

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.034

水氮管理模式下水稻碳氮吸收、土壤呼吸与产量效应

郑恩楠^{1,2} 杨桦^{1,2} 陈鹏^{1,2} 张忠学^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 在大田试验下, 设置控制灌溉和全面淹灌 2 种水分管理模式, 并设置 6 个施氮水平 (0、60、85、110、135、160 kg/hm²), 研究不同水氮管理模式对水稻不同器官的碳、氮含量和土壤呼吸速率的影响, 同时测定不同处理的水稻产量。研究结果表明: 水稻不同器官的碳、氮含量和土壤呼吸速率在控制灌溉条件下均大于全面淹灌。不同器官含碳量变化相类似但不完全一致, 随着施氮量的增加, 各处理之间与对照相比, 升降幅度不显著 ($P > 0.05$)。随着施氮量的增加, 不同器官含氮量递增, 施氮量在 135、160 kg/hm² 处理与对照相比, 增加幅度较其他处理显著 ($P < 0.05$), 而同一处理随着生育期的进行, 含氮量呈下降趋势。但就不同器官碳氮比而言, 135、160 kg/hm² 处理明显小于其他处理 ($P < 0.05$)。综合说明氮肥的高投入并不利于水稻植株的碳氮积累代谢与分配。通过对不同处理土壤呼吸速率分析可知, 110 kg/hm² 处理在 2 种水分处理条件下的土壤呼吸速率均大于其他施氮量处理。在综合考虑产量的前提下, C110 处理为最佳的水肥耦合模式。该研究可为黑龙江冷凉区水稻节水增产、氮素减排提供技术依据。

关键词: 水稻; 水肥管理; 碳氮量; 土壤呼吸; 产量

中图分类号: S511; S154.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)06-0287-09

Effects of Carbon – Nitrogen Absorption, Soil Respiration and Yield of Rice under Water and Fertilizer Management Modes

ZHENG Ennan^{1,2} YANG Hua^{1,2} CHEN Peng^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: Under the field experiment, two kinds of water management models were set up for controlling irrigation and flooding irrigation, and six nitrogen fertilizer levels of 0 kg/hm², 60 kg/hm², 85 kg/hm², 110 kg/hm², 135 kg/hm² and 160 kg/hm² were set up to study the effects of different nitrogen fertilizer and water regulation on carbon and nitrogen content and soil respiration in rice, at the same time, the rice yield of different treatments was determined to provide the countermeasure for the water and fertilizer pattern in cool area. The results showed that the content of carbon and nitrogen in different organs of rice and the soil respiration with control irrigation were larger than those with flood irrigation. The change of carbon content in different organs was similar but inconsistent, compared with control, with the increase of nitrogenous fertilizer, the amplitude of fluctuation was not significant ($P > 0.05$). The results showed that with the increase of nitrogen fertilizer, the content of nitrogen were increased in different organs, that of the 135 kg/hm² and 160 kg/hm² treatments were significantly higher than that of other treatments ($P < 0.05$), while that of the same treatment was decreased with the growing period. However, in the case of C/N in different organs, that of the 135 kg/hm² and 160 kg/hm² treatments was significantly smaller than that of other treatment ($P < 0.05$). It was not conducive to the accumulation, metabolism and distribution of carbon and nitrogen in rice plants. According to the analysis of different soil respiration rates, the soil respiration rate of 110 kg/hm² treatment under two kinds of water treatment conditions was higher than that under other nitrogen fertilizer treatments. Under the precondition of considering yield synthetically, C110 treatment was the best coupling model of water and fertilizer, which should be paid attention to. The research result can provide scientific support for water saving and nitrogen reduction in the cold region of Heilongjiang Province.

Key words: rice; water and fertilizer management; carbon and nitrogen contents; soil respiration; yield

收稿日期: 2017-11-21 修回日期: 2017-12-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)和国家自然科学基金面上项目(51779046)

作者简介: 郑恩楠(1993—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: 1044459115@qq.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

0 引言

水稻作为我国的主要粮食作物,其种植和栽培技术已经达到国际领先水平^[1-4]。但随着水稻种植面积不断扩大,农业用水不断增加,到2030年水资源的开发利用将达到极限^[1,5-6]。化肥作为产量形成的主要因素,中国目前已经成为肥料使用量第一大国^[7-8]。但水肥资源投入量过高不仅不会增产,同时还会给环境带来巨大的风险,不合理的灌溉和施肥不仅浪费农业用水而且还会造成大面积农业面源污染,危害生态环境^[9-10]。因此,如何提高水肥资源的高效利用是当前我国农业发展的重要任务之一。

土壤呼吸作为土地生态系统的重要组成部分,在全球碳收支平衡中起着至关重要的作用^[11-12]。土壤呼吸主要包括土壤中的植物根系呼吸、土壤动物和微生物呼吸以及含碳矿物质的化学氧化作用产生释放CO₂的过程,其中最重要的组成部分为植物根系的自养呼吸和土壤动物以及微生物的异养呼吸^[13-15]。土壤呼吸不仅受到其自身的理化性质和土壤微生物影响,还受到人为因素的干扰,各因素之间相互作用相互制约^[16-17]。而水肥调控通过影响植物的生长和微生物的活性而对土壤呼吸过程产生重要的影响。

