

水稻天然稳定碳、氮同位素组成与产量及品质的关系

王振昌^{1,2} 郭相平^{1,2} 黄双双^{1,2} 操信春^{1,2} 邱让建³ 刘春伟³

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 利用天然稳定同位素技术研究了不同灌溉方式下不同生育阶段碳、氮含量以及碳、氮稳定同位素组成与水稻产量及品质之间的关系。试验结果发现水稻产量与水稻黄熟期根系、茎秆以及叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(碳稳定同位素组成)存在显著的相关关系($P < 0.05$); 水稻籽粒的蛋白质含量以及垩白度和垩白率与水稻拔节期以及黄熟期根系、茎秆以及叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ (氮稳定同位素组成)存在显著相关关系($P < 0.05$)。通过主成分分析(Principle component analysis, PCA)以及多元线性回归分析可知, 水稻产量和品质均可通过不同时期、不同器官的碳、氮含量以及稳定同位素含量预测, 表明水稻的产量和品质与水稻碳、氮含量以及碳、氮稳定同位素组成存在相关关系。PCA 分析结果表明, 前8个主成分(Principle components, PCs)能够解释水稻各器官碳、氮相关指标 90.5% 的变异。通过多元线性回归分析可知, 不同时期、不同器官的碳、氮相关指标分别能够解释产量、粗蛋白含量、出糙率、垩白度、垩白率以及直链淀粉含量 89%、62%、80%、86%、86% 和 68% 的变异。结果表明, 通过不同时期和不同器官的碳、氮含量以及稳定碳、氮同位素含量能够有效预测不同灌溉处理的水稻产量和相关品质。

关键词: 水稻; 稳定同位素; 碳稳定同位素含量; 氮稳定同位素含量; 产量; 品质

中图分类号: S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0160-12

Relationships between Stable C and N Isotope Compositions of Rice Plants, Rice Yield and Quality

Wang Zhenchang^{1,2} Guo Xiangping^{1,2} Huang Shuangshuang^{1,2} Cao Xinchun^{1,2} Qiu Rangjian³ Liu Chunwei³

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation - Drainage and Agricultural Soil - Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China

3. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To study the relationships between stable C and N isotope compositions, C and N concentration of different organs during different growth stages and rice yield and quality under different irrigation regimes, experiment was conducted in the Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Nanjing, China, from May to October in 2013. Five treatments, including alternate flooding and light drought stress during tillering stage (T-LD), alternate flooding and heavy drought stress during tillering stage (T-HD), alternate flooding and light drought stress during jointing stage (J-LD), alternate flooding and heavy drought stress during jointing stage (J-HD) as well as control treatment (CK) with water depth being kept at 5 cm during the whole growth stage, were set up. Results indicated that rice yield had significant positive relationships with $\delta^{13}\text{C}$ of root, stem and leaves of rice plants during rice ripening stage ($P <$

收稿日期: 2016-08-02 修回日期: 2016-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079042, 51309080, 51509130, 51309132)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013B06014)和江苏省水利科技项目

作者简介: 王振昌(1981—), 男, 讲师, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术和盐碱地改良研究, E-mail: wangzhenchang@hhu.edu.cn

通信作者: 郭相平(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: xpguo@hhu.edu.cn

0.05); the gross protein content of rice grains as well as chalky rice rate and chalkiness had significant relationships with $\delta^{15}\text{N}$ of root, stem and leaves during jointing stage as well as ripening stage ($P < 0.05$). The principal component analysis (PCA) was conducted for combination of the selected C and N related parameters, and the retained principal components (PCs) were used in stepwise regression with yield and quality parameters. PCA results showed that a maximum of 90.5% of the total variability in C and N related parameters was explained by the first eight PCs. The stepwise regression analysis indicated that C and N related parameters of different organs during different growth stages could explain 89%, 62%, 80%, 86%, 86% and 68% of total variance in rice grain yield (GY), gross protein content (GPC), brown rice rate (BRR), chalky grain rate (ChGR), chalkiness degree (ChD) and amylose content (AC), respectively. Results indicated that the selected C and N related parameters of different organs during jointing and rice ripening stages could accurately predict yield and quality of rice plant grown under different irrigation regimes.

Key words: rice; stable isotope; $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{15}\text{N}$; yield; quality

引言

水稻是我国主要的粮食作物之一,随着经济的发展以及现代生活水平的提高,人们对水稻生产已经从片面关注高产,逐步转向提高稻米品质^[1-2]。水稻品质不仅受自身遗传因素以及土壤类型、温度和光照等环境生态的影响^[2],同时还受到肥料施用量、灌溉方式等农艺措施的影响^[3-4]。

随着外界环境的改变以及采用不同的农艺措施,作物的碳、氮代谢也会受到影响。碳、氮代谢的动态变化影响着作物光合产物的形成、转化以及矿物质元素的吸收和蛋白质的合成等生理过程^[5-6]。碳、氮代谢紧密相关、互相依存,碳代谢为氮代谢提供代谢需要的碳源和能量,而氮代谢可为碳代谢提供酶和光合色素,两者协调程度影响作物生长发育进程,并且与作物产量和品质形成密切相关^[7-8]。近年来的研究表明,作物的碳、氮代谢与稳定碳、氮同位素含量存在紧密关系^[9]。利用稳定同位素技术研究植物光合类型以及水分、养分利用效率已在生态学领域得到广泛的应用^[10]。自然界大气中 CO_2 的稳定碳同位素有 ^{12}C 和 ^{13}C 2 种,其中 ^{12}C 约占 98.89%, ^{13}C 占 1.11%。植物在吸收 CO_2 进行碳固定及转移过程中,受植物光合作用类型、遗传特性、生理特点等多方面的影响。植物在进行光合作用时碳同位素发生分馏作用,其组织中的 ^{13}C 与 ^{12}C 比值普遍小于大气 CO_2 中的 ^{13}C 与 ^{12}C 比值,且 ^{13}C 与 ^{12}C 比值包含了碳转移固定过程中物理、化学和生物代谢等方面的大量信息^[11]。前人研究表明番茄果实和叶片中的 $\delta^{13}\text{C}$ 均与番茄产量呈显著负相关^[12], MONNEVEUX 等^[13] 对小麦的研究也有相似的结果,表明作物 $\delta^{13}\text{C}$ 在不同水分环境下能够较好地表征作物产量,能综合反映产量形成时段内光合有机物

向果实(或籽粒)的传输积累等信息,因此对产量有较好的指示性。 ^{14}N 和 ^{15}N 是自然界中氮素的 2 种稳定性同位素^[14-15]。植物组织内 N 稳定同位素组成 ($\delta^{15}\text{N}$) 以及其在各器官的分布可以反映植物长时间内利用氮源情况以及氮素在植物体内的代谢和运转的综合信息^[9]。EVANS 等^[16] 研究表明,植物根系中未被硝酸还原酶(NR)同化的 NO_3^- , 会造成 NO_3^- 中 ^{15}N 的富集,当其转运至植物地上部分时,会造成地上部分 $\delta^{15}\text{N}$ 的增加。同样,ROBINSON 等^[14-15] 的研究也表明,草本植物从根到冠,植物组织的 $\delta^{15}\text{N}$ 有增加的趋势。当植物氮素需求低于氮素供应(如植物受到外界盐分胁迫或干旱胁迫)时,会发生较大程度的氮同位素分馏现象,造成植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的降低^[17-19]。综上所述,植物组织的 C、N 稳定同位素组成以及其在各组织内的分布,可综合反映植物长时间生长过程中的碳、氮代谢以及运转的综合信息。同时结合前人研究结果表明稻米的碳、氮代谢直接影响稻米产量和品质^[6],笔者推测作物不同部位在不同时期的 C、N 含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 与水稻产量和品质存在相关关系,然而目前对于不同器官 C、N 含量以及 C、N 稳定同位素含量与水稻品质的关系鲜有报道。

本文选择不同灌溉方式下的水稻作为研究对象,在分析水稻产量和品质与不同生育阶段以及不同器官 C、N 含量, C/N 值以及 C、N 稳定同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 相关性的基础上,采用主成分分析方法对不同原始变量组合进行主成分提取,以水稻产量和品质的标准化值为因变量、主成分得分为自变量,进行逐步回归分析得到产量和品质指标的回归模型,以期探明不同时期、不同器官的 C、N 代谢相关指标对水稻产量和品质的解释程度,为进一步深入研究 C、N 含量和 C、N 稳定同位素组成与水稻

