Q. Effects of Ca potentiators to Ca contents, mineral elements and quality in rice [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(2): 185-188.

[11] 陆福勇,江立庚,秦华东,唐茂艳. 不同氮、硅用量对水稻产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 846-850.
Lu F Y, Jiang L G, Qin H D, Tang M Y. Effects of nitrogen and silicon levels on grain yield and qualities of rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(6): 846-850.

[12] 刘俊渤,高臣,高杰,等. 硅对稻瘟病菌侵染下水稻叶片超微结构的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(1): 40-43.
Liu J B, Gao C, Gao J *et al*. Effects of silicon on the ultrastructure of *Oryza sativa* leaves infected by magnaporthe grisea[J]. J. South China Agric. Univ., 2012, 33(1): 40-43.

[13] Verma S, Dubey R S. Effect of cadmium on soluble sugars and

enzymes of their metabolism in rice[J]. Biol. Plantarum, 2001, 44(1): 117-123.

[14] Sandalio L M, Dalurzo H C, Gomez M *et al.* Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants[J]. J. Exper. Bot., 2001, 52(364): 2115-2126.

[15] Fu J, Yang J C. Research advances in high-yielding cultivation and physiology of super rice[J]. Rice Sci., 2012, 19(3): 177-184.

[16] 邹君，杨玉蓉，谢小立. 不同水分灌溉下的水稻生态效应研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(3): 212-215.
Zou J, Yang Y R, Xie X L. On physiological effect on paddy in different mode of irrigation[J]. J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2004, 30(3): 212-215.

[17] 王远敏，王光明. 施用硅肥对水稻产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2008, (1): 23-25.
Wang Y M, Wang G M. The effect of silicon on yield of rice[J]. Till. Cult., 2008, (1): 23-25.

[18] 张自常，孙小淋，陈婷婷，等. 覆盖旱种对水稻产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 285-295.
Zhang Z C, Sun X L, Chen T T. Effects of non-flooded mulching cultivation on the yield and quality of rice[J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(2): 285-295.

[19] 路兴花，吴良欢，庞林江，等. 覆膜后土壤水分对水稻生物学特性和产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(5): 463-467.
Lu X H, Wu D H, Pang L J *et al.* Effects of soil moisture under plastic film mulching on the biological and yield characteristics of rice[J]. Acta Agric. Zhejiangensis, 2009, 21(5): 463-467.

[20] 裴岗，张玉屏，朱德峰，等. 不同水分处理对晚稻生长及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2007, 20(4): 573-576.
Pei G, Zhang Y P, Zhu D F *et al.* Effects of different water treatment on late season rice growth and yield[J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2007, 20(4): 573-576.

[21] 周平安. 钾硅钙矿物肥对水稻产量及农艺性状的影响[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(5): 136.
Zhou P A. Potassium silicate mineral fertilizer on rice yield and agronomic traits [J]. Auhui Agric. Sci. Bull., 2010, 16(5): 136.

[22] Seebold K W, Kucharek T A, Datnoff L E *et al.* The influence of silicon on components of resistance to blast in susceptible, partially resistant, and resistant cultivars of rice [J]. Phytopathology, 2001, 91(1): 63-69.

[23] Hayasaka T, Fujii H, Namai T. Silicon content in rice seedlings to protect rice blast fungus at the nursery stage[J]. J. Gen. Plant Pathol, 2005, 71(3): 169-173.

[24] 封文雅. 硅钙钾肥在水稻生产上的应用效果试验[J]. 中国农技推广, 2010, (1): 40-41.
Feng W Y. Potassium fertilizer in rice production application effect test[J]. China Agric. Techn. Exten., 2010, (1): 40-41.

[25] 孙忠明，邹广萍，方秀琴，等. 浅析水稻施硅钙肥增产试验效果[J]. 北方水稻, 2011, 41(6): 66-67.
Sun Z M, Zou G P, Fang X Q. Analysis on rice silicon calcium fertilizer yield increase effect[J]. North Rice, 2011, 41(6): 66-67.

[26] 李万峰，李兆君，梁永超，等. 覆膜对不同施肥条件下玉米拔节期光合参数与荧光参数的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1086-1089.
Li W F, Li Z J, Liang Y C. Effect of plastic film mulching on photosynthetic and fluorescence characteristics of corn leaf under different fertilization schemes at jointing stage[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2009, 17(6): 1086-1089.

[27] 王勇，高育锋，樊廷录. 旱地周年覆膜条件下冬小麦的光合特性[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 100-102.
Wang Y, Gao Y F, Fan T L. Studies on photosynthetic characteristics of winter wheat with plastic film mulching in a whole year in dryland[J]. J. Tritic. Crops, 2005, 25(6): 100-102.

[28] 卢从明，王忠. 水分胁迫抑制水稻光合作用的机理[J]. 作物学报, 1994, 20(5): 601-606.
Lu C M, Wang Z. The mechanism for the inhibition of photosynthesis in rice by water stress[J]. Acta Agron. Sin., 1994, 20(5): 601-606.

[29] 庞静，朱建国，谢祖彬，等. CO_2 浓度升高条件下水稻蒸腾与N吸收的关系[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(2): 205-209.
Pang J, Zhu J G, Xie Z B *et al.* Relations between transpiration and N uptake of rice grown in elevated air carbon dioxide concentration[J]. Chin. J. Rice Sci., 2006, 20(2): 205-209.

[30] 孙立，吴良欢，丁悌平，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.
Sun L, Wu L H, Ding T P, Tian S H. Silicon isotope compositions and distribution patterns of Si, K, Na, Ca, Mg in different parts of rice leaf[J]. Acta Sci. Nat. Univ. Sunyatseni (Nat. Sci. Ed.), 2008, 47(4): 94-99.