碳氮物质的形成、转运与分配与其在植株体内的代谢有直接的响应关系,碳氮代谢调节机制在植物体内相互偶联和互相制约,不仅碳代谢受氮素水平的调节,氮代谢途径相关酶与代谢产物同样受碳代谢相关产物的反馈制约^[18-19]。植物体内的碳氮比可以体现植物的营养利用效率,是植物生命过程的重要维持者和调节者,同时也是枯枝落叶分解速率的调节因素之一,因此对研究植物的生长和在精细农业领域中的应用都具有重要作用^[20]。

本文在前人研究的基础上,以东北冷凉区种植的水稻为研究对象,分析冷凉区不同水氮调控与水稻各器官碳氮含量之间的响应关系,同时研究大田不同水氮管理模式对水稻土壤呼吸速率的影响,探索水肥耦合机理,为水稻高产高效种植提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区(125°44'E,45°63'N)位于黑龙江省庆安县和平镇,属于典型的黑土分布区。多年平均气温2.5℃,多年平均降水量550 mm,多年平均水面蒸发量750 mm。作物水热生长期156~171 d,全年无霜

期128 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候。土壤类型为白浆土型水稻土,容重1.01 g/cm³,孔隙度61.8%。土壤基本理化性质:有机质质量比41.8 g/kg、pH值6.45、全氮质量比15.06 g/kg、全磷质量比15.23 g/kg、全钾质量比20.11 g/kg、碱解氮质量比198.29 mg/kg、有效磷质量比36.22 mg/kg和速效钾质量比112.06 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设计控制灌溉(C)、全面淹灌(F)2种水分管理模式(表1)。控制灌溉即除返青期田面保持0~30 mm薄水层和黄熟期自然落干外,其他各生育阶段灌水后均不建立水层,以根层土壤水分为控制指标,灌水上限为饱和含水率。用TPIME-PICO64/32型土壤水分测定仪每天(07:00和18:00各测1次)测取土壤含水率,当土壤含水率低于或接近灌水下限时,人工灌水至灌水上限,维持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。在分蘖末期进行晒田不进行灌水,分蘖前期、中期、拔节孕穗期、抽穗开花期以及乳熟期土壤含水率下限分别取饱和含水率的百分比。淹灌小区在每天08:00前后通过预埋在田面的砖块和竖尺读取水层深度,确定是否需要灌水。6个施氮水平,施氮量分别为0、60、85、110、135、160 kg/hm²。其中氮肥是折纯后的量,氮肥按照基肥:蘖肥:穗肥比例为5:3:2分施,各处理均施P₂O₅ 45 kg/hm²,K₂O 80 kg/hm²,磷肥作为基肥一次施用,钾肥分基肥和8.5叶龄(幼穗分化期)2次施用,前后比例为1:1。采用全面试验,分别是控制灌溉条件下的6个施氮水平(C0、C60、C85、C110、C135、C160)和全面淹灌下的6个施氮水平(F0、F60、F85、F110、F135、F160),共计12个处理,每个处理3次重复,随机区组排列,每个小区面积为10 m×10 m=100 m²,小区四周同样种植水稻以加设保护行。水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理条件相同。为减少侧向渗透对试验的影响,小区与小区之间采用隔渗处理,即小区四周用塑料板和水泥埂作为隔渗材料,埋入田间地表以下40 cm深。供试水稻品种为龙庆稻3号。

1.3 土壤呼吸速率测定

在水稻生长期,选择晴朗少云天气,用LI-8100型开路式土壤碳通量测量系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)进行田间土壤呼吸速率测定,于水稻返青期开始至乳熟期结束,每隔10 d左右测定1次,每次测定时间为北京时间11:00—14:00,该时间段土壤呼吸速率测量值与日平均值基本一致^[21]。采用轮回测量方法,每次测量顺序均与第1次测量

表 1 稻田生育期内各处理土壤水分管理方式

Tab.1 Water management of different irrigation management patterns in rice growth stages

处理	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	0 ~ 30 mm	85% θ_s	85% θ_s	晒田	85% θ_s	85% θ_s	85% θ_s	落干
全面淹灌	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 30 mm	晒田	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 30 mm	落干

注: θ_s 为饱和含水率, 取 53.25%。

顺序相同, 以避免由于测量时间差异而导致的试验结果误差。测定基座为内径 20 cm、高 10 cm 的聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride, PVC) 圈, PVC 圈嵌入土壤后露出土壤表面 2 cm。在每次测定的前 1 天, 去除基座内土壤表层的一切活体及掉落物, 在整个观测过程中 PVC 圈埋设位置保持不变。为了减少安置测定基座对土壤系统的破坏, 在测定基座安置 24 h 后进行第 1 次测定。5 cm 土壤温度采用土温计 (地温计, 河北省武强县华洋仪表厂) 测定。

