

## 水炭运筹对寒地黑土区稻田土壤肥料氮素残留的影响

张作合<sup>1,2</sup> 张忠学<sup>1,3</sup>

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061;

3. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为揭示水炭运筹下肥料氮素在稻田土壤中的残留情况, 采用田间小区试验与微区试验相结合的方法, 应用<sup>15</sup>N示踪技术, 以传统淹水灌溉作为对比, 研究水分管理模式和生物炭施用量二因素全面试验构成的不同水炭运筹模式下水稻收获后基肥、蘖肥、穗肥和肥料整体在稻田土壤中的残留情况, 以及各阶段施用的肥料氮素残留在不同深度土层的分布规律。试验结果表明, 稻作浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下施用的氮肥在稻田土壤中的总残留率为 28.16% ~ 34.42%, 其中基肥、蘖肥和穗肥氮素的残留率分别为 27.53% ~ 41.35%、34.32% ~ 43.50% 和 11.58% ~ 25.67%。当生物炭施加量在 0 ~ 12.5 t/hm<sup>2</sup> 时, 水稻收获后两种灌溉模式下基肥和蘖肥氮素在土壤中的残留量均随着生物炭施入量的增加而增大, 而穗肥氮素在土壤中的残留量随生物炭施入量的增加而减小, 相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式各阶段肥料氮素在土壤中的残留率显著高于传统淹水灌溉 ( $P < 0.05$ ), 且两种灌溉模式肥料氮素在相同土层深度中的残留量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式各阶段施用的氮肥在稻田 0 ~ 20 cm 土层中的残留量均高于传统淹水灌溉, 而在 40 ~ 60 cm 土层的残留量均低于传统淹水灌溉; 施加 25 t/hm<sup>2</sup> 生物炭时, 对稻作浅湿干灌溉模式的基肥、蘖肥和穗肥氮素在稻田土壤中的残留产生负效应。合理的水炭运筹模式能够增加耕层土壤(0 ~ 20 cm)肥料氮素残留量, 减少肥料氮素损失, 抑制肥料氮素向深层土壤运移, 降低残留在土壤中的肥料氮素对稻田生态环境造成污染的风险。

**关键词:** 寒地黑土区; 稻田; 水炭运筹; 残留量; 损失量; 同位素示踪技术

中图分类号: S511; S14-3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0284-11

OSID:



## Effects of Water and Biochar Management on Nitrogen Fertilizer Residue in Paddy Fields of Cold and Black Soil Region

ZHANG Zuohe<sup>1,2</sup> ZHANG Zhongxue<sup>1,3</sup>

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China

3. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to reveal the residual situation of fertilizer nitrogen in paddy soil under water and biochar management, the method of combining field plot experiment with micro-plot was used to label basal fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer respectively. Compared with traditional flooding irrigation, the residual situation of basal fertilizer, tillering fertilizer, panicle fertilizer and whole fertilizer in paddy soil after rice harvest and the distribution law of nitrogen residue in different depths soil layer of fertilizer applied at different stages under different water and biochar management modes were studied. The results showed that the total nitrogen residues in paddy soils under different biochar application levels was 28.16% ~ 34.42% under dry-wet-shallow irrigation mode, and the nitrogen residues of basal fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer were 27.53% ~ 41.35%, 34.32% ~ 43.50% and 11.58% ~ 25.67%, respectively. When the application amount of biochar was below 12.5 t/hm<sup>2</sup>, the residual amount of basal fertilizer and tillering nitrogen in paddy soil was increased with the increase of

收稿日期: 2019-04-22 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)

作者简介: 张作合(1988—),男,博士生,绥化学院讲师,主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: zhangzuohe@126.com

通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangzhongxue@163.com

biochar application amount under the two irrigation modes after harvest, while the residual amount of panicle fertilizer nitrogen in paddy soil was decreased with the increase of biochar application amount. Under the same application level of biochar, the residual rate of fertilizer nitrogen in soil was significantly higher than that in conventional flooding irrigation ( $P < 0.05$ ), the residual amount of fertilizer nitrogen in the same soil depth under the same biochar application level was significantly different between the two irrigation modes ( $P < 0.05$ ). The residual amount of nitrogen fertilizer applied at different stages under different biochar application levels in paddy field under dry-wet-shallow irrigation mode was higher than that under conventional flooding irrigation, while the residual amount in 40 ~ 60 cm soil layer was lower than that under conventional flooding irrigation. And the application of biochar as 25 t/hm<sup>2</sup> had a negative effect on the residual nitrogen of basal fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer in paddy soil under dry-shallow-wet irrigation mode. Reasonable water and biochar management model can increase the residual amount of fertilizer nitrogen in plough soil (0 ~ 20 cm), reduce the loss of fertilizer nitrogen, inhibit the movement of fertilizer nitrogen to deep soil, and reduce the risk of pollution of fertilizer nitrogen residue in soil to paddy ecological environment. The results can provide theoretical basis and technical support for the application of water and carbon management model in paddy field in cold and black soil region.

**Key words:** cold and black soil region; paddy field; water and biochar management; residue; loss; isotope trace technology

## 0 引言

现代农业生产中,施用氮肥对提高水稻产量和保障粮食安全具有重要作用<sup>[1]</sup>。农民习惯通过施入高量化学氮肥来增加作物产量,然而过量的氮肥投入会导致氮肥利用率降低和减产<sup>[2]</sup>。施入稻田中的肥料氮素仅有一部分被作物直接吸收,一部分以 NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>等形式进入大气中,或以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 形态进入地表或地下水体中,剩余部分以矿质态和有机态形式残留在土壤中,用于补充稻田土壤氮库,供后季水稻吸收利用<sup>[3]</sup>。过量施用氮肥导致水稻生产中氮素平衡严重失调,大量肥料氮素残留在土壤中,对稻田生态环境造成污染。东北寒地黑土区和南方地区的气候和土壤差异较大,肥料氮素在高肥力稻田土壤中的迁移转化机理也发生变化<sup>[3-4]</sup>,前人研究<sup>[5-11]</sup>成果在该地区不适用。因此,针对寒地黑土区特点研究稻作收获后肥料氮素在稻田土壤中的残留情况非常必要。

关于肥料氮素在稻田土壤中残留的相关研究国内已有一些报道<sup>[12-15]</sup>。林晶晶<sup>[12]</sup>研究表明,两年不同时期施用的肥料氮素在稻田土壤中残留率由大到小为基肥、蘖肥、穗肥。而张忠学等<sup>[13]</sup>研究发现,基肥、蘖肥和穗肥氮素在稻田土壤中的残留率分别为 29.7% ~ 32.7%、54.9% ~ 57.3% 和 29.4% ~ 35.4%。李鹏飞等<sup>[14]</sup>通过田间微区试验研究发现,水稻收获后控释尿素在土壤中的残留量随土层深度的增加而显著下降,肥料-<sup>15</sup>N 总残留量约 78% 分布在 0 ~ 20 cm 土层中,19% 左右分布在 20 ~ 60 cm 土层,而在 60 cm 以下土层中仅占不到 4%。彭玉净

等<sup>[15]</sup>也发现,水稻收获时土壤中不同追肥氮素的残留主要集中在 0 ~ 20 cm 土层中。综合来看,肥料氮素的残留受气候特征、土壤类型及肥力和田间管理方式等多种因素的影响,且存在不确定性。

许多专家学者<sup>[16-17]</sup>在研究土壤氮素残留时常采用差值法,这种方法无法准确定量地分析肥料氮素的残留状况。本文采用田间小区试验与微区试验相结合的方法,应用<sup>15</sup>N 示踪技术,以传统淹水灌溉作为对比,研究不同水炭运筹模式下水稻收获后基肥、蘖肥、穗肥和肥料整体在稻田土壤中的残留情况,以及各阶段施用的肥料氮素残留在不同深度土层的分布规律,为水炭运筹管理在寒地黑土区稻田的应用提供理论依据和技术支撑,以期提高稻田土壤残留肥料氮素利用率和减少稻田土壤残留肥料氮素损失。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5 月 19 日—9 月 21 日,在黑龙江省庆安县和平灌区水稻灌溉试验站进行。试验站(127°40'45"E, 46°57'28"N)位于呼兰河流域中上游,属于寒地黑土区。气候特征属寒温带大陆性季风气候,第三积温带,全年无霜期 128 d 左右,多年平均降水量 500 ~ 600 mm,平均气温为 2 ~ 3℃,平均日照时数为 2 600 h,为黑龙江省典型的水稻生产区。