产量和品质的关系,以及通过测定不同时期水稻 C、N 含量及其稳定同位素组成预测水稻产量、品质提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

所用的水稻品种为当地高产品种“南粳 44”(Oryza sativa L. Nanjing44)。水稻样本以及稻米来自于 5 种灌溉处理,分别为对照处理(CK)、分蘖期轻旱-轻涝-轻旱处理(T-LD)、分蘖期重旱-轻涝-重旱处理(T-HD)、拔节期轻旱-轻涝-轻旱处理(J-LD)和拔节期重旱-轻涝-重旱处理(J-HD)。各处理设 12~14 个重复。对照处理(CK)为浅水勤灌,除黄熟期外,各生育阶段均保持 5 cm 水层不变。其他处理,每天 2 次(07:00 和 18:00 各称量 1 次)称取试验桶质量,当土壤含水率低于或接近于灌水下限时,人工灌水至灌水上限,维持桶内土壤含水率处于相应生育阶段的灌水上限和灌水下限之间(灌

水上、下限如表 1 所示);试验中的涝胁迫通过将水稻试验桶统一放入对应水位的水箱来实现。水分胁迫开始前,各处理均为浅水勤灌。试验于 2013 年 5—10 月份在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室温室内进行。试验桶高为 25.5 cm,上部直径为 24 cm,下部直径为 18 cm。试验用土取自附近稻田耕作层,土壤类型为黏壤土,pH 值为 7.2,速效氮和速效磷质量比分别为 50.2 mg/kg 和 9.58 mg/kg。于 2013 年 5 月 8 日育秧,6 月 21 日选择长势基本一致的 3 叶 1 心的秧苗进行移栽,每桶 3 穴,每穴移栽秧苗 2 株,并设定此天为移栽后 0 d(0 days after transplanting, 0 DAT)。所用土壤经晒干、打碎、过筛和风干后,均匀施肥,每千克风干土施用尿素(CO(NH₂)₂)0.22 g、硫酸钾(K₂SO₄)0.09 g、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)0.25 g、有机肥 1.67 g,其中有机肥氮素质量分数为 3.75%,装桶后土壤干容重为 1.29 g/cm³,田间持水率(Field capacity, FC)为 33.0%(质量含水率)。

表 1 2013 年水稻盆栽试验设计方案

Tab. 1 Experimental design for pot grown rice in 2013

处理	胁迫情况	生育期	水分管理
CK	无	全生育期	浅水勤灌(5 cm)
T-LD	轻旱+轻涝+轻旱	分蘖期	70%~80%+10 cm+70%~80%
T-HD	重旱+轻涝+重旱	分蘖期	70%~80%+10 cm+70%~80%
J-LD	轻旱+轻涝+轻旱	拔节期	70%~80%+15 cm+70%~80%
J-HD	重旱+轻涝+重旱	拔节期	70%~80%+15 cm+70%~80%

注:除水分胁迫外,其他农技措施相同;70%~80%表示土壤含水率占田间持水率的百分数,其中 70%为水分下限,80%为水分上限;5 cm、10 cm 和 15 cm 表示水深。

1.2 测定指标与方法

于拔节末期(78 DAT)和黄熟期(122 DAT)分别采集水稻植株样品,每个处理 4 个重复,具体方法为:将试验盆中的根系连同泥土整体取出,通过清洗后,在拔节期将植株分为根、茎、叶 3 部分,在黄熟期将植株分为根、茎、叶和穗 4 部分,其中根、茎和叶在 105℃ 条件下杀青 30 min,然后 80℃ 干燥至质量恒定,放置在感量为 0.01 g 的电子天平上,测定各部分干物质量,待用。样品进行同位素和元素含量检测前,用粉碎机对水稻样品进行粉碎处理,过 80 目筛后装入样品袋,待测。于收获期(130 DAT),每个处理采集 4~6 个水稻植株,将植株分为根、茎、叶和穗 4 部分,其中穗部放入阴凉通风处进行风干,风干时间约为 42 d。

(1) C、N 含量以及 C、N 稳定同位素比率($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$):于拔节期(78 DAT)和黄熟期(122 DAT),将过 80 目筛的样品送至河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,用元素分析仪和同位素

质谱仪(MAT253 型, Thermo Fisher Scientific, USA)联用的方法测定叶片氮素含量和碳素含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 。其中 C 稳定性同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的计算式为

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{R_{\text{Sample}}}{R_{\text{Standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中 R_{Sample} ——所测样品中 ^{13}C 与 ^{12}C 的丰度比,即 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$

R_{Standard} ——国际标准样品(V-PDB)中 ^{13}C 与 ^{12}C 的丰度比^[20]

N 稳定性同位素组成($\delta^{15}\text{N}$)计算式为

$$\delta^{15}\text{N} = \left(\frac{R'_{\text{Sample}}}{R'_{\text{Standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中 R'_{Sample} ——所测样品中 ^{15}N 与 ^{14}N 的丰度比,即 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$

R'_{Standard} ——国际标准样品(空气中的 N_2)中 ^{15}N 与 ^{14}N 的丰度比^[20]

(2) 计产和考种:风干的穗部进行计产和考种,

测定每盆穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量。

(3) 稻米品质: 按照 GB/T 17891—1999《优质稻谷》^[21] 测定稻米出糙率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量等。精米中的粗蛋白质含量由元素分析仪和同位素质谱仪联用得出的含氮量乘以换算系数 5.95 得到。

1.3 数据统计分析

利用 SPSS 13.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 对不同灌溉处理下的水稻产量、品质、碳、氮含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 等进行方差分析 (Analysis of variance, ANOVA) 及 Duncan 多重比较。利用统计软件 SPSS (SPSS 13.0, SPSS Inc., USA) 对水稻产量、品质、碳、氮含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 等进行经典统计分析, 得到各个指标的描述性统计分析结果, 并采用 Shapiro - Wilk (S - W) 检验判定数据是否符合正态分布。若 W 统计量为小于 1 的正数, 则越接近于 1 越符合正态分布。若数据不符合正态分布, 则对数据进行对数转换, 若转换后的数据通过正态分布检验, 符合正态分布, 则原始数据符合对数正态分布, 反之则为偏态分布。水稻产量以及稻米品质相关变量与 C、N 含量以及 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关关系采用 Pearson 相关系数描述其相关程度, 且标注显著水平 (用 *、** 分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平显著)。采用 SPSS 13.0 进行因子共线性分析, 通过建立水稻产量和品质与不同时期、不同器官水稻 C、N 含量以及 C、N 稳定同位素比率的回归方程, 分析因子间的共线关系; 结合各因子间相关性分析, 判断

水稻产量和相关品质与不同时期、不同器官水稻 C、N 含量以及 C、N 稳定同位素比率是否可以建立回归关系。若不能, 则对自变量组合进行主成分分析 (Principle component analysis, PCA)^[22], 在此之前为消除变量间的量纲差异, 对数据进行标准化处理。数据标准化处理采用各变量值与其平均值之差除以该变量值的 Z 标准化方法, 该方法是目前多变量综合分析中使用最多的一种方法。无量纲化后各变量的平均值为 0, 标准差为 1, 从而消除量纲和数量级的影响。采用相关矩阵进行 C、N 含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 主成分分析期间, 保留特征值大于等于 1 或贡献率大于等于 5% 的主成分。采用逐步回归分析方法, 以主成分得分为自变量, 以水稻产量和品质指标标准化值为因变量进行逐步回归, 选入回归方程中的主成分应满足 $P < 0.05$ 。标准化回归模型经过转换, 可得出水稻产量和品质指标与水稻各器官 C、N 含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的回归模型。模型中自变量的相对重要程度可根据标准化回归模型中的标准化回归系数来判定。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉处理对水稻产量、品质、C、N 相关指标的影响

从图 1a 可知 (图中数据为平均值 \pm 标准误, $n = 4 \sim 6$, 不同灌溉处理上的不同字母表示数据在 $P < 0.05$ 水平经 Duncan 多重比较差异显著), 水稻产量在不同的旱涝交替胁迫处理下均呈现一定程度