1.4 碳、氮含量的测定

每试验田取 3 点, 分别选取具有代表性的 4 穴, 将植株叶、茎鞘、穗分开, 清洗干净, 于 120℃ 杀青 30 min, 80℃ 干燥至恒质量, 测定干物质质量后粉碎, 经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后, 用德国布朗卢比公司生产的 AA3 型 (Auto analytical 3) 连续流动分析仪测定

氮素含量。用总有机碳分析仪 (Elementar vario TOC) 测定水稻不同生育时期含碳量。

应用 SPSS 20.0 对数据进行整理, 使用 Origin 8.0 图表制图。并对数据进行 Duncan 显著性分析。

2 结果与分析

2.1 对水稻碳、氮含量的影响

2.1.1 各器官含碳量变化

以水稻典型生育期分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期为例, 研究不同水氮管理模式下水稻地上部分主要器官叶、茎鞘、穗含碳量。如图 1 所示, 不同水分处理之间, 3 个时期水稻叶片含碳量在分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期变化相类似但不完全一致。不同水分处理之间, 茎鞘含碳量变化在拔节孕穗期变化趋势有所不同, 抽穗开花期出现突跃的现

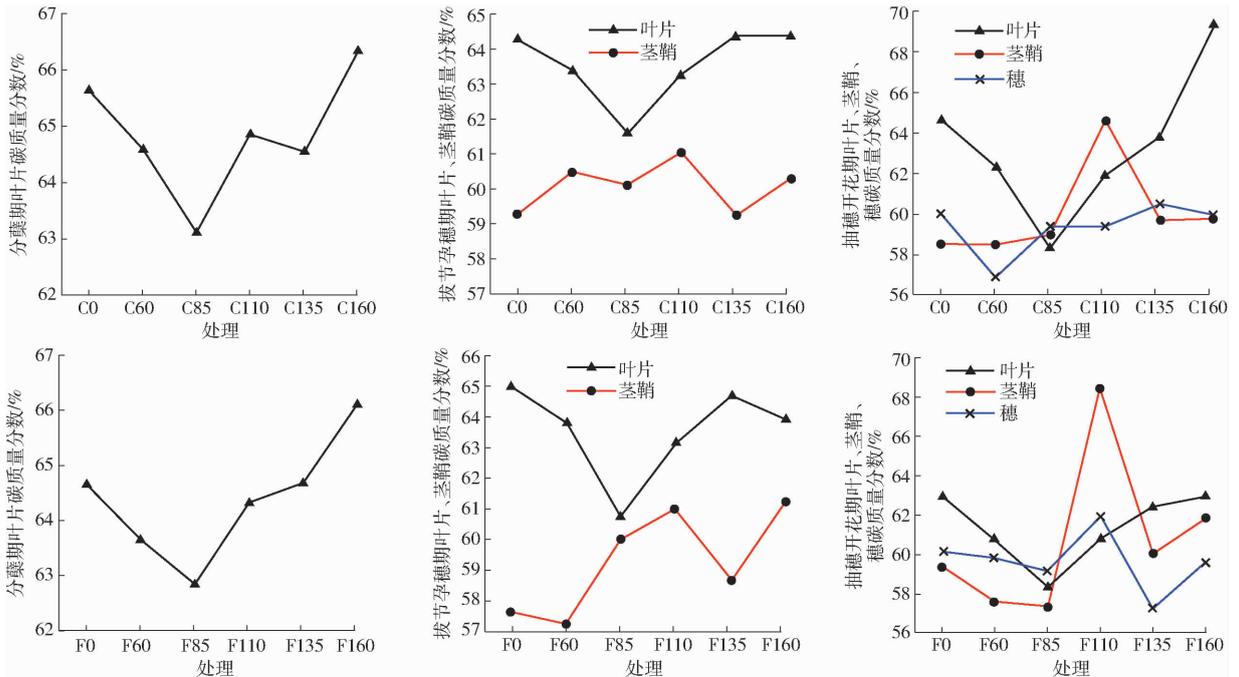


图 1 不同水肥条件下水稻各器官含碳量

Fig. 1 Carbon content of rice organs under different water and fertilizer conditions

象, 而穗部含碳量几乎没有变化 ($P > 0.05$)。

各时期 2 种水分处理随着施氮量的增加水稻叶片含碳量均表现出 V 字型变化规律。3 个时期相同水分不同施氮量之间对比显示, 叶片含碳量均在 60% 左右浮动, 且与对照 C0、F0 相比, 升降幅度在 5% 以内, 升降幅度不显著 ($P > 0.05$)。水分处理间

对比显示, 控制灌溉处理叶片含碳量均高于淹灌处理, 表明控制灌溉下有利于水稻对碳的积累。

拔节孕穗期茎鞘部含碳量 2 种水分处理之间变化趋势有所不同, 控制灌溉随着施氮量的增加呈波浪式变化, 且增加或下降幅度不显著 ($P > 0.05$)。而全面淹灌随着施氮量的增加总体呈上升趋势。抽