### 1.2 试验材料

水稻秸秆生物炭,由辽宁金和福农业开发有限公司生产,在 450℃ 高温无氧条件下裂解制备而成,每公顷稻草可制成直径 2 mm 颗粒形式的秸秆生物

炭(去除灰分)约为2.5 t, pH值8.86, 含碳质量分数42.72%, 填充密度 $0.13 \text{ g/cm}^3$ , 比表面积 $81.85 \text{ m}^2/\text{g}$ , 总孔容积 $0.080 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 阳离子交换量(CEC)为 $44.7 \text{ cmol/kg}$ 。供试土壤为黑土, 在泡田之前, 对试验小区0~20 cm土层进行5点对角取样后混合, 分析主要的土壤理化性质, pH值6.40, 有机质质量比 $41.80 \text{ g/kg}$ , 全氮质量比 $1.51 \text{ g/kg}$ , 全磷质量比 $15.61 \text{ g/kg}$ , 全钾质量比 $19.86 \text{ g/kg}$ , 碱解氮质量比 $148.27 \text{ mg/kg}$ , 速效磷质量比 $24.22 \text{ mg/kg}$ , 速效钾质量比 $156.13 \text{ mg/kg}$ 。供试水稻品种为研究区大面积推广种植的绥粳18, 插秧密度为 $25 \text{ 穴/m}^2$ 。

### 1.3 试验设计

采用灌水方式和生物炭施用量二因素全面试验, 设置浅湿干灌溉(Dry-wet-shallow irrigation, D)和传统淹水灌溉(Flooding irrigation, F)两种水分管理模式(表1)。水稻浅湿干灌溉模式各处理根据控制指标来确定灌水时间和灌水定额, 当田面无水层后, 每天08:00和18:00, 用土壤水分测定仪(TPIME-PICO64/32型)分别测定各小区的土壤含水率, 当土

壤含水率接近或低于灌水下限, 灌水至上限, 并记录各处理的灌水量; 传统淹水灌溉模式各处理的试验小区田面无水层时, 人工灌水至上限。秸秆生物炭每5年施用一次, 施用量设4个水平, 即 $0 \text{ t/hm}^2$ (B1)、 $2.5 \text{ t/hm}^2$ (1年还田量, B2)、 $12.5 \text{ t/hm}^2$ (5年还田量, B3)、 $25 \text{ t/hm}^2$ (10年还田量, B4)。共计8个处理, 每个处理3次重复, 共24个试验小区, 方形小区面积 $100 \text{ m}^2$ , 采用随机区组排列, 各小区之间田埂向地下内嵌40 cm深的塑料板。秸秆生物炭在泡田前施入; 按当地施肥标准施纯氮 $110 \text{ kg/hm}^2$ , 基肥、蘖肥、穗肥按5:2:3分施;  $\text{K}_2\text{O}$ 施入量 $80 \text{ kg/hm}^2$ , 基肥、穗肥按1:1分施;  $\text{P}_2\text{O}_5$ 施入量 $45 \text{ kg/hm}^2$ , 作为基肥一次性施入。供试肥料选择尿素(含N质量分数46.4%)、过磷酸钙(含 $\text{P}_2\text{O}_5$ 质量分数12%)、硫酸钾(含 $\text{K}_2\text{O}$ 质量分数52%), 并换算成实际化肥施入量。2018年5月5日施基肥, 5月19日移栽水稻幼苗, 株距13.32 cm, 行距30 cm, 每穴3株, 9月21日收获。水稻生长期注意田间管理, 严格控制病虫害。

表1 稻田各生育期水分管理

Tab.1 Water management during each growth period of rice field

灌溉模式	返青期	分蘖前期	分蘖中期	分蘖后期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
浅湿干灌溉	0~30 mm	$0.85\theta_s \sim 30 \text{ mm}$	$0.85\theta_s \sim 30 \text{ mm}$	晒田	$0.85\theta_s \sim 30 \text{ mm}$	$0.85\theta_s \sim 30 \text{ mm}$	$0.7\theta_s \sim 30 \text{ mm}$	落干
传统淹水灌溉	0~30 mm	0~50 mm	0~50 mm	晒田	0~50 mm	0~50 mm	0~50 mm	落干

注:  $\theta_s$  为根层土壤饱和含水率。

为明确水炭运筹下不同阶段施用的氮肥在各层土壤中残留情况, 在试验小区内设置了 $^{15}\text{N}$ 示踪微区, 每个试验小区内设置1个微区试验, 即同一处理下设置3个分处理: M1、M2、M3。各处理试验设置见表2, 分处理1为仅基肥施用 $^{15}\text{N}$ -尿素, 蘖肥和穗肥施用未标记的普通尿素; 分处理2为仅蘖肥施用 $^{15}\text{N}$ -尿素, 基肥和穗肥施用未标记的普通尿素; 分处理3为仅穗肥施用 $^{15}\text{N}$ -尿素, 基肥和蘖肥施用未标记的普通尿素。稻田整地后立即在每个小区内埋设 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的无底钢板矩形框, 将微区埋30 cm深至犁底层下, 施用上海化工研究院生产丰度为10.22%的 $^{15}\text{N}$ 标记尿素, 深度与试验小区相同。微区内设置单独排灌系统, 水稻的种植密度、肥料用量、生物炭施用量及灌水方式与所在的试验小区相同。

### 1.4 样品的采集与测定

各层土壤容重及全氮含量: 水稻收获后采集土壤样品, 每个处理微区内外分别用环刀(100 mL)按照“S”形分层取原状土和混合土样, 按0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm分层取样, 每层取3个平行土

样, 原状土的环刀用胶带密封后, 连同各层装袋的混合土样一起带回实验室, 其中原状土 $105^\circ\text{C}$ 干燥至恒定质量, 用来计算土壤容重; 各处理的混合土样带回实验室后, 剔除石块和残留的根, 风干后将土样放入瓷研钵进行研磨, 研磨后过80目筛, 利用AA3型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH, 德国)测定土壤全氮含量, 将剩余土壤样品装袋密封保存, 供稳定同位素测定时使用。

土壤 $^{15}\text{N}$ 原子百分比: 稳定同位素测试在东北农业大学农业农村部水资源高效利用重点实验室完成, 将粉碎过筛后的土壤样品带回实验室, 采用同位素质谱仪(DELTA V Advantage, 美国)和元素分析仪(Flash 2000 HT, 美国)联用的方法测定土壤样品中 $^{15}\text{N}$ 的丰度。

气象数据由试验站DZZ2型自动气象站(天津气象仪器厂)自动记录(图1)。

### 1.5 计算方法和数据分析

水炭运筹下稻田各层土壤样品中基肥氮素的百分比 $A_{N(b)}$ 、蘖肥氮素的百分比 $A_{N(i)}$ 、穗肥氮素的百分比 $A_{N(p)}$ 计算公式为<sup>[13]</sup>

表 2 试验处理设计

Tab.2 Design of experimental treatments

小区	生物炭施用 量/(t·hm <sup>-2</sup> )	微区 试验	施尿素量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			小区	生物炭施用 量/(t·hm <sup>-2</sup> )	微区 试验	施尿素量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
			基肥	蘖肥	穗肥				基肥	蘖肥	穗肥
		DB1M1	119 *	47	71			FB1M1	119 *	47	71
DB1	0	DB1M2	119	47 *	71	FB1	0	FB1M2	119	47 *	71
		DB1M3	119	47	71 *			FB1M3	119	47	71 *
		DB2M1	119 *	47	71			FB2M1	119 *	47	71
DB2	2.5	DB2M2	119	47 *	71	FB2	2.5	FB2M2	119	47 *	71
		DB2M3	119	47	71 *			FB2M3	119	47	71 *
		DB3M1	119 *	47	71			FB3M1	119 *	47	71
DB3	12.5	DB3M2	119	47 *	71	FB3	12.5	FB3M2	119	47 *	71
		DB4M3	119	47	71 *			FB4M3	119	47	71 *
		DB4M1	119 *	47	71			FB4M1	119 *	47	71
DB4	25.0	DB4M2	119	47 *	71	FB4	25.0	FB4M2	119	47 *	71
		DB4M3	119	47	71 *			FB4M3	119	47	71 *