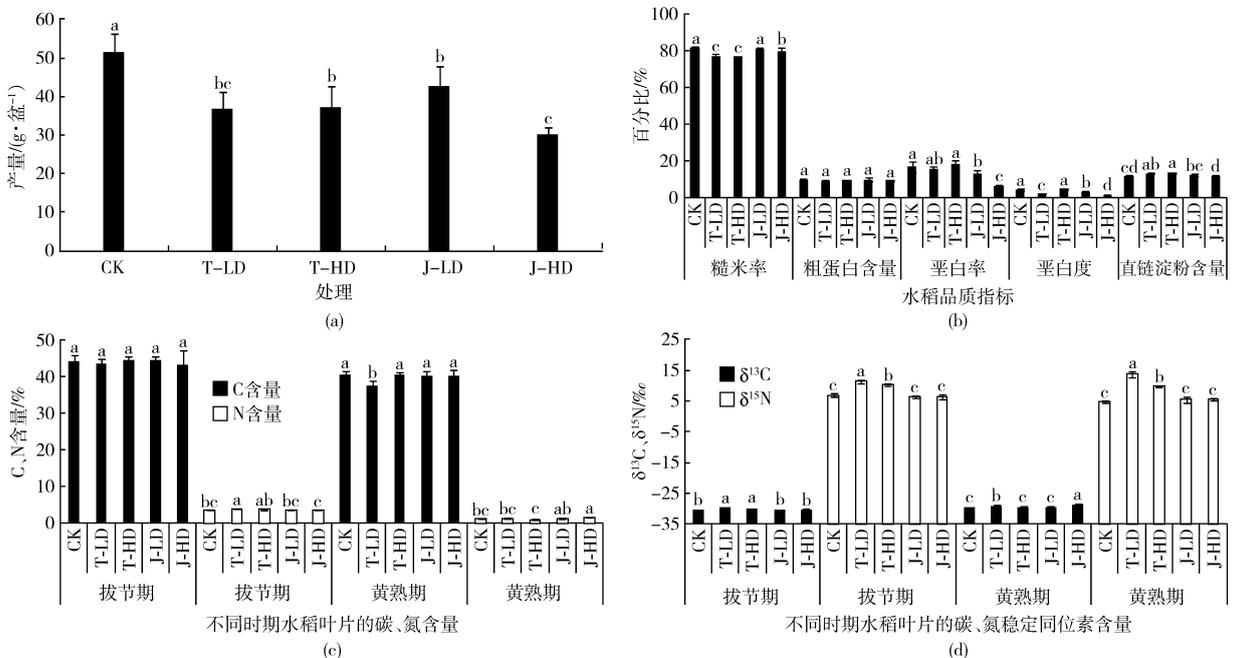


图 1 不同灌溉处理对水稻产量、品质、C、N 含量和 C、N 稳定同位素含量的影响

Fig. 1 Effects of different irrigation regimes on rice yield, rice quality, C and N concentrations of rice leaves, and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of rice leaves

的减产,具体表现为:CK > J-LD > T-HD > T-LD > J-HD。从图 1b 可知,水稻各处理间的粗蛋白含量无显著差异($P > 0.05$),而对照处理以及拔节期早涝交替胁迫处理(CK、J-LD 和 J-HD)的糙米率均显著大于分蘖期早涝交替胁迫处理(T-LD 和 T-HD)($P < 0.05$);对照处理以及分蘖期早涝交替胁迫处理的垩白率高于拔节期早涝交替胁迫处理,其中 CK 处理和 T-LD 处理显著高于 J-LD 处理和 J-HD 处理($P < 0.05$);对于垩白度和直链淀粉含量,均表现为 T-HD 处理最大, J-HD 处理最小。从图 1c 可知,拔节期各处理叶片 C 含量无显著差异($P > 0.05$);在黄熟期,CK、T-HD、J-LD 和 J-HD 处理的 C 含量无显著差异($P > 0.05$),且均显著大于 T-LD 处理($P < 0.05$);在拔节期,T-LD 和 T-HD 处理的叶片氮素含量显著大于 J-HD 处理($P < 0.05$),而在黄熟期则表现为相反的趋势。图 1d 为不同灌溉处理对水稻叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响,从图中可知,分蘖期和拔节期早涝交替胁迫处理(T-LD、T-HD、J-LD 和 J-HD)的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 有大于 CK 处理的趋势。

2.2 水稻产量、品质以及不同时期器官中 C、N 相关指标的经典统计

以水稻产量(单盆水稻的籽粒质量)、垩白度和垩白率等外观品质、粗蛋白含量和直链淀粉含量等口感和营养等内在品质为研究对象,研究上述指标在不同灌溉方式下的变异程度及其主要影响因素。表 2 为水稻产量以及品质相关指标的经典统计分析结果。从表 2 可知,各个指标并非匀称分布,然而各指标中大部分的平均值和中位数较接近,表明异常值在各指标测试中较少出现。从描述变量变异程度的变异系数(CV)来看,稻米的垩白率和垩白度变异程度最大,分别达到 33% 和 42%;而出糙率的变异程度最小,仅为 3%;产量的变异系数位于上述指标之间,为 21%。

水稻在不同时期、不同器官中的 C、N 相关指标的经典统计分析如表 2 所示。对于 C 含量,在水稻拔节期,根系的 C 含量变异系数最大(18%),而茎秆部分的变异系数最小(3%);在水稻黄熟期,下层叶片的 C 含量变异系数最大(22%),而上层叶片的变异系数最小(4%)。对于 N 含量,在水稻拔节期,根系 N 含量的变化范围为 1.18% ~ 2.10%,变异系数最大(17%);而叶片部分的变异系数最小(4%);在水稻黄熟期,根系 N 含量处于 0.88% ~ 5.37% 之间,变异系数最大(72%);而下层叶片的变异程度最小(5%)。对于 $\delta^{13}\text{C}$,在水稻拔节期,根系 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 -29.97‰ ~ -28.38‰ ,且变异系数最大(1.31%),而叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为

-30.71‰ ~ -29.64‰ ,变异系数最小(1.09%);在水稻黄熟期,根系 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 -30.21‰ ~ -28.56‰ ,且变异系数最大(1.45%),而下层叶片的变异系数最小(0.63%)。对于 $\delta^{15}\text{N}$,在水稻拔节期,茎秆的变异系数最大(37%),而叶片的变异系数最小(26%);在水稻黄熟期,上层叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化范围为 3.8‰ ~ 14.89‰,其变异系数最大(45%),而根系变异系数最小(30%)。对于 C/N 值,在水稻拔节期,根系变异系数最大(18%),而叶片的变异系数最小(7%);在水稻黄熟期,根系 C/N 值的变化范围为 5.79 ~ 46.73,变异系数最大(58%),而上层叶片的变异程度最小(14%)。

C、N 相关指标在不同器官的含量分布如表 2 所示。C 含量在拔节期和黄熟期的平均值均表现为叶片最高,根系最低;N 含量在拔节期表现为根系含量最低(1.52%),而叶片含量最高(3.65%);在黄熟期,根系 N 含量最高(2.41%),下层叶片含量最低(0.68%),而上层叶片和茎秆的氮素含量处于中间位置(分别为 1.18% 和 0.76%)。 $\delta^{13}\text{C}$ 含量在拔节期和黄熟期均表现为叶片最低(分别为 -30.19‰ 和 -30.26‰),根系最高(分别为 -29.11‰ 和 -29.45‰); $\delta^{15}\text{N}$ 含量在拔节期表现为叶片最高(8.24‰),根系最低(7.08‰); $\delta^{15}\text{N}$ 在黄熟期表现为上部叶片最高(7.87‰),根系最低(4.98‰);对于 C/N 值,在拔节期表现为茎秆最高(23.27),叶片最低(12.06),而根系处于中间位置(20.10);在黄熟期表现为下部叶片最大(59.69),而根系最低(24.24)。

2.3 水稻产量、品质与不同时期器官中 C、N 相关指标的相关性分析

表 3 为水稻产量和品质与不同时期器官中 C、N 含量、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 以及 C/N 值的相关系数。从表 3 中可知,不同产量和品质指标与不同时期 C、N 相关指标的相关性存在差异。水稻产量与拔节期根系、茎秆以及黄熟期上层叶片以及下层叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 均存在显著负相关($P < 0.05$)。在营养品质方面,粗蛋白含量不仅与拔节期根系以及茎秆的 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著负相关,还与拔节期茎秆、叶片以及黄熟期根系、茎秆以及上层叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著负相关($P < 0.05$);在口感品质中,直链淀粉含量除了与拔节期以及黄熟期根、茎秆和叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著负相关外,还与拔节期根、茎、叶片以及黄熟期下部叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著负相关,同时直链淀粉含量还与黄熟期根系和茎秆的 C/N 值存在显著相关关系($P < 0.05$)。出糙率与拔节期以及黄熟期的根、茎和叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均存在负相关关系。外观品