穗开花期 2 种水分处理之间,茎鞘部此时期与拔节孕穗期变化差异较大。施氮量 110 kg/hm² 处理下,在抽穗开花期 2 种水分处理之间,茎鞘部含碳量显著高于其他施氮量处理 ($P < 0.05$)。与 C0、C60、C85、C135、C160 相比,C110 茎鞘部含碳量分别增加了 10.39%、10.51%、9.50%、8.28%、8.07% (各处理 $P < 0.05$); 和 F0、F60、F85、F135、F160 相比,F110 茎鞘部含碳量分别增加了 15.20%、18.85%、19.31%、13.98%、10.60% (各处理 $P < 0.05$)。穗部含碳量在 2 种水分处理条件下都呈现波浪式变化,但变化规律不明显,与对照 C0、F0 相比,升降幅度在 2% 左右变化,变化不显著 ($P > 0.05$)。

2.1.2 各器官含氮量变化

同样以分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期为例,研究不同水氮管理模式水稻主要器官叶、茎鞘和穗含氮量。如图 2 所示,水稻叶、茎鞘含氮量随着生育期的推进,逐渐下降。随着施氮量的增加,各器官的含氮量呈增加趋势。相同施氮量不同水分处理间对比显示,控制灌溉大于全面淹灌。

3 个时期 2 种水分处理水稻叶片含氮量随着施氮量的增加为线性变化。不同施氮量之间,3 个时期线性拟合决定系数 R^2 控制灌溉分别为 0.7932、0.8868、0.9604; 全面淹灌分别为 0.8744、0.9683、0.9530,在抽穗开花期控制灌溉大于全面淹灌,表明控制灌溉更有利于水稻营养生殖阶段对氮素的吸

收利用与分配。在抽穗开花期与对照 C0、F0 相比,控制灌溉其他施氮量处理叶片含碳量分别增加了 16.61%、19.93%、36.57%、43.52%、47.50% (各处理 $P < 0.05$), 全面淹灌分别增加了 11.14%、15.54%、34.45%、36.82%、42.56% (各处理 $P < 0.05$)。相同施氮量条件下,控制灌溉的增长幅度大于全面淹灌,表明控制灌溉条件下配施氮肥更有利于水稻对氮素的吸收利用。

3 个时期 2 种水分处理水稻茎鞘、穗含氮量的变化趋势和叶片的变化趋势相一致,但显著低于叶片含氮量 ($P < 0.05$), 穗部含氮量最低。施肥处理间对比显示,2 种水分条件下与对照 C0、F0 相比,拔节孕穗期茎鞘含氮量 135、160 kg/hm² 处理增加显著 ($P < 0.05$)。在抽穗开花期,控制灌溉各施氮量之间茎鞘含氮量无明显差异,而全面淹灌在 135、160 kg/hm² 处理相比于对照 F0 显著增加 ($P < 0.05$)。而穗部除施氮量 60 kg/hm² 处理外,其他处理与对照 C0、F0 比,均显著增加 ($P < 0.05$)。水分处理之间对比显示,茎鞘含氮量控制灌溉比全面淹灌在拔节孕穗期和抽穗开花期分别增加了 6.40% ~ 25.99% ($P < 0.05$) 和 5.82% ~ 45.62% ($P < 0.05$), 而穗部含氮量增加了 2.52% ~ 13.14%。