注: \* 代表施用的是<sup>15</sup>N-尿素。

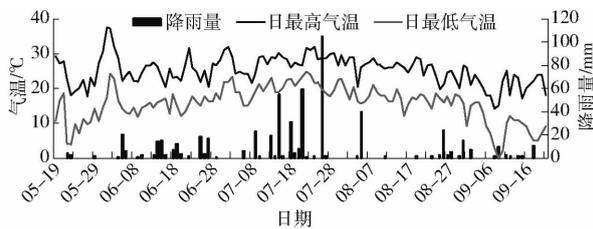


图 1 2018 年水稻生长期气温和降雨量日变化

Fig.1 Daily variation of air temperature and precipitation during paddy growth period in 2018

$$A_{N(b,t,p)} = \frac{a-b}{c-d} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $a$ ——稻田微区内土壤样品<sup>15</sup>N 丰度, %  
 $b$ ——稻田相同处理小区内的同一层土壤样品<sup>15</sup>N 丰度, %  
 $c$ ——<sup>15</sup>N 标记尿素中<sup>15</sup>N 的丰度, %  
 $d$ ——自然<sup>15</sup>N 丰度标准值, 为 0.366 3%

稻田各层土壤的氮素总量 (kg/hm<sup>2</sup>) 为

$$S_{TN} = \rho VN_s \quad (2)$$

式中  $\rho$ ——稻田各层土壤容重, g/cm<sup>3</sup>  
 $V$ ——稻田各层土壤体积, m<sup>3</sup>  
 $N_s$ ——稻田各层土壤的全氮含量, g/kg

不同阶段施用的肥料氮素在稻田土壤中的残留量 (kg/hm<sup>2</sup>) 为

$$R_{N(b,t,p)} = S_{TN} A_{N(b,t,p)} \quad (3)$$

肥料氮素在稻田土壤中的总残留量 (kg/hm<sup>2</sup>) 为

$$R_{N(\text{total})} = R_{N(b)} + R_{N(t)} + R_{N(p)} \quad (4)$$

式中  $R_{N(b)}$ 、 $R_{N(t)}$ 、 $R_{N(p)}$ ——基肥、蘖肥、穗肥氮素在稻田各层土壤中的残留量, kg/hm<sup>2</sup>

稻田土壤中的基肥、蘖肥、穗肥和肥料总氮素残留率 (%) 为

$$S_{FNR(b,t,p,\text{total})} = \frac{R_{N(b,t,p,\text{total})}}{F_{N(b,t,p,\text{total})}} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $F_{N(b,t,p,\text{total})}$ ——基肥、蘖肥、穗肥、总施氮量 (纯氮), kg/hm<sup>2</sup>

稻田基肥、蘖肥和穗肥的损失率 (%) 为

$$F_{NL(b,t,p)} = 1 - F_{NRE(b,t,p)} - S_{FNR(b,t,p)} \quad (6)$$

式中  $F_{NRE(b,t,p)}$ ——基肥、蘖肥、穗肥吸收利用率 (前期试验数据), %

数据分析和处理采用 WPS 2019、SPSS 13.0, 用 Duncan 进行处理间的多重比较, 用 WPS 2019 和 Origin 8.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水炭运筹下肥料氮素在稻田土壤中的总残留

由图 2a (图中不同小写字母表示相同处理在  $P < 0.05$  水平差异显著, 下同) 可知, 水炭运筹下施用的氮肥在稻田土壤中总残留量在 27.24 ~ 37.86 kg/hm<sup>2</sup> 范围内变化, 当生物炭施加量在 0 ~ 12.5 t/hm<sup>2</sup> 时, 两种灌溉模式下施用的氮肥在稻田土壤中总残留量都随着生物炭施入量的增加而增大, 且两种灌溉模式之间施用的氮肥在稻田土壤中总残留量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 与传统淹水灌溉相比, 水稻收获后浅湿干灌溉模式在 3 个生物炭施用水平下肥料-<sup>15</sup>N 在土壤中残留量较高, 在相同生物炭施用水平下较传统淹水灌溉增加了 13.73%、18.03% 和 20.50%, 稻作浅湿干灌溉模式下稻田施用的肥料-<sup>15</sup>N 有 28.16% ~ 34.42% 残留在土壤中 (图 2b), 在相同生物炭施用水平下高于传统淹水灌溉。当生物炭施用量为 25 t/hm<sup>2</sup> 时, 稻作传统淹水灌溉模式施用的氮肥在稻田土壤中总残留量高于浅湿干灌溉, 但二者差异不显著 ( $P > 0.05$ )。研究结果表明, 两种灌溉模式

下施加一定量的生物炭能够增加肥料氮素在稻田土壤中的残留量;浅湿干灌溉模式虽然增加了氨挥发,但减少了氮素其他途径的损失,使肥料氮素在土壤中的残留量增加<sup>[18]</sup>。

由图2c、2d可知,比较不同土层深度中肥料<sup>15</sup>N的残留量,发现两种灌溉模式不同生物炭施用水平下施用的肥料<sup>15</sup>N在稻田0~20 cm的耕作层中残留最多,稻作浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下施用的肥料<sup>15</sup>N在0~20 cm的耕作层中残留量占总残留量的53.78%~64.16%,在相同生物炭施用水平下较传统淹水灌溉增加了38.25%、

45.59%、46.20%和5.34%;而相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式40~60 cm土层的肥料<sup>15</sup>N残留量较传统淹水灌溉分别降低23.83%、25.23%、27.30%和19.97%。当生物炭施加量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,两种灌溉模式稻田施用的肥料<sup>15</sup>N在耕作层中的残留量随着生物炭施入量的增加而增大。研究结果表明,稻作浅湿干灌溉模式下肥料<sup>15</sup>N在0~20 cm的表层土壤中总残留量显著高于传统淹水灌溉,后季水稻理论上可利用肥料残余氮量增加,而传统淹水灌溉模式下40~60 cm土层残留较多,氮素极易发生淋溶而污染地下水。

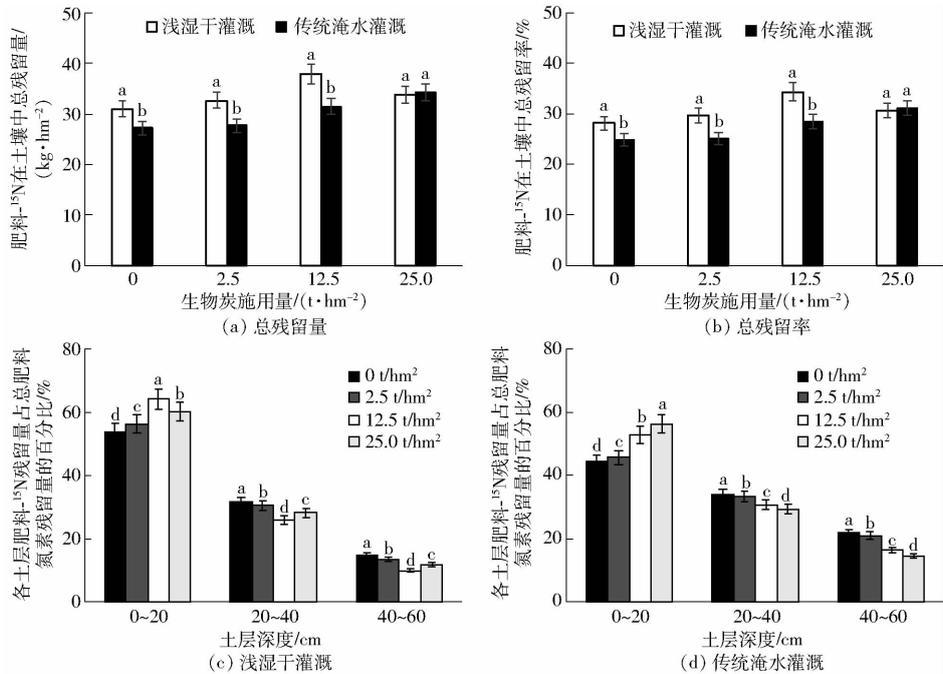


图2 不同处理稻田土壤中施用肥料<sup>15</sup>N的总残留量及残留率和各土层残留量占肥料<sup>15</sup>N总残留量的百分比

Fig. 2 Retention amount for labeled-<sup>15</sup>N and retention rate for labeled-<sup>15</sup>N in paddy soil and percentage of residue of fertilizer-<sup>15</sup>N to total residue of fertilizer-<sup>15</sup>N under different treatments