表 2 水稻 C、N 相关指标以及产量和品质指标的统计特征值及正态分布检验

Tab. 2 Descriptive statistical characteristics values for C and N related parameters, rice yield and quality and normal distribution test

参数	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差	变异系数/%	偏度系数
$C_{R-J}/\%$	15.11	39.09	30.01	30.30	5.51	18	-0.83
$\delta^{13}C_{R-J}/\text{‰}$	-29.97	-28.38	-29.10	-29.11	0.38	1	-0.17
$N_{R-J}/\%$	1.18	2.10	1.41	1.52	0.26	17	0.78
$\delta^{15}N_{R-J}/\text{‰}$	3.65	11.12	6.55	7.08	2.30	32	0.45
C/N_{R-J}	12.77	30.39	20.44	20.10	3.53	18	0.81
$C_{S-J}/\%$	36.97	41.07	38.82	38.87	1.12	3	0.12
$\delta^{13}C_{S-J}/\text{‰}$	-30.13	-28.91	-29.39	-29.42	0.35	1	-0.42
$N_{S-J}/\%$	1.38	2.44	1.62	1.71	0.27	16	1.39
$\delta^{15}N_{S-J}/\text{‰}$	5.02	14.41	7.31	9.30	3.42	37	0.39
C/N_{S-J}	15.91	28.91	24.41	23.27	3.46	15	-0.64
$C_{L-J}/\%$	37.50	45.86	44.09	43.86	1.92	4	-0.20
$\delta^{13}C_{L-J}/\text{‰}$	-30.71	-29.64	-30.20	-30.19	0.33	1	0.14
$N_{L-J}/\%$	3.42	3.96	3.62	3.65	0.16	4	0.38
$\delta^{15}N_{L-J}/\text{‰}$	5.81	11.84	6.97	8.24	2.17	26	0.49
C/N_{L-J}	10.19	13.42	12.24	12.06	0.79	7	-0.59
$C_{R-R}/\%$	27.02	44.34	36.61	36.24	4.15	11	-0.24
$\delta^{13}C_{R-R}/\text{‰}$	-30.21	-28.56	-29.41	-29.45	0.43	1	0.18
$N_{R-R}/\%$	0.88	5.37	1.23	2.41	1.74	72	0.64
$\delta^{15}N_{R-R}/\text{‰}$	2.95	7.86	4.97	4.98	1.55	30	0.01
C/N_{R-R}	5.79	46.73	29.20	24.24	14.09	58	-0.16
$C_{S-R}/\%$	32.42	39.58	37.08	36.82	1.99	5	-0.54
$\delta^{13}C_{S-R}/\text{‰}$	-30.49	-28.87	-29.76	-29.82	0.38	1	0.38
$N_{S-R}/\%$	0.51	1.82	0.71	0.76	0.29	38	2.87
$\delta^{15}N_{S-R}/\text{‰}$	2.07	8.82	4.33	5.17	2.01	39	0.37
C/N_{S-R}	17.77	75.07	51.78	52.96	13.60	26	-0.65
$C_{LL-R}/\%$	35.95	77.20	37.96	40.26	8.83	22	4.24
$\delta^{13}C_{LL-R}/\text{‰}$	-30.66	-29.95	-30.25	-30.26	0.19	1	-0.28
$N_{LL-R}/\%$	0.59	0.73	0.68	0.68	0.03	5	-0.65
$\delta^{15}N_{LL-R}/\text{‰}$	2.31	6.77	4.17	4.50	1.53	34	0.19
C/N_{LL-R}	52.67	115.77	56.33	59.69	13.62	23	4.04
$C_{UL-R}/\%$	36.17	42.34	39.85	39.66	1.64	4	-0.58
$\delta^{13}C_{UL-R}/\text{‰}$	-29.74	-28.53	-29.39	-29.31	0.39	2	0.84
$N_{UL-R}/\%$	1.00	1.61	1.11	1.18	0.20	17	1.41
$\delta^{15}N_{UL-R}/\text{‰}$	3.80	14.89	5.98	7.87	3.54	45	0.83
C/N_{UL-R}	24.88	39.89	36.09	34.21	4.88	14	-0.93
实收产量 $GY/(g \cdot \text{盆}^{-1})$	27.34	56.86	38.78	39.71	8.41	21	0.48
出糙率/%	75.89	82.22	80.33	79.42	2.19	3	-0.23
垩白率/%	5.00	20.00	15.50	14.20	4.71	33	-0.66
垩白度/%	1.08	5.50	3.25	3.41	1.44	42	-0.03
粗蛋白含量/%	9.22	11.13	9.70	9.82	0.48	5	1.18
直链淀粉含量/%	10.9	14.27	12.63	12.67	0.97	8	-0.28

注: C_{R-J} 、 C_{S-J} 、 C_{L-J} 、 C_{R-R} 、 C_{S-R} 、 C_{LL-R} 和 C_{UL-R} 分别为拔节期根系、茎秆、叶片以及黄熟期根系、茎秆、下层叶片和上层叶片的 C 含量; N_{R-J} 、 N_{S-J} 、 N_{L-J} 、 N_{R-R} 、 N_{S-R} 、 N_{LL-R} 和 N_{UL-R} 分别为拔节期根系、茎秆、叶片以及黄熟期根系、茎秆、下层叶片和上层叶片的 N 含量; $\delta^{13}C_{R-J}$ 、 $\delta^{13}C_{S-J}$ 、 $\delta^{13}C_{L-J}$ 、 $\delta^{13}C_{R-R}$ 、 $\delta^{13}C_{S-R}$ 、 $\delta^{13}C_{LL-R}$ 和 $\delta^{13}C_{UL-R}$ 分别为拔节期根系、茎秆、叶片以及黄熟期根系、茎秆、下层叶片和上层叶片的 $\delta^{13}C$; $\delta^{15}N_{R-J}$ 、 $\delta^{15}N_{S-J}$ 、 $\delta^{15}N_{L-J}$ 、 $\delta^{15}N_{R-R}$ 、 $\delta^{15}N_{S-R}$ 、 $\delta^{15}N_{LL-R}$ 和 $\delta^{15}N_{UL-R}$ 分别为拔节期根系、茎秆、叶片以及黄熟期根系、茎秆、下层叶片和上层叶片的 $\delta^{15}N$; C/N_{R-J} 、 C/N_{S-J} 、 C/N_{L-J} 、 C/N_{R-R} 、 C/N_{S-R} 、 C/N_{LL-R} 和 C/N_{UL-R} 分别为拔节期根系、茎秆、叶片以及黄熟期根系、茎秆、下层叶片和上层叶片的 C 和 N 含量的比值。下同。

表3 水稻产量和品质指标与水稻 C、N 相关指标的 Pearson 相关系数

Tab.3 Pearson's correlation coefficients among rice yield and rice quality parameters with C and N related parameters