2.2 对水稻碳氮比的影响

氮碳含量是植被生长状态的重要指标,能为病虫害监测等提供指导信息。植物碳氮比可以体现植

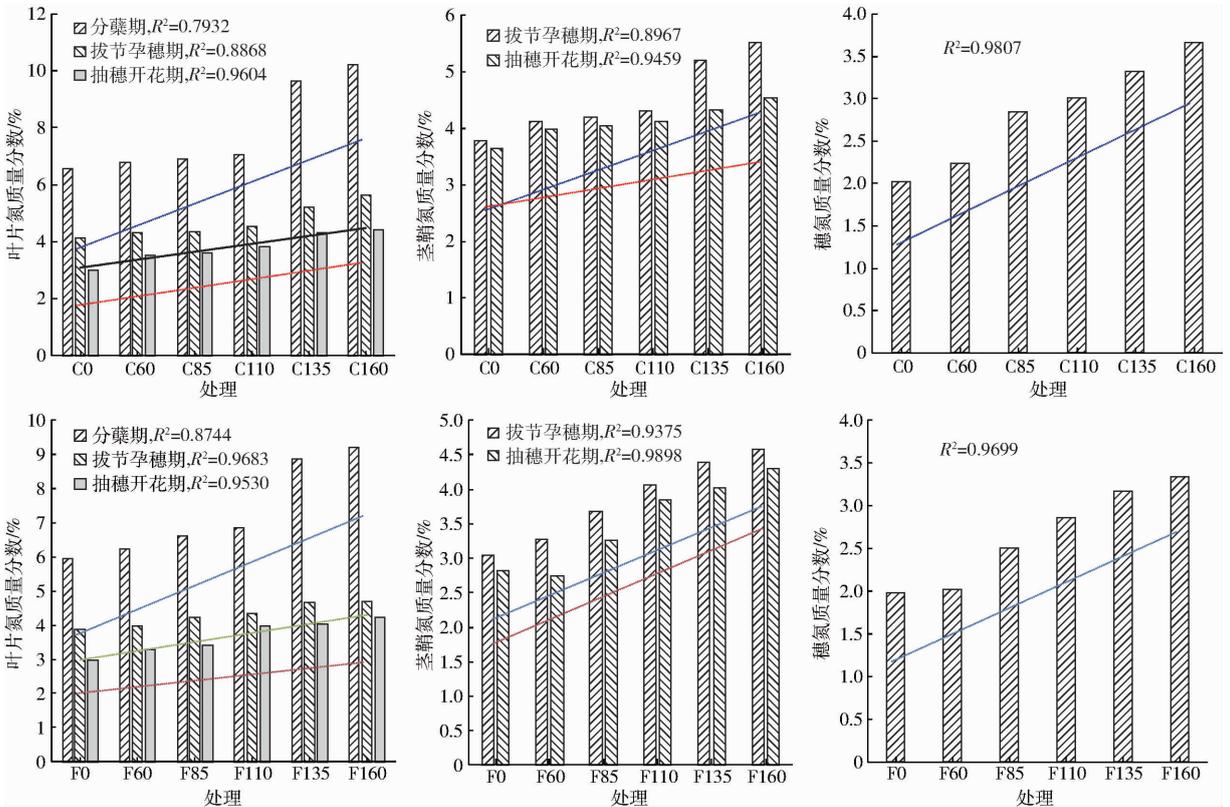


图 2 不同水肥条件下水稻各器官含氮量

Fig. 2 Nitrogen content of rice organs under different water and fertilizer conditions

物的营养利用效率,是生态系统的一个重要基础数据。如表2所示,不同水氮管理模式下水稻叶片、茎鞘碳氮比随着生育期的进行逐渐升高,这与含氮量的变化趋势相反。不同水分管理对比显示,全面淹灌水稻各器官的碳氮比在整体水平上要大于控制灌溉。从增长的幅度上分析,不同时期叶片碳氮比全面淹灌较控制灌溉增幅不显著($P > 0.05$),而茎鞘、穗不同时期碳氮比全面淹灌较控制灌溉除135 kg/hm²处理外,其他处理增幅显著($P < 0.05$)。全面淹灌水稻碳氮比大于控制灌溉的原因可能是由于不同时期各器官的含氮量控制灌溉大于全面淹灌,而含碳量2种水分处理之间相差幅度较小,可能导致碳氮

比全面淹灌大于控制灌溉。不同施氮量之间对比显示,随着施氮量的增加,碳氮比有所下降。控制灌溉条件下,与对照C0相比,施氮量在60、85、110 kg/hm²处理下叶、茎鞘下降不显著($P > 0.05$),而135、160 kg/hm²处理大幅度下降($P < 0.05$)。全面淹灌在施氮量60 kg/hm²处理下,不同器官碳氮比除抽穗开花期叶片外,其他器官较对照F0均小幅下降($P > 0.05$),而85、110、135、160 kg/hm²处理各器官碳氮比较对照F0下降幅度较大。施氮量135、160 kg/hm²处理在2种水分条件下均大幅度下降,表明2种施氮量处理水稻植株对营养的利用率较其他处理低,此施氮量超过了施氮量的最佳值。

表2 不同处理水稻各器官碳氮比

Tab.2 C/N of rice organ under different treatments

氮肥/ (kg·hm ⁻²)	控制灌溉						全面淹灌					
	分蘖 期叶片	拔节孕 穗期叶片	抽穗开 花期叶片	拔节孕 穗期茎鞘	抽穗开 花期茎鞘	穗	分蘖 期叶片	拔节孕 穗期叶片	抽穗开 花期叶片	拔节孕 穗期茎鞘	抽穗开 花期茎鞘	穗
0	10.0 ^a	15.6 ^a	18.4 ^a	15.6 ^a	16.1 ^a	29.5 ^a	10.8 ^a	16.7 ^a	21.2 ^a	18.9 ^a	21.1 ^a	30.3 ^a
60	9.5 ^a	14.7 ^a	17.7 ^b	14.7 ^a	14.6 ^{ab}	25.4 ^b	10.2 ^a	16.1 ^a	18.5 ^b	17.5 ^a	21.0 ^a	29.6 ^a
85	9.1 ^a	14.1 ^a	16.1 ^{bc}	14.3 ^a	14.6 ^b	20.9 ^c	9.5 ^{ab}	14.4 ^b	17.1 ^{bc}	16.3 ^b	17.6 ^b	23.5 ^b
110	9.2 ^a	14.0 ^a	16.2 ^{bc}	14.2 ^b	15.6 ^a	19.8 ^c	9.4 ^{ab}	14.5 ^b	15.2 ^c	15.1 ^c	17.7 ^b	21.6 ^b
135	6.7 ^b	12.3 ^b	14.7 ^d	11.4 ^b	13.7 ^c	18.2 ^d	7.2 ^c	13.8 ^b	15.4 ^c	13.4 ^d	14.9 ^c	18.2 ^c
160	6.5 ^b	11.4 ^b	15.6 ^c	10.9 ^b	13.1 ^c	16.3 ^c	7.2 ^c	13.6 ^{bc}	14.9 ^c	13.4 ^d	14.4 ^c	17.8 ^c