## 2.2 水炭运筹下基肥氮素在土壤中的残留

由图3a可知,不同水炭运筹下两种灌溉模式之间基肥<sup>15</sup>N在稻田土壤中的总残留量差异显著( $P < 0.05$ ),当生物炭施加量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,两种灌溉模式的基肥<sup>15</sup>N在稻田土壤中的总残留量均随生物炭施入量的增加而增大,稻作浅湿干灌溉模式在不同生物炭施用水平下基肥<sup>15</sup>N在0~60 cm土壤中残留的总量在15.14~22.74 kg/hm<sup>2</sup>范围内变化,相当于有27.53%~41.35%的基肥氮素残留在土壤中(图3b);传统淹水灌溉模式在12.88~20.53 kg/hm<sup>2</sup>范围内变化,相当于有23.42%~37.33%的基肥氮素残留在土壤中。相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式基肥<sup>15</sup>N在稻田土壤中的总残留量较传统淹水灌溉增加17.55%、24.03%、27.25%和5.07%,稻田应用浅湿干灌溉模式能够提高基肥<sup>15</sup>N在土壤中残留量。两种灌溉

模式之间肥料氮素在土壤总残留量中基肥<sup>15</sup>N的贡献率差异显著(图3c),稻作浅湿干灌溉模式下肥料氮素总残留量中基肥的贡献率为48.87%~63.95%,高于传统淹水灌溉的47.28%~59.94%。

由图3d、3e可知,水炭运筹下仅基肥施用<sup>15</sup>N-尿素,水稻收获后浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下基肥施用总量的14.81%~26.78%残留在0~20 cm土层中;8.17%~10.50%残留在20~40 cm土层中;4.38%~4.84%残留在40~60 cm土层中,施加一定量的生物炭增加了0~20 cm土层基肥<sup>15</sup>N的残留量,降低了40~60 cm土层基肥<sup>15</sup>N残留量。两种灌溉模式之间相同土层深度的基肥<sup>15</sup>N的残留量差异显著( $P < 0.05$ ),稻作浅湿干灌溉模式在相同生物炭施用水平下基肥<sup>15</sup>N在0~20 cm的残留量较传统淹水灌溉增加了45.01%、57.05%、53.17%和12.63%;相同生物炭施用水平下40~

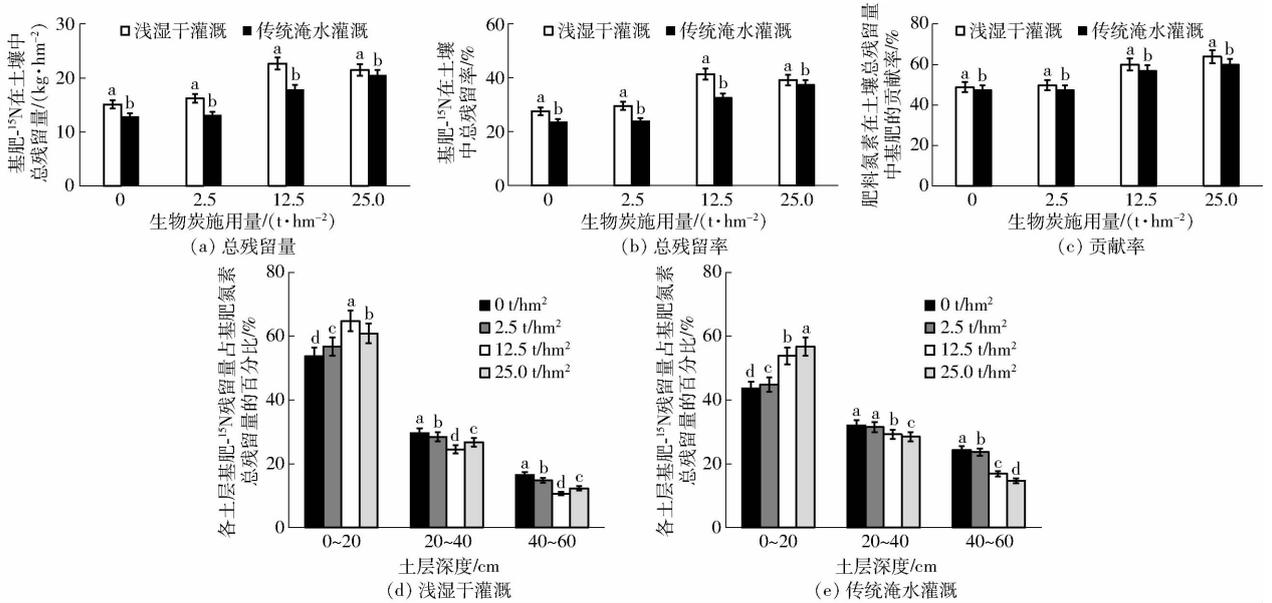


图3 不同处理稻田土壤中施用基肥<sup>15</sup>N的总残留量及残留率、肥料氮素残留中基肥的贡献率和各土层残留量占基肥<sup>15</sup>N总残留量的百分比

Fig. 3 Retention amount for basal-<sup>15</sup>N and retention rate for basal-<sup>15</sup>N in paddy soil, contribution rate of basal in fertilizer nitrogen residue and percentage of residue of basal-<sup>15</sup>N to total residue of fertilizer-<sup>15</sup>N under different treatments

60 cm的基肥<sup>15</sup>N残留量较传统淹水灌溉降低了20.22%、22.33%、19.80%和11.55%。合理的水炭运筹模式能够有效地降低残留肥料氮素向下迁移而造成潜在的地下水污染的风险,同时保证了稻田耕层土壤肥力。

### 2.3 水炭运筹下蘖肥氮素在土壤中的残留

由图4a、4b可知,水炭运筹下两种灌溉模式之间蘖肥<sup>15</sup>N在稻田土壤中的总残留量差异显著( $P < 0.05$ ),当生物炭施加量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,两种灌溉模式的蘖肥<sup>15</sup>N在稻田土壤中的总残留量均随生物炭施加量的增加而增大,稻作浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下蘖肥<sup>15</sup>N在稻田土壤各层的残留总量在7.55~9.57 kg/hm<sup>2</sup>范围内变化,相当于有34.32%~43.50%的蘖肥氮素残留在土壤中。当生物炭施加量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,与传统淹水灌溉模式相比,稻作浅湿干灌溉模式相同生物炭施用水平下蘖肥<sup>15</sup>N在土壤中的残留总量增加14.05%、11.52%和12.32%,稻田应用浅湿干灌溉模式能够提高蘖肥<sup>15</sup>N在土壤中的残留量。当施加25 t/hm<sup>2</sup>生物炭时,稻作浅湿干灌溉模式的蘖肥<sup>15</sup>N在土壤中的残留总量较传统淹水灌溉模式降低了11.56%。对比两种灌溉模式下肥料氮素在土壤总残留量中蘖肥<sup>15</sup>N的贡献率可知(图4c),当生物炭施用量在2.5~25 t/hm<sup>2</sup>时,两种灌溉模式之间肥料氮素在土壤总残留量中蘖肥<sup>15</sup>N的贡献率差异显著( $P < 0.05$ ),稻作浅湿干灌溉模式下肥料氮素总残留量中蘖肥的贡献率为24.37%~25.28%,低于传统淹