参数	实收产量	糙米率	粗蛋白含量	垩白率	垩白度	直链淀粉含量
C_{R-J}	-0.14	-0.18	0.25	-0.31	-0.47 *	-0.02
$\delta^{13}C_{R-J}$	-0.50 *	-0.50 *	-0.64 **	0.18	0.17	0.57 **
N_{R-J}	-0.70	-0.24	-0.31	-0.41	-0.66 **	-0.04
$\delta^{15}N_{R-J}$	-0.10	-0.69 **	-0.40	0.58 **	0.33	0.56 **
C/N_{R-J}	0.41	0.04	0.41	0.14	0.10	-0.01
C_{S-J}	-0.13	0.15	0.08	-0.06	0.09	0.19
$\delta^{13}C_{S-J}$	-0.83 **	-0.56 **	-0.65 **	-0.23	-0.39	0.48 *
N_{S-J}	-0.12	-0.39	-0.30	0.11	-0.18	0.42
$\delta^{15}N_{S-J}$	-0.22	-0.80 **	-0.44 *	0.58 **	0.30	0.71 **
C/N_{S-J}	0.11	0.51 *	0.30	-0.11	0.19	-0.37
C_{L-J}	0.32	0.24	0.32	0.24	0.30	0.12
$\delta^{13}C_{L-J}$	-0.22	-0.81 **	-0.25	0.41	0.11	0.70 **
N_{L-J}	-0.12	-0.36	-0.26	0.31	0.04	0.59 **
$\delta^{15}N_{L-J}$	-0.13	-0.81 **	-0.45 *	0.56 **	0.22	0.65 **
C/N_{L-J}	0.30	0.66 **	0.38	-0.04	0.17	-0.31
C_{R-R}	-0.08	0.12	-0.17	-0.25	-0.37	-0.17
$\delta^{13}C_{R-R}$	-0.41	-0.33	0.10	-0.40	-0.23	0.17
N_{R-R}	-0.36	-0.77 **	-0.36	0.38	0.29	0.63 **
$\delta^{15}N_{R-R}$	-0.41	-0.81 **	-0.64 **	0.23	0.11	0.49 *
C/N_{R-R}	0.32	0.78 **	0.28	-0.33	-0.20	-0.64 **
C_{S-R}	-0.41	-0.37	0.03	-0.43	-0.58 **	0.33
$\delta^{13}C_{S-R}$	-0.12	-0.27	0.41	-0.25	-0.24	0.25
N_{S-R}	0.15	0.41	0.21	-0.37	-0.22	-0.67 **
$\delta^{15}N_{S-R}$	-0.24	-0.68 **	-0.45 *	0.45 *	0.18	0.42
C/N_{S-R}	-0.24	-0.77 **	-0.35	0.45 *	0.23	0.79 **
C_{LL-R}	-0.12	0.23	-0.21	-0.05	0.01	0.15
$\delta^{13}C_{LL-R}$	-0.54 **	-0.77 **	-0.36	0.08	-0.03	0.57 *
N_{LL-R}	-0.37	-0.12	0.17	-0.48 *	-0.46 *	0.18
$\delta^{15}N_{LL-R}$	-0.19	-0.73 **	-0.38	0.49 *	0.20	0.54 *
C/N_{LL-R}	-0.04	0.25	-0.24	0.05	0.11	0.11
C_{UL-R}	0.08	0.30	0.15	-0.04	0.26	-0.17
$\delta^{13}C_{UL-R}$	-0.76 **	-0.19	-0.28	-0.63 **	-0.75 **	0.06
N_{UL-R}	-0.43	0.19	0.14	-0.88 **	-0.74 **	-0.27
$\delta^{15}N_{UL-R}$	-0.29	-0.77 **	-0.50 *	0.38	-0.01	0.74 **
C/N_{UL-R}	0.39	-0.13	-0.14	0.88 **	0.83 **	0.24

质中,垩白率与拔节期根、茎和叶片的 $\delta^{15}N$,以及黄熟期的茎和叶片的 $\delta^{15}N$ 均存在显著正相关($P < 0.05$);垩白度与拔节期根系的 C 含量和 N 含量存在显著负相关关系,与黄熟期叶片氮素含量存在显著负相关关系($P < 0.05$)。

2.4 水稻产量、品质指标的主成分提取及分析

拔节期和黄熟期不同器官的 C、N 相关指标与水稻产量及其构成要素和品质指标的显著相关组数,都显著超过了分蘖期的组数,因而本文采用拔节期和黄熟期水稻不同器官的 C、N 相关指标作为主成分分析的变量,即 C 含量、N 含量、C/N 值、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$,其中拔节期分为根、茎和叶片 3 部分,而黄熟期分为根、茎和上部叶片以及下部叶片 4 部分,共

计 35 个变量。为消除不同变量之间量纲的差异,在进行主成分分析之前,首先对所有变量进行标准化处理。

对不同时期不同器官的 C、N 相关指标变量组合进行主成分分析适用性检验,表明变量组合适合进行主成分分析。主成分个数由特征值和主成分方差贡献率进行取舍:当特征值大于等于 1 或方差贡献率大于等于 5% 时,主成分保留。采用 SPSS 软件进行不同变量组合的主成分分析,主成分分析结果见表 4,可知,本研究中变量组合提取了 8 个主成分,累计方差贡献率为 90.5%。变量组合的累计方差贡献率都接近或超过 80%,表明本研究中提取的主成分可以解释大部分原始变量的变异。

原始变量所包含的信息可以被提取的主成分解释的比例称为共同度 (Communality estimate, CE), CE 越大表明该变量具有更高的优先权, 能够解释主成分变异的比例也越大。拔节期根系的 N 含量、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 以及 C/N 值, 拔节期茎秆的 $\delta^{15}\text{N}$, 拔节期叶片的 C 含量, $\delta^{15}\text{N}$ 以及 C/N 值, 以及黄熟期根系 N 含量、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 C/N 值, 和黄熟期茎秆 N 含量、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 C/N 值, 黄熟期上部叶片的 N 含量、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 C/N 值, 以及下部叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 C/N 值的 CE 均超过 0.90, 表明这些变量的绝大部分信息可以被所提取的主成分解释。而成熟期下部叶片 C 含量的 CE 较小 (0.665), 表明信息丢失得较为严重。

载荷是变量与主成分之间的简单相关系数, 反映了变量在主成分中的重要程度, 当主成分载荷大于 0.50 时, 认定该变量是显著的, 在主成分中具有

较高的权重。本研究中, 第 1 个主成分 (P_{C1}) 解释了 35.8% 的总变异, 在 N_{R-J} 、 $\delta^{15}\text{N}_{R-J}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{S-J}$ 、 C/N_{S-J} 、 $\delta^{13}\text{C}_{L-J}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{L-J}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{R-R}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{S-R}$ 、 N_{UL-R} 、 $\delta^{15}\text{N}_{LL-R}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{UL-R}$ 、 N_{UL-R} 和 $\delta^{15}\text{N}_{UL-R}$ 上有显著的正载荷, 在 C/N_{R-J} 、 N_{S-J} 、 C/N_{LL-R} 以及 C/N_{UL-R} 上有显著的负载荷; 第 1 主成分在 $\delta^{15}\text{N}_{L-J}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{R-R}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{UL-R}$ 上的载荷值绝对值大于 0.90, 表明这些变量是在第 1 主成分中占主导地位的影响因素。第 2 个主成分 (P_{C2}) 解释了 15.9% 的总变异, 在 $\delta^{13}\text{C}_{R-J}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{S-J}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{R-R}$ 、 N_{R-R} 、 C_{S-R} 和 N_{S-R} 上有显著的正载荷, 在 C/N_{R-R} 有显著的负载荷; 第 3 个主成分 (P_{C3}) 解释了 12.1% 的总变异, 在 C/N_{L-J} 、 $\delta^{13}\text{C}_{R-R}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{S-R}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{LL-R}$ 上有显著的正载荷, 在 C_{S-R} 和 C/N_{S-R} 上有显著的负载荷; 第 4 个主成分 (P_{C4}) 解释了 9.0% 的总变异, 而第 5~8 个主成分则分别了解释了 5.5%、5.0%、4.1% 和 3.1% 的总变异 (表 4)。

表 4 主成分分析中特征值大于 1.0 的各主成分的载荷与共同度

Tab. 4 Factor loading and communality estimate (CE) for principal component analysis with eigen value higher than 1.0