注:同列不同小写字母表示在 $P = 0.05$ 水平上显著。

2.3 对稻田土壤呼吸速率的影响

不同水氮管理模式能够影响稻田土壤呼吸速率。在水稻整个生育时期内,各处理土壤呼吸呈现先增加后降低的变化趋势。在返青期由于温度较低,水稻根系不发达,土壤微生物活动较慢,导致此时期的土壤呼吸速率最低。随着天气的变暖,水稻返青期结束,土壤呼吸速率迅速提高,在拔节孕穗期达到峰值,之后开始下降。如图3所示,控制灌溉水稻土壤呼吸速率除返青期外,其他时期均大于全面淹灌处理。控制灌溉整个生长期田间不建立水层,土壤含水率处于非饱和状态,而全面淹灌由于有水层的存在,土壤含水率长期处于饱和状态,导致土壤5 cm的地温控制灌溉大于全面淹灌。杨士红等^[22]研究表明,土壤呼吸速率与土壤5 cm温度有较好的指数关系,与本研究的结果相类似。随着施氮量的增加,土壤呼吸速率并没有一直呈上升趋势而是略有下降。由于施氮量的过饱和不但抑制了水稻的生长,同时也会降低土壤有机质、微生动物植物的含量,阻碍了土壤呼吸的源,导致土壤呼吸速率的降低。相同施氮量处理之间,和全面淹灌相比,控制灌溉整个生育期6个施氮水平土壤呼吸速率处理分别增加了46.64%、67.48%、41.17%、41.59%、48.09%、83.70%(各处理 $P < 0.05$)。相同水分处理之间,与

对照C0、F0相比,C60、C85、C110、C135、C160整个生育期土壤呼吸速率分别增加了35.76%、45.54%、101.17%、63.86%、51.42%,F60、F85、F110、F135、F160分别增加了18.87%、51.17%、108.34%、62.25%、20.87%(各处理 $P < 0.05$)。施氮量110 kg/hm²处理增幅最大,表明此处理对于改善土壤呼吸较其他处理具有良好的效果。

2.4 对水稻产量的影响

如图4所示,对水稻产量进行分析,不同水氮管理模式对水稻产量的影响显著。2种水分条件下产量的变化过程基本相同,水稻产量均随着施氮量的增加先上升后小幅度下降。从不同氮肥处理对产量的影响来看,C0、C60、C85、C110、C135、C160产量分别为4 699.7、5 086.6、7 995.7、10 964.3、9 647.0、9 281.9 kg/hm²;F0、F60、F85、F110、F135、F160产量分别为5 600.4、6 739.1、7 022.6、8 170.7、9 123.2、7 389.6 kg/hm²,各处理除全面淹灌F0、F60高于控制灌溉C0、C60,其他各处理均显著低于控制灌溉($P < 0.05$)。综合来看,C110处理为最佳水氮管理模式。对不同水氮之间进行线性拟合,控制灌溉的决定系数 R^2 为0.8442,大于全面淹灌的0.7982,更进一步说明控制灌溉条件下的水氮管理模式对水稻产量的促进作用大于全面淹灌的水氮管理模式。因