水灌溉。

由图4d、4e可知,水炭运筹下仅蘖肥施用<sup>15</sup>N-尿素,水稻收获后浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下蘖肥<sup>15</sup>N在0~20 cm土层残留量为3.81~6.01 kg/hm<sup>2</sup>;20~40 cm土层残留量在2.57~2.64 kg/hm<sup>2</sup>范围内变化;40~60 cm土层残留量在0.92~1.16 kg/hm<sup>2</sup>范围内变化,施加一定量的生物炭增加了0~20 cm土层蘖肥<sup>15</sup>N的残留量,降低了20~60 cm土层蘖肥<sup>15</sup>N残留量。不同灌溉模式之间蘖肥<sup>15</sup>N在不同深度土壤中的残留量差异显著( $P < 0.05$ ),当生物炭施加量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,稻作浅湿干灌溉模式0~20 cm的蘖肥<sup>15</sup>N残留量在相同生物炭施用水平下较传统淹水灌溉增加35.07%、35.35%和39.62%,相同生物炭施用水平下40~60 cm土层的蘖肥<sup>15</sup>N残留量较传统淹水灌溉降低25.89%、30.48%和37.42%。当施加25 t/hm<sup>2</sup>生物炭时,稻作浅湿干灌溉模式蘖肥<sup>15</sup>N在0~20 cm土层的残留量较传统淹水灌溉降低7.06%,40~60 cm土层的蘖肥<sup>15</sup>N残留量较传统淹水灌溉降低34.13%。

### 2.4 水炭运筹下穗肥氮素在土壤中的残留

由图5a、5b可知,水炭运筹下两种灌溉模式之间穗肥<sup>15</sup>N在稻田土壤中的总残留量差异显著( $P < 0.05$ ),都随生物炭施加量的增加而减小,稻作浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下穗肥<sup>15</sup>N在稻田土壤各层的残留总量在3.82~8.47 kg/hm<sup>2</sup>范围内变化,相当于有11.58%~25.67%的穗肥氮素残留

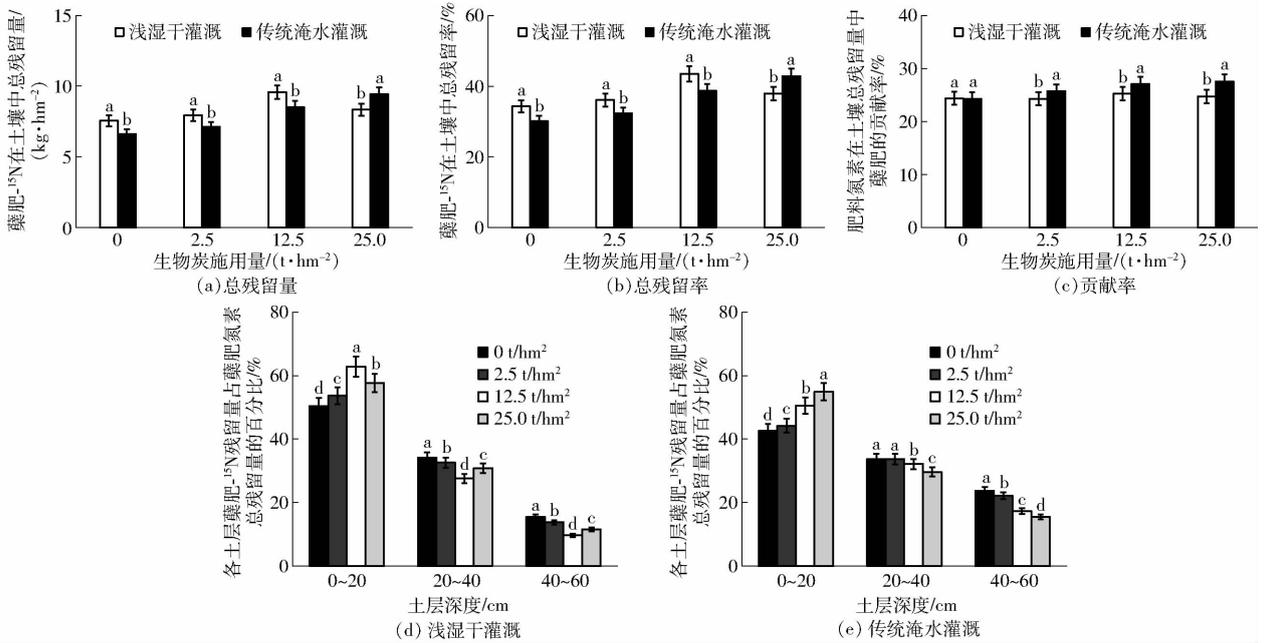


图4 不同处理稻田土壤中施用肥料<sup>15</sup>N的总残留量及残留率、肥料氮素残留中肥料<sup>15</sup>N的贡献率和各土层残留量占肥料<sup>15</sup>N总残留量的百分比

Fig. 4 Retention amount for tillering-<sup>15</sup>N and retention rate for tillering-<sup>15</sup>N in paddy soil, contribution rate of tillering in fertilizer nitrogen residue and percentage of residue of tillering-<sup>15</sup>N to total residue of fertilizer-<sup>15</sup>N under different treatments

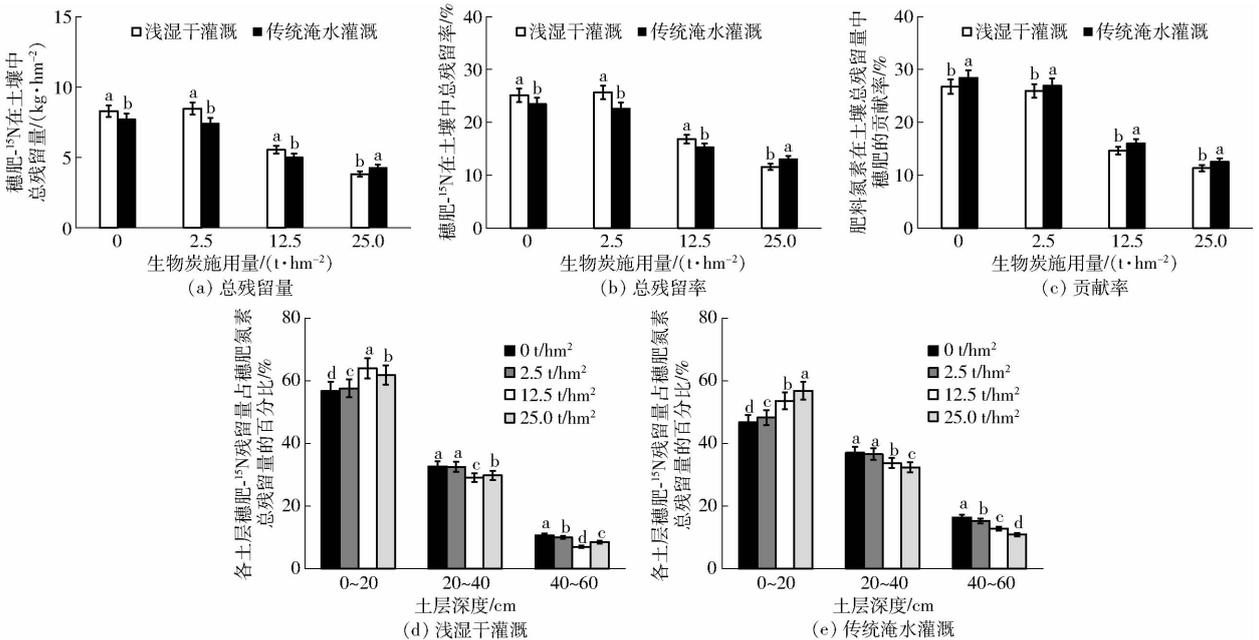


图5 不同处理稻田土壤中施用穗肥<sup>15</sup>N的总残留量及残留率、肥料氮素残留中穗肥的贡献率和各土层残留量占穗肥<sup>15</sup>N总残留量的百分比

Fig. 5 Retention amount for panicle-<sup>15</sup>N and retention rate for panicle-<sup>15</sup>N in paddy soil, contribution rate of panicle in fertilizer nitrogen residue and percentage of residue of panicle-<sup>15</sup>N to total residue of fertilizer-<sup>15</sup>N under different treatments

在土壤中。当生物炭施加量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,与传统淹水灌溉模式相比,稻作浅湿干灌溉模式相同生物炭施用水平下穗肥<sup>15</sup>N在土壤中的残留总量增加7.11%、13.69%和10.34%,稻田应用浅湿干灌溉模式能够提高穗肥<sup>15</sup>N在土壤中的残留量。当施加25 t/hm<sup>2</sup>生物炭时,稻作浅湿干灌溉模式的穗肥<sup>15</sup>N在土壤中的残留总量较传统淹水灌溉模式降低了