参数	主成分								共同度
	P_{C1}	P_{C2}	P_{C3}	P_{C4}	P_{C5}	P_{C6}	P_{C7}	P_{C8}	
C_{R-J}	-0.018	0.189	0.424	-0.526	-0.222	0.368	-0.040	0.372	0.818
$\delta^{13}\text{C}_{R-J}$	0.076	0.543	-0.136	0.649	0.112	-0.399	-0.021	0.020	0.912
N_{R-J}	0.743	-0.071	-0.077	0.437	0.305	-0.082	-0.255	0.207	0.962
$\delta^{15}\text{N}_{R-J}$	0.816	0.099	0.356	0.302	-0.036	-0.003	-0.19	-0.021	0.932
C/N_{R-J}	-0.774	-0.029	0.174	-0.366	-0.390	0.103	0.113	-0.144	0.960
C_{S-J}	0.199	0.639	-0.008	0.166	-0.260	0.239	0.522	-0.098	0.883
$\delta^{13}\text{C}_{S-J}$	0.122	0.525	-0.496	0.451	0.016	-0.116	0.221	-0.022	0.804
N_{S-J}	-0.803	0.400	-0.003	-0.104	0.152	0.191	-0.029	-0.032	0.877
$\delta^{15}\text{N}_{S-J}$	0.821	-0.097	0.178	-0.121	-0.077	0.386	-0.223	-0.015	0.935
C/N_{S-J}	0.869	-0.219	-0.020	0.202	-0.151	-0.06	0.129	-0.001	0.888
C_{L-J}	-0.344	-0.327	0.650	0.085	0.277	-0.019	0.443	0.104	0.940
$\delta^{13}\text{C}_{L-J}$	0.739	0.246	0.051	0.444	-0.047	0.129	0.014	-0.096	0.835
N_{L-J}	-0.116	0.355	-0.047	0.287	-0.246	0.346	0.199	0.542	0.737
$\delta^{15}\text{N}_{L-J}$	0.928	-0.032	-0.060	-0.025	0.003	0.240	-0.040	-0.196	0.965
C/N_{L-J}	-0.312	-0.392	0.642	0.029	0.323	-0.099	0.390	-0.014	0.930
C_{R-R}	-0.450	-0.208	0.198	0.528	-0.432	-0.187	-0.115	-0.174	0.829
$\delta^{13}\text{C}_{R-R}$	-0.022	0.753	0.525	-0.020	0.088	0.234	0.044	-0.253	0.971
N_{R-R}	-0.452	0.822	0.212	0.125	0.090	-0.080	-0.061	-0.085	0.966
$\delta^{15}\text{N}_{R-R}$	0.919	0.038	0.126	-0.213	-0.036	0.110	0.214	-0.024	0.967
C/N_{R-R}	0.344	-0.887	-0.123	0.082	-0.211	0.053	-0.025	0.001	0.975
C_{S-R}	0.239	0.713	-0.530	-0.132	0.026	0.160	-0.006	-0.008	0.890
$\delta^{13}\text{C}_{S-R}$	0.307	-0.273	0.706	0.356	0.139	0.134	-0.031	-0.193	0.870
N_{S-R}	0.084	0.795	0.218	-0.026	0.248	0.138	-0.404	0.122	0.946
$\delta^{15}\text{N}_{S-R}$	0.869	-0.255	-0.133	0.003	0.002	0.269	-0.103	0.177	0.953
C/N_{S-R}	0.163	0.094	-0.840	-0.085	-0.244	0.012	0.323	-0.080	0.918
C_{LL-R}	-0.281	-0.216	-0.018	0.542	0.064	0.054	0.206	0.443	0.665
$\delta^{13}\text{C}_{LL-R}$	0.427	0.358	0.663	0.262	-0.118	0.121	0.122	-0.035	0.864
N_{UL-R}	0.655	0.240	0.019	-0.437	0.341	-0.328	0.219	0.116	0.964
$\delta^{15}\text{N}_{LL-R}$	0.946	-0.178	-0.054	0.061	0.061	0.060	0.067	-0.002	0.945

续表 4

参数	主成分								共同度
	P_{C1}	P_{C2}	P_{C3}	P_{C4}	P_{C5}	P_{C6}	P_{C7}	P_{C8}	
C/N _{LL-R}	-0.643	-0.290	-0.038	0.505	-0.309	0.309	-0.136	-0.005	0.963
C _{UL-R}	-0.085	-0.289	-0.443	0.100	0.624	0.411	0.121	-0.118	0.884
$\delta^{13}\text{C}_{UL-R}$	0.872	0.067	0.052	0.004	-0.244	0.012	0.164	-0.209	0.898
N _{UL-R}	0.784	0.092	0.092	-0.241	0.009	-0.323	0.046	0.152	0.819
$\delta^{15}\text{N}_{UL-R}$	0.968	-0.100	-0.076	-0.099	0.055	0.021	0.069	-0.058	0.975
C/N _{UL-R}	-0.548	-0.249	-0.362	0.211	0.422	0.481	0.063	-0.175	0.983
特征值	12.5	5.6	4.2	3.1	1.9	1.8	1.4	1.1	
方差贡献率/%	35.8	15.9	12.1	9.0	5.5	5.0	4.1	3.1	
累积方差贡献率/%	35.8	51.7	63.8	72.8	78.3	83.3	87.4	90.5	

注： $P_{C1} \sim P_{C8}$ 分别为第1~8主成分，下同。

以主成分得分为自变量，以水稻产量和品质及其相关变量的标准化值为因变量，采用SPSS软件进行逐步回归分析，进入回归模型的主成分应通过 $P < 0.05$ 显著水平检验，得到的最终回归模型及其参数见表5。由表5及图2可以看出，水稻产量及

品质相关指标的决定系数 R^2 在0.42~0.89之间，RMSE的范围为0.37~0.78，绝大部分模型达到极其显著水平($P < 0.001$)，表明采用主成分得分进行产量及品质相关指标的模拟具有很高的可靠性和拟合精度。

表5 标准化的水稻产量和品质指标与保留的主成分间的逐步回归方程

Tab.5 Stepwise regression equations among standardized rice yield and rice quality parameters with retained principal components (PCs)

标准化的参数	回归方程	决定系数	均方根误差
产量	$Z(\text{GY}) = 9.99 \times 10^{-7} - 0.276P_{C2}$	0.42	0.78
	$Z(\text{GY}) = 1.39 \times 10^{-6} - 0.276P_{C2} - 0.212P_{C4}$	0.58	0.69
	$Z(\text{GY}) = 1.576 \times 10^{-6} - 0.276P_{C2} - 0.212P_{C4} + 0.193P_{C3}$	0.72	0.58
	$Z(\text{GY}) = 1.268 \times 10^{-6} - 0.276P_{C2} - 0.212P_{C4} + 0.193P_{C3} - 0.0873P_{C1}$	0.81	0.49
	$Z(\text{GY}) = 1.035 \times 10^{-6} - 0.276P_{C2} - 0.212P_{C4} + 0.193P_{C3} - 0.0873P_{C1} - 0.180P_{C6}$	0.86	0.43
	$Z(\text{GY}) = 1.035 \times 10^{-6} - 0.276P_{C2} - 0.212P_{C4} + 0.193P_{C3} - 0.0873P_{C1} - 0.180P_{C6} + 0.181P_{C8}$	0.89	0.38
粗蛋白质含量	$Z(\text{GPC}) = 1.824 \times 10^{-6} + 0.334P_{C3}$	0.42	0.78
	$Z(\text{GPC}) = 1.378 \times 10^{-6} + 0.334P_{C3} - 0.126P_{C1}$	0.62	0.65
出糙率	$Z(\text{BRR}) = -8.963 \times 10^{-7} - 0.254P_{C1}$	0.80	0.46
	$Z(\text{ChD}) = -5.000 \times 10^{-7} - 0.354P_{C2}$	0.70	0.56
垩白度	$Z(\text{ChD}) = -7.735 \times 10^{-7} - 0.354P_{C2} + 0.149P_{C4}$	0.77	0.50
	$Z(\text{ChD}) = -1.043 \times 10^{-6} - 0.354P_{C2} + 0.149P_{C4} - 0.220P_{C7}$	0.84	0.43
	$Z(\text{ChD}) = -9.462 \times 10^{-7} - 0.354P_{C2} + 0.149P_{C4} - 0.220P_{C7} + 0.100P_{C3}$	0.86	0.39
垩白率	$Z(\text{ChGR}) = -1.767 \times 10^{-11} - 0.353P_{C2}$	0.69	0.57
	$Z(\text{ChGR}) = 4.286 \times 10^{-7} - 0.353P_{C2} + 0.121P_{C1}$	0.86	0.37
直链淀粉含量	$Z(\text{AC}) = 2.419 \times 10^{-7} + 0.210P_{C1}$	0.55	0.69
	$Z(\text{AC}) = -1.175 \times 10^{-7} + 0.210P_{C1} + 0.196P_{C4}$	0.68	0.60

注：GY为水稻产量；GPC为粗蛋白质含量；BRR为出糙率；ChD为垩白度；ChGR为垩白率；AC为直链淀粉含量。

3 讨论

在水稻拔节期和水稻黄熟期，其干物质的 $\delta^{13}\text{C}$ 从根系—茎秆—叶片呈现逐步降低的趋势(表2)。上述趋势可由如下原因解释：①植物不同器官的主要成分不同，且不同成分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也存在较大差异。叶片中叶绿素含量较大，脂类物质较多，而茎秆和根系中的木质素和纤维素等糖类物质含量较大，且脂类物质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较糖类物质显著偏低^[23-24]，

因而造成茎秆和根系干物质中总的 $\delta^{13}\text{C}$ 大于叶片。②通过叶片光合作用制造的有机碳从叶片运转到茎秆再到根系过程中时，其新陈代谢作用造成C同位素的分馏作用，可造成叶片 ^{13}C 降低，根系 ^{13}C 升高^[25]。可移动的蔗糖等糖类物质与不可移动的木质素中 ^{13}C 含量差异较大，其中可移动的蔗糖等糖类物质富含 ^{13}C ，而木质素 ^{13}C 含量较少，当富含 ^{13}C 的蔗糖等物质从叶片转运到茎秆和根系时，会造成叶片 ^{13}C 的降低和茎秆与根系的 ^{13}C 的富集^[24]。另