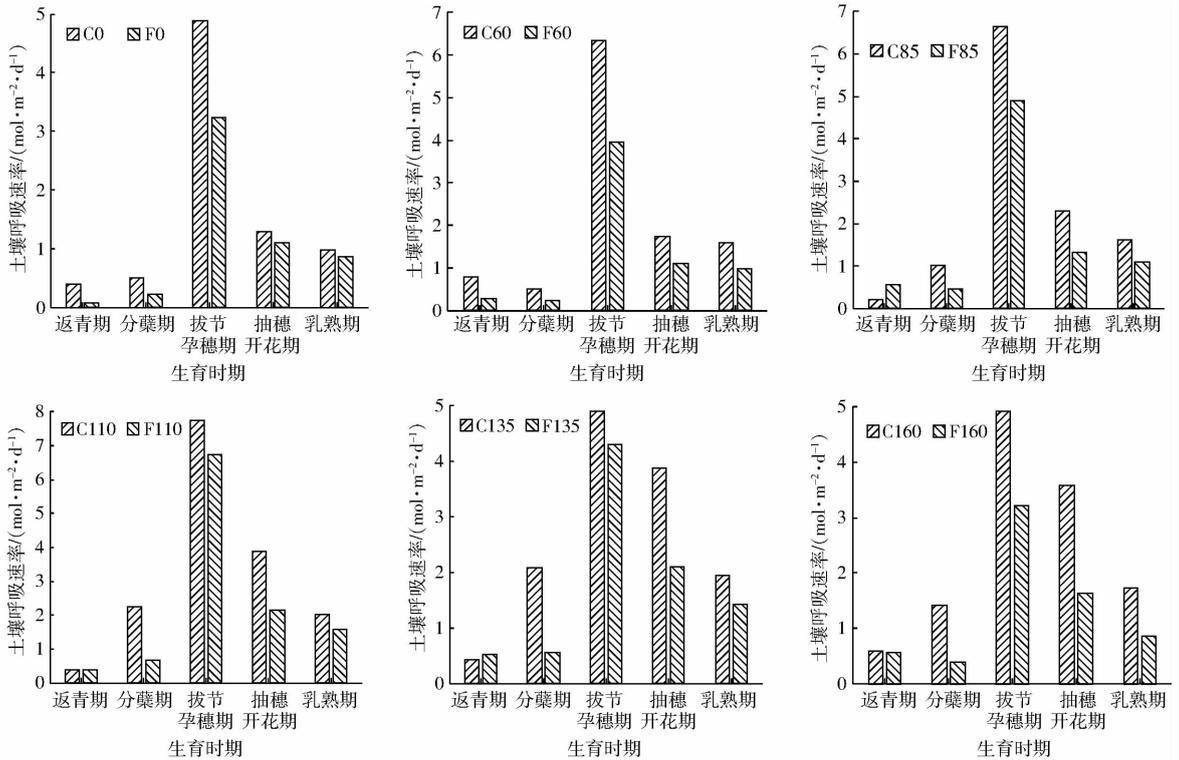


图3 不同水肥条件下稻田土壤呼吸速率

Fig. 3 Soil respiration rate of paddy under different water and fertilizer conditions

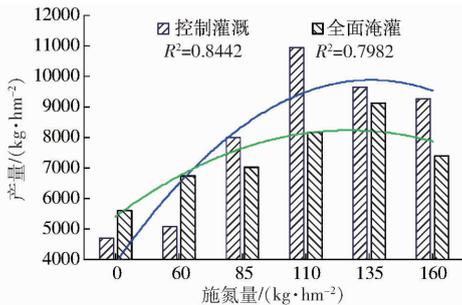


图4 不同水肥条件下水稻产量

Fig. 4 Yield of rice under different water and fertilizer conditions

此,建议在以后的水稻种植过程当中要提倡节水灌溉,以节水为前提,继续挖掘稻田水氮耦合模式的潜力。

3 讨论

3.1 对水稻碳、氮含量的影响

水肥作为水稻生长的主要限制因子,适宜的水肥管理模式不仅可以提高水稻的产量和水肥利用效率,同时也能够调节植物体内主要元素含量的变化。碳、氮代谢是作物正常生长发育最基本的代谢途径,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。植株体内碳、氮含量同时也是反映植株碳氮代谢状况的重要指标。本试验通过对不同水氮管理模式水稻不同器官碳、氮含量的分析和水分管理之间的对比可知,不同器官的碳、氮含量控制灌溉要高

于全面淹灌。因为适度的水分亏缺有利于水稻根系的生长,植物地下部根系与地上部植株是根系信号系统的载体与桥梁,根系产生根源信号可直接传输到地上部分对植株发生调控作用,进而调节碳氮在植株体内的代谢与积累^[23]。不同施氮量处理之间对比显示,3个生育期除茎鞘110 kg/hm²处理外,其他各器官含碳量与对照相比,并无显著变化($P > 0.05$),表明氮肥的增加对碳的代谢并没有显著影响,氮肥并不是影响水稻植株不同器官含碳量的主要因素。而水稻不同器官含氮量随着施氮量的增加而显著增加($P < 0.05$),但135、160 kg/hm²处理,在生长后期由于氮肥的过量,出现“贪青”现象,抽穗较其他施氮量处理晚,生育期推迟,进而影响水稻的产量,说明肥量的高投入并没有带来高回报。

3.2 对水稻碳氮比及土壤呼吸速率的影响

试验研究发现不同施氮量下全面淹灌水稻碳氮比大于控制灌溉,原因可能是由于不同时期各器官的含氮量控制灌溉显著大于全面淹灌,而含碳量2种水分处理之间相差幅度较小,导致碳氮比全面淹灌大于控制灌溉。不同施氮量条件下,水稻植株体内相同器官含碳量差异不明显($P > 0.05$),而含氮量随着供氮水平的提高而呈现出逐渐增加的趋势,由此导致相同器官碳氮比表现出随着氮素供应水平的提高而逐渐降低的趋势,这与文献[24-29]的研究结果一致。在水稻的3个生育时期内,不同器官