10.96%。对比两种灌溉模式下肥料氮素在土壤总残留量中穗肥<sup>15</sup>N的贡献率可知(图5c),两种灌溉模式之间肥料氮素在土壤总残留量中穗肥<sup>15</sup>N的贡献率差异显著,稻作浅湿干灌溉模式下肥料氮素总残留量中穗肥的贡献率为11.33%~26.76%,低于传统淹水灌溉。

由图5d、5e可知,水炭运筹下仅穗肥施用<sup>15</sup>N-尿

素,水稻收获后浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下穗肥<sup>-15</sup>N 在 0~20 cm 土层残留量为 2.36~4.87 kg/hm<sup>2</sup>; 20~40 cm 土层残留量在 1.14~2.75 kg/hm<sup>2</sup> 范围内变化; 40~60 cm 土层残留量在 0.32~0.88 kg/hm<sup>2</sup> 范围内变化, 施加一定量的生物炭降低了 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层穗肥<sup>-15</sup>N 的残留量。不同灌溉模式之间穗肥<sup>-15</sup>N 在不同深度土壤中的残留量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 当生物炭施加量在 0~12.5 t/hm<sup>2</sup> 时, 稻作浅湿干灌溉模式 0~20 cm 土层的穗肥<sup>-15</sup>N 残留量在相同生物炭施用水平下较传统淹水灌溉增加 30.28%、35.69% 和 31.86%, 相同生物炭施用水平下 40~60 cm 土层的穗肥<sup>-15</sup>N 残留量较传统淹水灌溉降低 30.32%、25.75% 和 39.50%。当施加 25 t/hm<sup>2</sup> 生物炭时, 稻作浅湿干灌溉模式穗肥<sup>-15</sup>N 在 0~20 cm 土层的残留量较传统淹水灌溉降低 3.10%, 40~60 cm 土层的穗肥<sup>-15</sup>N 残留量较传统淹水灌溉降低 30.78%。

### 2.5 水炭运筹下各阶段肥料氮素残留率相关性分析

统计分析结果表明 (表 3),  $R_{N(\text{total})}$  与  $R_{N(\text{b})}$  和  $R_{N(\text{t})}$  均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 且与  $R_{N(\text{b},0-20)}$ 、 $R_{N(\text{t},0-20)}$  和  $R_{N(\text{p},0-20)}$  呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),  $R_{N(\text{b})}$ 、 $R_{N(\text{t})}$  和  $R_{N(\text{p})}$  均与稻田表层土壤 (0~20 cm) 中肥料氮素的残留量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 40~60 cm 土层的肥料氮素残留量相关性不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.6 水炭运筹下各阶段肥料氮素的残留与损失

由图 6 可知, 水炭运筹下随着生物炭施用量增加, 两种灌溉模式的基肥、蘖肥和穗肥氮素残留与损失表现形式不同。稻作浅湿干灌溉模式下基肥氮素损失率在 38.20%~56.93% 范围内变化, 且随着生物炭施用量增加先减小后增加, 除施加 12.5 t/hm<sup>2</sup>

表 3 各期肥料氮素在稻田土壤中残留量的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of retention for <sup>15</sup>N

labeled fertilizer in different soil layers

	$R_{N(\text{total})}$	$R_{N(\text{b})}$	$R_{N(\text{t})}$	$R_{N(\text{p})}$
$R_{N(\text{b})}$	0.934 **			
$R_{N(\text{t})}$	0.920 **			
$R_{N(\text{p})}$	0.544			
$R_{N(\text{b},0-20)}$	0.963 *	0.983 **		
$R_{N(\text{b},20-40)}$	0.723	0.895 **		
$R_{N(\text{b},40-60)}$	0.038	0.244		
$R_{N(\text{t},0-20)}$	0.985 *		0.968 **	
$R_{N(\text{t},20-40)}$	0.615		0.683	
$R_{N(\text{t},40-60)}$	0.394		0.017	
$R_{N(\text{p},0-20)}$	0.897 *			0.925 **
$R_{N(\text{p},20-40)}$	0.707			0.586
$R_{N(\text{p},40-60)}$	0.207			0.182

注: \* 表示 0.05 水平显著, \*\* 表示 0.01 水平极显著。

$R_{N(\text{b},0-20)}$ 、 $R_{N(\text{t},0-20)}$ 、 $R_{N(\text{p},0-20)}$  分别表示基肥、蘖肥、穗肥氮素在 0~20 cm 土层的残留量;  $R_{N(\text{b},20-40)}$ 、 $R_{N(\text{t},20-40)}$ 、 $R_{N(\text{p},20-40)}$  分别表示基肥、蘖肥、穗肥氮素在 20~40 cm 土层的残留量;  $R_{N(\text{b},40-60)}$ 、 $R_{N(\text{t},40-60)}$ 、 $R_{N(\text{p},40-60)}$  分别表示基肥、蘖肥和穗肥氮素在 40~60 cm 土层的残留量。

生物炭外, 损失率均大于残留率 (图 6a); 而传统淹水灌溉模式不同生物炭施用水平下基肥氮素损失率均大于残留率, 损失率随着生物炭施用量增加而减小 (图 6b)。稻作浅湿干灌溉模式下蘖肥氮素损失率在 11.59%~29.59% 范围内变化, 且随着生物炭施用量增加先减小后增加, 蘖肥损失率在相同生物炭施用水平下均小于残留率 (图 6c); 而传统淹水灌溉模式蘖肥氮素的损失率随着生物炭施用量增加而减小, 当施加 0~2.5 t/hm<sup>2</sup> 生物炭时, 蘖肥氮素的损失率大于残留率, 而施加 12.5 t/hm<sup>2</sup> 以上生物炭时, 损失率小于残留率 (图 6d)。稻作浅湿干灌溉模式

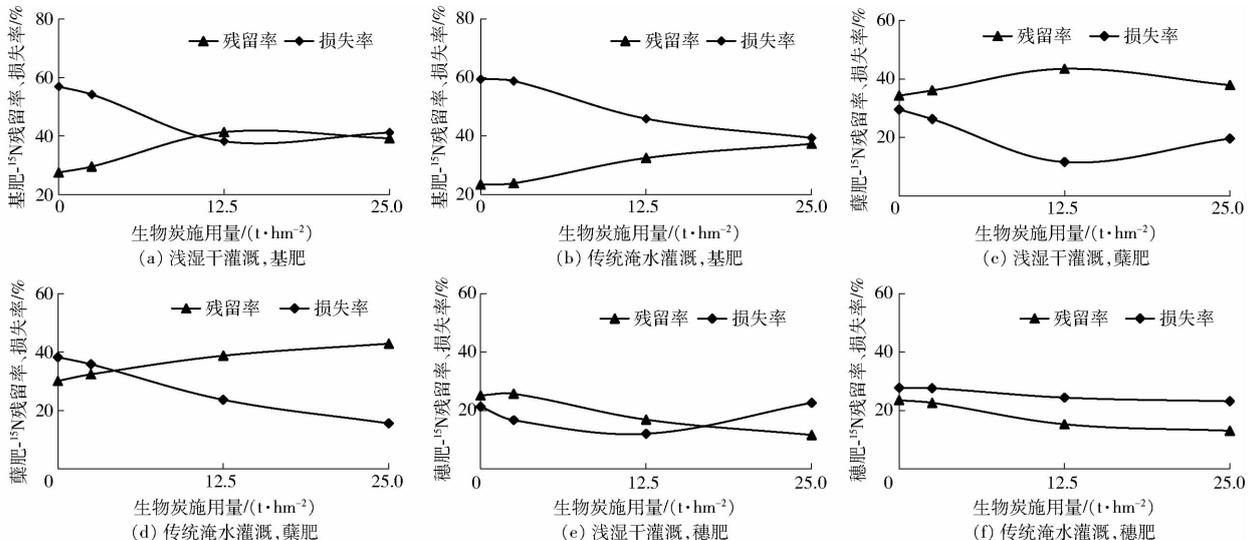


图 6 不同处理基肥、蘖肥和穗肥氮素残留率与损失率

Fig.6 Nitrogen residues and losses in basal, tillering and panicle fertilizers under different treatments