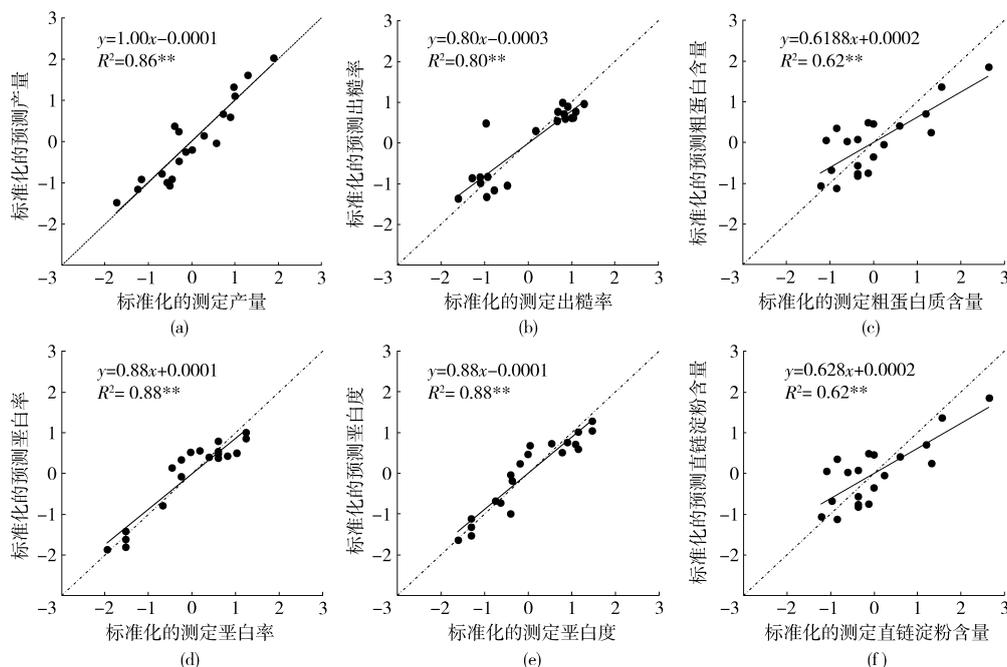


图 2 标准化测定值与运用多元回归方法预测值的比较

Fig. 2 Comparisons of standardized measured values and standardized predicted values using multivariate statistical methods

外,蔗糖在韧皮部的运输过程中,随着其与源器官距离的不断增大,糖类物质也不断从筛管中卸载出来,其中一部分转化为 ^{13}C 含量较低的木质素^[24],而未被转化的蔗糖由于C同位素的辨别作用,将携带较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,逐步由茎秆向根系运转^[24,26]。

植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 与氮源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值、菌根作用以及氮素在吸收、同化和运输过程中同位素的辨别作用有关^[16]。本研究中,在水稻拔节期,从根系到冠层(茎秆和叶片)的 $\delta^{15}\text{N}$ 有增大的趋势(表2)。上述趋势可由如下原因解释:①植物更有利于同化较轻的N同位素,在根系中未被同化的 NO_3^- 会携带较高含量的 ^{15}N 向冠层运输,造成冠层部分的 $\delta^{15}\text{N}$ 高于根系^[27]。②冠层部分的氮素在光呼吸作用下,可引起 ^{15}N 含量较低的物质,如 ^{15}N 含量较低的 NH_3 等从气孔中排出,造成 ^{15}N 含量较高的物质留存于冠层中^[17]。从表2还可知,拔节期的叶片的氮素含量显著大于黄熟期叶片,而拔节期的C/N值显著小于黄熟期的C/N值,这可能与黄熟期叶片的氮素快速向籽粒的转移有关。

从表3可知,水稻的产量与叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 显著负相关($P < 0.01$)。这与前人^[28]研究表明作物产量与叶片或者果实的 $\delta^{13}\text{C}$ 显著相关相一致。对于C3作物, $\delta^{13}\text{C}$ 是作物胞间 CO_2 浓度(C_i)与空气中 CO_2 浓度(Air CO_2 concentration, C_a)之比(C_i/C_a)在一个时段内综合的反映^[12],当作物处于胁迫环境下时,随着气孔开度变小, C_i 降低,作物能够利用 CO_2 制造出有机物的量降低,同时随着 C_i 变小,作物叶片在酶的作用下进行光合作用时降低了对 ^{13}C 的分辨作

用,增加了同化物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,即表明随着外界胁迫的增加,作物叶片气孔导度降低程度变大,即随着C3作物的产量和干物质质量的降低,而叶片中的 $\delta^{13}\text{C}$ 却升高,即作物产量和作物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 存在负相关关系。然而,ARAUS等^[29]研究表明作物产量和 $\delta^{13}\text{C}$ 不存在显著的相关性,这可能说明较严重的干旱胁迫能够显著影响作物的开花及谷物的形成,显著降低“汇”项,破坏气孔导度和产量之间的关系,相应的作物产量和叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系也发生改变。

出糙率为水稻重要的碾磨品质,从本研究可知,出糙率与拔节期和黄熟期作物的根系和叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著负相关(表3),这表明随着外界胁迫程度的适度增加,作物 $\delta^{13}\text{C}$ 有逐步增大的趋势,稻穗发育会受到影响,降低出糙率,因而作物 $\delta^{13}\text{C}$ 与出糙率呈现负相关关系。从表3还可发现,出糙率与拔节期和黄熟期作物的根系和叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 也存在显著负相关。植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 不仅与氮素在吸收、同化和运输过程中同位素的辨别作用有关,同时也受氮源 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响^[16]。前人研究表明,在干湿交替条件下,更有利于土壤中有有机氮的矿化^[30]以及 NO_3^- 的硝化作用^[32],提高土壤中氮元素的 $\delta^{15}\text{N}$,因而在干湿交替环境的吸收富含 ^{15}N 无机氮的作物,比长期处于湿润状态或者淹水状态的作物拥有更高的 $\delta^{15}\text{N}$ ^[31]。与上述结果相一致,本研究中,水稻在分蘖期旱涝交替胁迫处理的 $\delta^{15}\text{N}$ 显著高于CK处理(图1)。在旱涝交替胁迫下,稻穗的发育会受到影响,从而降低出糙率,而作物 $\delta^{15}\text{N}$ 随胁迫程度的增大而变大,即作物 $\delta^{15}\text{N}$ 与水稻出糙率存在负相关关

系(表3)。

粗蛋白含量为水稻重要的营养品质,从本研究中可知,粗蛋白含量与拔节期和黄熟期作物的根系与茎秆的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著负相关(表3),由上面的论述可知,在旱涝胁迫处理下,水稻 $\delta^{15}\text{N}$ 显著增加,并影响作物生长发育以及作物对氮素的吸收和分配,进而影响稻穗的含氮量以及粗蛋白含量。水稻稻谷的垩白度和垩白率与“源”-“库”关系存在紧密联系,光合作用产物(源)是植物新陈代谢的基础,是植物充实物(库)的主要来“源”。“库”大“源”小,源供量小于库容量,胚乳填充不充分,易产生垩白。“库”小“源”大,源供量大于库容量,籽粒灌浆速度快,增加垩白粒率和垩白度当“源”充足而“库”不足,或者“源”不足和“库”较大的情况下,水稻的垩白度和垩白率降低^[32]。水稻的垩白度和垩白率与水稻根系和叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在正相关关系,这可能表明前期的旱涝交替胁迫会造成水稻“库”变小,然而旱胁迫后复水后的后效应,会增大“源”,即“源”相对于“库”较充足,有利于降低垩白度。同时本研究还发现,水稻垩白度和垩白率还与水稻叶片氮素含量存在显著负相关,而与C/N值存在显著正相关(表3),原因尚需进一步研究。

以主成分得分为自变量,以水稻产量和品质及

其相关变量的标准化值为因变量,采用SPSS软件进行逐步回归分析,进入回归模型的主成分应通过 $P < 0.05$ 显著水平检验,得到的最终回归模型及其参数列于表5和图1,从上述数据可知,水稻产量可以被不同时期C、N含量以及同位素含量较好的预测,而水稻的粗蛋白含量和直链淀粉含量很难通过上述指标进行准确预测。水稻的产量和品质受影响的因素较多,本研究中某些品质不能被很好的解释可能表明除了C、N相关指标,其他因素,如 K^+ 和P等元素含量、微量元素以及外界环境变化均会影响水稻的品质^[3-4],尚需进一步综合分析。

4 结束语

水稻的 $\delta^{13}\text{C}$ 从叶片到根系有逐渐增加的趋势,而 $\delta^{15}\text{N}$ 从地下部分到地上部分也存在递增的趋势。水稻的产量与各部分的 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著负相关。水稻的出糙率以及粗蛋白含量与根系以及茎秆的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著负相关,而与上述部位的 $\delta^{13}\text{C}$ 负相关。水稻的垩白度和垩白率与拔节期和黄熟期根系和茎秆的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著正相关。以主成分得分为自变量,以水稻产量和品质及其相关变量的标准化值为因变量,采用逐步回归分析可知,水稻产量和部分品质指标能被较好地预测。

参 考 文 献

- 莫惠栋. 我国稻米品质的改良[J]. 中国农业科学, 1993, 26(4): 8-14.
MO Huidong. Quality improvement of rice grain in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1993, 26(4): 8-14. (in Chinese)
- 黄发松, 孙宗修, 胡培松. 食用稻米品质形成研究的现状与展望[J]. 中国水稻科学, 1988, 12(3): 172-176.
HUANG Fasong, SUN Zongxiu, HU Peisong. Present situations and prospects for the research on rice quality forming[J]. Chinese Journal of Rice Science, 1988, 12(3): 172-176. (in Chinese)
- 彭世彰, 郝树荣, 刘庆, 等. 节水灌溉水稻高产优质成因分析[J]. 灌溉排水, 2000, 19(3): 3-7.
PENG Shizhang, HAO Shurong, LIU Qing, et al. Study on the mechanisms of yield raising and quality improving for paddy rice under water saving irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2000, 19(3): 3-7. (in Chinese)
- 张自常, 李鸿伟, 曹转勤, 等. 施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 84-92.
ZHANG Zichang, LI Hongwei, CAO Zhuanqin, et al. Effect of interaction between nitrogen rate and irrigation regime on grain yield and quality of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(1): 84-92. (in Chinese)
- 薛利红, 杨林章, 范小晖. 基于碳氮代谢的水稻氮含量及碳氮比光谱估测[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 430-435.
XUE Lihong, YANG Linzhang, FAN Xiaohui. Estimation of nitrogen content and C/N in rice leaves and plant with canopy reflectance spectra[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 430-435. (in Chinese)
- 阳剑, 时亚文, 李宙炜, 等. 水稻碳氮代谢研究进展[J]. 作物研究, 2011, 25(4): 383-387.
YANG Jian, SHI Yawen, LI Zhouwei, et al. The recent progress of research on carbon and nitrogen metabolism in rice[J]. Crop Research, 2011, 25(4): 383-387. (in Chinese)
- 申丽霞, 王璞. 玉米穗位叶碳氮代谢的关键指标测定[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 155-157.
SHEN Lixia, WANG Pu. Determination of C-N metabolism indices in ear-leaf of maize (*Zea mays* L.) [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 155-157. (in Chinese)
- 荣湘民, 刘强, 朱红梅. 水稻的源库关系及碳、氮代谢的研究进展[J]. 中国水稻科学, 1998, 12(增刊): 63-69.
RONG Xiangmin, LIU Qiang, ZHU Hongmei. Advances in research on source-sink relationship and carbon and nitrogen metabolism of rice plants[J]. Chinese Journal of Rice Science, 1998, 12(Supp.): 63-69. (in Chinese)
- YOUSFI S, SERRET M D, MARQUEZ A J, et al. Combined use of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{15}\text{N}$ tracks nitrogen metabolism and genotypic

- adaptation of durum wheat to salinity and water deficit[J]. *New Phytologist*, 2012, 194(1): 230–244.
- 10 PEUKE A D, GELER A, RENNENBERG H. The effect of drought on C and N stable isotopes in different fractions of leaves, stems and roots of sensitive and tolerant beech ecotypes[J]. *Plant Cell and Environment*, 2006, 29(5): 823–835.
- 11 FARQUHAR G D, EHLERINGER J R, HUBICK K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40: 503–537.
- 12 魏镇华,杜太生,张娟,等. 利用碳同位素分辨率表征沟灌番茄水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 58–65. WEI Zhenhua, DU Taisheng, ZHANG Juan, et al. Stable carbon isotope discrimination on water use efficiency of field tomato under furrow irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(7): 58–65. (in Chinese)
- 13 MONNEVEUX P, REYNOLDS M P, TRETOWAN R, et al. Relationship between grain yield and carbon isotope discrimination in bread wheat under four water regimes[J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 22(2): 231–242.
- 14 ROBINSON D, HANDLEY L L, SCRIMGEOUR C M. A theory for $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ fractionation in nitrate-grown vascular plants[J]. *Planta*, 1998, 205(3): 397–406.
- 15 ROBINSON D, HANDLEY L L, SCRIMGEOUR C M, et al. Using stable isotope natural abundances ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) to integrate the stress responses of wild barley (*Hordeum spontaneum* C. Koch.) genotypes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(342): 41–50.
- 16 EVANS R D. Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition[J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(3): 121–126.
- 17 HANDLEY L L, AUSTIN A T, ROBINSON D, et al. The ^{15}N natural abundance ($\delta^{15}\text{N}$) of ecosystem samples reflects measures of water availability[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1999, 26(2): 185–199.
- 18 VITOUSEK P M, SHEARER G, KOHL D H. Foliar ^{15}N natural abundance in Hawaiian rainforest: patterns and possible mechanism[J]. *Oecologia*, 1989, 78(3): 383–388.
- 19 HANDLEY L L, ROBINSON D, FORSTER B P, et al. Shoot $\delta^{15}\text{N}$ correlates with genotype and salt stress in barley[J]. *Planta*, 1997, 201(1): 100–102.
- 20 DAWSON T E, MAMBELI S, PLAMBOECK A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 507–559.
- 21 GB/T 17891—1999 优质稻谷[S]. 1999.
- 22 张洪霞,马小愚. 稻米食用品质的力学指标主成分分析[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(7): 90–94. ZHANG Hongxia, MA Xiaoyu. Principal component analysis on taste quality of brown rice based on mechanical indexes of cooked rice grain[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(7): 90–94. (in Chinese)
- 23 GHASHGHAIE J, DURANCEAU M, BADECK F W, et al. ^{13}C of CO_2 respired in the dark in relation to ^{13}C of leaf metabolites: comparison between *Nicotiana sylvestris* and *Helianthus annuus* under drought[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24(5): 505–515.
- 24 HOBBI E A, WERNER R A. Intramolecular, compound specific, and bulk carbon isotope patterns in C3 and C4 plants: a review and synthesis[J]. *New Phytologist*, 2004, 161(2): 371–385.
- 25 DAMESIN C, LELARGE C. Carbon isotope composition of current-year shoots from *Fagus sylvatica* in relation to growth, respiration and use of reserves[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(2): 207–219.
- 26 VAN BEL A J E. The phloem, a miracle of ingenuity[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(1): 125–149.
- 27 WERNER R A, SCHMIDT H L. The in vivo nitrogen isotope discrimination among organic plant compounds[J]. *Phytochemistry*, 2002, 61(5): 465–484.
- 28 MONNEVEUX P, REYNOLDS M P, TRETOWAN R, et al. Carbon isotope discrimination, leaf ash content and grain yield in bread and durum wheat grown under full-irrigated conditions[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2004, 190(6): 389–394.
- 29 ARAUS J L, VILLEGAS D, APARICIO N, et al. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions[J]. *Crop Science*, 2003, 43(1): 170–180.
- 30 WANG Zhenchang, LIU Fulai, KANG Shaozhong, et al. Alternate partial root-zone drying irrigation improves nitrogen nutrition in maize (*Zea mays* L.) leaves[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 75(1): 36–40.
- 31 LIM S S, KWAK J H, LEE K S, et al. Soil and plant nitrogen pools in paddy and upland ecosystems have contrasting $\delta^{15}\text{N}$ [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 51(2): 231–239.
- 32 蔺万煌,萧浪涛,黄见良,等. 早籼稻米垩白形成与稻株源-库特性关系的研究[J]. *核农学报*, 2003, 17(6): 462–465. LIN Wanhuang, XIAO Langtao, HUANG Jianliang, et al. Relation between kernel chalkiness formation and source-sink characteristics in early indica rice[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17(6): 462–465. (in Chinese)