下穗肥氮素损失率在 12.00% ~ 22.61% 范围内变化,且随着生物炭施用量增加先减小后增加,除施加 25 t/hm<sup>2</sup> 生物炭外,藁肥损失率在相同生物炭施用水平下均小于残留率(图 6e);而传统淹水灌溉模式穗肥氮素的损失率随着生物炭施用量增加而减小,且在相同生物炭施用水平下穗肥氮素的损失率均大于残留率(图 6f)。

### 3 讨论

<sup>15</sup>N 同位素示踪法和差值法是研究肥料氮素在土壤中的残留情况最常用的两种方法。差值法的理论前提是化学肥料的施入不会改变植株从其他途径吸收氮素的量,但实际试验中会因为化学肥料的施入而增加植株从其他途径吸收的氮素<sup>[19]</sup>,导致差值法的试验结果偏差较大<sup>[12]</sup>。与差值法相比,<sup>15</sup>N 示踪法更适于研究肥料氮素在土壤中的残留情况<sup>[20]</sup>。本文主要从水炭运筹的角度来研究肥料氮素在稻田土壤中的残留状况,采用田间小区试验与微区结合的方法,应用<sup>15</sup>N 示踪技术,分别标记施用的基肥、藁肥和穗肥,以传统淹水灌溉作为对比,来定量研究水稻收获后各阶段施用肥料氮素在各层土壤中的残留情况。试验结果表明:稻作浅湿干灌溉模式不同生物炭施用水平下各期肥料氮素在土壤中的总残留量为 30.98 ~ 37.86 kg/hm<sup>2</sup>,且随着土层深度的增加肥料氮素的残留量逐渐减少,肥料氮素在土壤中的总残留率为 28.16% ~ 34.42%,试验结果与林晶晶<sup>[12]</sup>的试验结果相近。当生物炭施加量在 0 ~ 12.5 t/hm<sup>2</sup> 时,两种灌溉模式下施用的氮肥在稻田土壤中总残留量都随着生物炭施入量的增加而增大,主要是因为生物炭施入稻田土壤后能改善土壤通气状况,降低厌氧程度,从而抑制反硝化作用<sup>[21]</sup>,同时其表面官能团对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 产生吸附与持留作用,从而减少氮素的淋溶损失<sup>[22-25]</sup>。两种灌溉模式相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式各期肥料氮素在土壤中的残留总量较传统淹水灌溉增加了 13.73%、18.03% 和 20.50%,这可能是由于浅湿干灌溉模式下土壤通透性好,改善了稻田土壤微生物环境及酶活性,增强土壤固氮能力,从而增加了肥料氮素在稻田土壤中的残留量<sup>[26]</sup>。LIU 等<sup>[27]</sup> 研究表明,生物炭的施加能减少氮淋溶,但增加 NH<sub>3</sub> 挥发,施加量超过 40 t/hm<sup>2</sup> 将增加氮损失。因此,合理的水炭运筹能够有效减少土壤氮素损失,提高稻田土壤残留肥料氮素在后季水稻的理论可利用量<sup>[28]</sup>。

目前关于基肥、藁肥和穗肥氮素各自在土壤中的残留情况的研究较少,文献[13,29]研究黑土区节

水灌溉对各期肥料氮素在土壤中残留的影响,发现基肥和穗肥氮素在土壤中的残留率较低,而藁肥氮素的残留率较高。这与本试验研究结果不一致,这可能是由于其运筹模式和肥料分施比例(基肥、藁肥、穗肥为 4.5:2:3.5)都与本试验不同所导致的。本试验研究结果表明,浅湿干灌溉模式下基肥、藁肥、穗肥氮素在稻田土壤中的残留率分别为 27.53% ~ 41.35%、34.32% ~ 43.50% 和 11.58% ~ 25.67%,这是由于浅湿干灌溉模式水稻植株后期生长补偿对穗肥氮素的吸收利用情况优于基肥和藁肥<sup>[30]</sup>,且水稻从幼穗分化至抽穗期吸氮的高峰时段对穗肥氮素的吸收利用高于藁肥<sup>[8]</sup>,因此导致穗肥-<sup>15</sup>N 在稻田土壤中的残留率较低,而基肥和藁肥-<sup>15</sup>N 残留率较高。稻作水炭运筹下浅湿干灌溉模式不同阶段施用肥料氮素在稻田 0 ~ 20 cm 土层中的残留量显著高于传统淹水淹灌,而在 40 ~ 60 cm 土层中的残留量低于传统淹水淹灌,这与彭玉净等<sup>[15]</sup> 的研究结果一致。合理的水炭运筹模式能够增加耕层土壤(0 ~ 20 cm)肥料氮素残留量,这对补充寒地黑土区稻田土壤肥力、维持土壤氮库稳定有着重要的作用<sup>[13,29]</sup>,但若由于土壤肥料氮素残留过多而被土壤固定,就会形成大量酸盐沉积,造成土壤板结;同时肥料氮素在稻田土壤中的残留形态多以硝态氮为主,极易发生渗漏、淋溶等现象,增加了污染源地下水的风险<sup>[31]</sup>。综合来看,应提倡在减氮条件下,通过合理的水炭运筹模式来增加耕层土壤(0 ~ 20 cm)肥料氮素残留量。

本试验阐述了水炭运筹模式当地施氮水平下各期肥料氮素在稻田土壤中的残留情况,但由于气候条件、土壤类型及肥力等差异,使研究结果具有一定的局限性,同时未对低氮和高氮水平下各期肥料氮素在土壤中残留情况进行研究。因此,水炭运筹对各期肥料氮素在土壤中残留的影响还需要长期的试验研究。

### 4 结论

(1) 当生物炭施加量在 0 ~ 12.5 t/hm<sup>2</sup> 时,水稻收获后两种灌溉模式下施用的氮肥在土壤中总残留量均随生物炭施入量的增加而增大,且两种灌溉模式之间施用的氮肥在土壤中总残留量差异显著( $P < 0.05$ ),不同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式施用的氮肥在土壤中的总残留量在 30.98 ~ 37.86 kg/hm<sup>2</sup> 范围内变化,施用的肥料-<sup>15</sup>N 有 28.16% ~ 34.42% 残留在土壤中,在相同生物炭施用水平下较传统淹水灌溉增加了 13.73%、18.03% 和 20.50%;当施加生物炭的量在 25 t/hm<sup>2</sup> 时,传统

淹水灌溉模式施用的氮肥在土壤中总残留量高于浅湿干灌溉,但二者差异不显著( $P > 0.05$ )。

(2)不同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式基肥 $^{15}\text{N}$ 在稻田土壤中的残留率为27.53%~41.35%,蘖肥 $^{15}\text{N}$ 的残留率为34.32%~43.50%,穗肥 $^{15}\text{N}$ 的残留率为11.58%~25.67%。当生物炭施用量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,两种灌溉模式的基肥 $^{15}\text{N}$ 和蘖肥 $^{15}\text{N}$ 在土壤中的残留量均随生物炭施入量的增加而增大,而穗肥 $^{15}\text{N}$ 在土壤中的残留量随生物炭施入量的增加而减小,相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式基肥 $^{15}\text{N}$ 、蘖肥 $^{15}\text{N}$ 和穗肥 $^{15}\text{N}$ 在土壤中的残留量较传统淹水灌溉增加;施加25 t/hm<sup>2</sup>的生物炭对稻作浅湿干灌溉模式基肥 $^{15}\text{N}$ 、蘖肥 $^{15}\text{N}$ 和穗肥 $^{15}\text{N}$ 在土壤中的残留量产生负效应。

(3)对不同深度土壤中肥料 $^{15}\text{N}$ 的残留量分析可知,两种灌溉模式之间相同土层深度的肥料 $^{15}\text{N}$ 的残留量差异显著( $P < 0.05$ ),当生物炭施用量在0~12.5 t/hm<sup>2</sup>时,相同生物炭施用水平下稻作浅湿干灌溉模式各阶段肥料氮素在0~20 cm的残留量均高于传统淹水灌溉,与传统淹水灌溉相比,稻作浅

湿干灌溉模式降低了各阶段施加的肥料 $^{15}\text{N}$ 在40~60 cm土层的残留量。

(4)相关性分析结果表明,稻作浅湿干灌溉模式下各阶段氮肥的总残留量与基肥和蘖肥的总残留量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),同时还与基肥、蘖肥和穗肥氮素在0~20 cm土层的残留量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),基肥、蘖肥和穗肥氮素在土壤中的总残留量与0~20 cm土壤的残留量呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。

(5)水炭运筹下两种灌溉模式的基肥、蘖肥和穗肥氮素残留与损失表现形式不同,稻作浅湿干灌溉模式下基肥、蘖肥和穗肥氮素损失率随着生物炭施用量的增加先减小、后增加,而传统淹水灌溉模式不同生物炭施用水平下基肥、蘖肥和穗肥氮素损失率随着生物炭施用量的增加而减小。

(6)稻作浅湿干灌溉模式、施加12.5 t/hm<sup>2</sup>生物炭为最佳的水炭运筹模式,该模式能够增加耕层土壤(0~20 cm)肥料氮素残留量、抑制肥料氮素向深层土壤的运移、减少肥料氮素损失,兼顾经济成本,在实际应用时应采用耕作层分块还田模式。

#### 参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2017年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228\\_1585631.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228_1585631.html).
- [2] JU X, XING G, CHEN X, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Struct Multidiscip O-structural and Multidisciplinary*, 2009, 48:30-41.
- [3] 赵伟. 不同肥力土壤残留肥料氮去向及其机理的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [4] ZHAO Wei. Fate and mechanisms of residual fertilizer nitrogen in soils with different fertility[D]. Yangling: Northwest A&F University,2014. (in Chinese)
- [4] 陈淑峰,李帷,胡克林,等. 基于GIS的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(12):3541-3547.
- CHEN Shufeng, LI Wei, HU Kelin, et al. GIS-based analysis of spatio-temporal variability of groundwater nitrate concentration in high-yield region in north China plain[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(12):3541-3547. (in Chinese)
- [5] 彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等.  $^{15}\text{N}$ 交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留[J]. *生态学报*, 2011, 31(3):858-865.
- PENG Peiqin, QIU Shaojun, HOU Hongbo, et al. Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic  $^{15}\text{N}$  cross labeled fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3):858-865. (in Chinese)
- [6] 朱兆良, 张绍林, 尹斌, 等. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1):1-5.
- ZHU Zhaoliang, ZHANG Shaolin, YIN Bin, et al. Historical comparison on the response curves of rice yield nitrogen application rate in Tai lake region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16(1):1-5. (in Chinese)
- [7] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等.  $^{15}\text{N}$ 示踪分析节水灌溉下水稻对不同时期氮肥的吸收分配[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(6):309-317, 346.
- ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al.  $^{15}\text{N}$  tracer-based analysis of water and nitrogen management differences in uptake and partitioning of N applied at different growth stages in transplanted rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6):309-317,346. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180636&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180636&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.036. (in Chinese)
- [8] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(12):2221-2232.
- SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, LIU Shujin, et al. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12):2221-2232. (in Chinese)
- [9] 孙永健, 孙园园, 严奉君, 等. 氮肥后移对不同氮效率水稻花后碳氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(3):407-419.
- SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, YAN Fengjun, et al. Effects of postponing nitrogen topdressing on post-anthesis carbon and nitrogen metabolism in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(3):407-419. (in Chinese)
- [10] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(4):655-664.
- SUN Yongjian, SUN Yuanyuan, LI Xuyi, et al. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and

- distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(4):655-664. (in Chinese)
- [11] 邵东国, 李颖, 杨平富, 等. 水稻节水条件下氮素的利用及环境效应分析[J]. *水利学报*, 2015, 46(2):146-152. SHAO Dongguo, LI Ying, YANG Pingfu, et al. Analysis on nitrogen utilization and environmental effects under water-saving irrigation in paddy field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(2):146-152. (in Chinese)
- [12] 林晶晶. 水稻对基肥氮素的吸收利用差异及适宜比例的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014. LIN Jingjing. Studies on absorption and utilization and optimum proportion of nitrogen of basic, tillering and panicle fertilizer in rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [13] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. 黑土区节水灌溉对各期肥料氮素在土壤中残留的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11):240-250. ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. Effects of water-saving irrigation on residues of different period fertilizer nitrogen in black soils[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11):240-250. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181128&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181128&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.028. (in Chinese)
- [14] 李鹏飞, 李小坤, 侯文峰, 等. 应用<sup>15</sup>N示踪技术研究控释尿素在稻田中的去向及利用率[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20):3961-3971. LI Pengfei, LI Xiaokun, HOU Wenfeng, et al. Studying the fate and recovery efficiency of controlled release urea in paddy soil using <sup>15</sup>N tracer technique[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20):3961-3971. (in Chinese)
- [15] 彭玉净, 田玉华, 尹斌, 等. 太湖地区不同水稻品种对追肥期氮素利用率的比较研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(30):102-104, 118. PENG Yujing, TIAN Yuhua, YIN Bin, et al. Nitrogen fertilizer utilization of different rice genotypes in Taihu lake region[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2015, 43(30):102-104, 118. (in Chinese)
- [16] 吴永成, 王志敏, 周顺利. <sup>15</sup>N标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(12):2446-2453. WU Yongcheng, WANG Zhimin, ZHOU Shunli. Studies on the characteristics of nitrogen fertilizer utilization in summer maize based on techniques of soil column and <sup>15</sup>N-label[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(12):2446-2453. (in Chinese)
- [17] JIAO T, WU J, ZHAO S, et al. Distribution and utilization of nitrogen on moderately and heavily grazed temperate desert steppe using the <sup>15</sup>N tracing technique[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 124:69-74.
- [18] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8):35-39. PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8):35-39. (in Chinese)
- [19] 李建辉. 施氮对寒地水稻<sup>15</sup>N吸收、利用及氮代谢的影响[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2015. LI Jianhui. Effects of fertilizing nitrogen on <sup>15</sup>N absorption and utilization and nitrogen metabolism of rice in cold region[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [20] 杨宪龙, 同延安, 路永莉, 等. 农田氮肥利用率计算方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7):2203-2212. YANG Xianlong, TONG Yan'an, LU Yongli, et al. Research advances in the calculating method of nitrogen use efficiency in cultivated lands[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7):2203-2212. (in Chinese)
- [21] STEINER C, GLASER B, TEIXEIRA W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central amazonian ferralsol amended with compost and areola[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6):893-899.
- [22] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4):779-785. YUAN Jinhua, XU Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779-785. (in Chinese)
- [23] PRENDERGAST-MILLER M T, DUVAL M, SOHI S P. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):173-185.
- [24] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6):54-61. GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(6):54-61. (in Chinese)
- [25] ISAAC D T. Utilizing biochar to mitigate nitrate leaching and increase crop yield in South Central WA[C]//2015 AAAS Annual Meeting. AAAS, 2015.
- [26] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1):167-174. HU Jijie, ZHU Lianfeng, HU Zhihua, et al. Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(1):167-174. (in Chinese)
- [27] LIU Qi, LIU Benjuan, ZHANG Yanhui, et al. Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (NH<sub>3</sub> volatilization, N<sub>2</sub>O emissions, and N leaching) from croplands: options and mitigation strength in a global perspective[J]. *Global Change Biochar*, 2019, 3:58-62.
- [28] LEHMANN J, DA SILVA J P, STEINER C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2):343-357.
- [29] WANG Danying, XU Chunmei, YAN Jinxiang, et al. <sup>15</sup>N tracer-based analysis of genotypic differences in the uptake and partitioning of N applied at different growth stages in transplanted rice[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211:27-36.
- [30] 郝树荣, 郭相平, 张展羽. 水分胁迫及复水对水稻冠层结构的补偿效应[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3):52-55. HAO Shurong, GUO Xiangping, ZHANG Zhanyu. Compensation effects of water stress and rewatering on the structure of rice canopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3):52-55. (in Chinese)
- [31] 和玉璞, 张展羽, 徐俊增, 等. 控制地下水水位减少节水灌溉稻田氮素淋失[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23):121-127. HE Yupu, ZHANG Zhanyu, XU Junzeng, et al. Reducing nitrogen leaching losses from paddy field under water-saving irrigation by water table control[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(23):121-127. (in Chinese)