的含碳量变化差异相比于含氮量较小,植株体内不同器官含氮量在整个生育时期内呈现明显的下降趋势,因此使得不同器官碳氮比随生育进程的推进呈现逐渐增大的趋势,研究结果与文献[30]一致。不同水氮管理模式能显著影响土壤呼吸速率。杨士红等^[22]研究得出,控制灌溉条件下土壤呼吸速率大于全面淹灌,与本试验研究结果一致。李建敏等^[31]、DING等^[32]研究表明,施氮处理显著高于不施氮处理,张耀鸿等^[33]研究了氮肥施用对玉米根际呼吸和土壤基础呼吸温度敏感性的影响,发现施氮处理(300 kg/hm²)的季节平均土壤呼吸速率为3.14 μmol/(m²·s),显著高于不施氮处理,增幅达31.9%,与本试验研究相类似但又不完全一致。在本试验条件下,随着施氮水平的提高,水稻的土壤呼吸速率先增加后下降,其原因可解释为由于施氮量的过饱和不但抑制了水稻的生长,同时也会降低土壤有机质、微生物植物的含量,阻碍了土壤呼吸的源,导致土壤呼吸速率的降低,而适量的氮肥施加提高了土壤中氮的有效性,促进了作物根系生长,根系呼吸得到加强,同时适量的施氮还促进了作物地下部根茬及其分泌物增多,使微生物活性和数量增加,微生物呼吸也随之增加,土壤呼吸作用增强,同时促进了土壤与大气之间的气体交换^[34-37]。不同施氮量对土壤呼吸速率和碳氮比影响不一致。随着施肥量的增加,稻田的土壤呼吸速率和植株的长势相类似,但含碳量变化不显著,含氮量却是逐渐增加,因此碳氮比逐渐下降。导致施肥处理对二者的影响不一致。

3.3 对产量的影响

如图4所示,全面淹灌F0、F60处理水稻产量高于C0、C60处理,说明在肥量较低的情况,较少水分的输入对水稻将会产生抑制作用。除F0、F60处理外,其他各处理均显著低于控制灌溉(各处理 $P < 0.05$),表明在肥力相对较高的情况下适量的水分亏缺将产生促进作用,控制灌溉有利于氮素养分往

穗部的运移,从而提高了产量。综合比较C110处理的水稻产量最大。基于上述对水稻碳氮含量、碳氮比以及土壤呼吸速率的分析可知,含碳量各施肥之间变化不显著,而氮含量与施氮量之间为线性关系,且135、160 kg/hm²处理明显较大。但由于135、160 kg/hm²处理的含氮量显著高于其他处理,导致碳氮比显著下降($P < 0.05$),严重影响了水稻植株的碳、氮代谢进而影响了作物光合产物的形成、转化以及矿物质元素的吸收,又因为氮肥的过量导致水稻贪青,抽穗比其他施氮肥处理较晚,不利于水稻籽粒对营养的吸收,进而影响水稻的产量。同时C110处理下的土壤呼吸速率也显著高于其他处理,也说明了改善土壤呼吸速率对水稻产量的形成具有一定的积极作用。

4 结论

(1)随着施氮量的增加,水稻各器官含碳量无显著差异。而不同器官的含氮量随着氮肥的增加逐渐增加。水分处理之间对比显示,各器官碳氮量控制灌溉大于全面灌溉。

(2)水稻碳氮比结果显示,水稻叶片碳氮比在施氮量135、160 kg/hm²显著低于对照($P < 0.05$)。说明氮肥量的高投入并不利于水稻碳氮代谢,不利于水稻的生长。

(3)不同水氮管理模式下水稻呼吸速率在整个生育期先增加后下降,在拔节孕穗期达到土壤呼吸速率的最大值。控制灌溉处理土壤呼吸速率要大于全面淹灌($P < 0.05$),不同施氮量条件下土壤呼吸速率显著高于对照($P < 0.05$),施氮量110 kg/hm²处理增加幅度最显著。

(4)适量的水分亏缺对水稻产量的形成有促进作用,控制灌溉不同水氮之间的拟合较好,决定系数 R^2 为0.8442,大于全面淹灌。总体来看,处理C110产量为10964.3 kg/hm²,显著大于其他处理($P < 0.05$),为最佳的水肥管理模式。

参 考 文 献

- 徐国伟,王贺正,翟志华,等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报,2015, 31(10):132-141.
XU Guowei, WANG Hezheng, ZHAI Zhihua, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. Transactions of the CSAE,2015, 31(10): 132-141. (in Chinese)
- FAGERIA N K, MOREIRA A. Chapter four-the role of mineral nutrition on root growth of crop plants[J]. Advances in Agronomy, 2011, 110: 251-331.
- PENG Shaobing, TANG Qiyuan, ZOU Yingbin. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3-8.
- Food and agriculture organization of the United Nations. FAOSTAT[EB/OL]. [2017-11-21]. <http://www.fao.org/>,2013.
- 姚锋先. 不同水氮管理对水稻生长和水氮效率影响的生理机制研究[D]. 武汉:华中农业大学,2011.
YAO Fengxian. Studies on physiological mechanism of rice growth and water and nitrogen use efficiency under different water and

- nitrogen regimes[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 6 康绍忠. 崭新的农业科技革命与21世纪我国节水农业的发展[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 11-17.
KANG Shaozhong. New agricultural sci-technological revolution and development of Chinese water-saving agriculture in 21st century [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(1): 11-17. (in Chinese)
- 7 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2017-11-21]. <http://data.stats.gov.cn/search/keywordlist2keyword=化肥>, 2013.
- 8 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2017-11-21]. <http://data.stats.gov.cn/search/keywordlist2keyword=氮肥>, 2013.
- 9 张忠学, 郑恩楠, 王长明, 等. 不同水氮处理对水稻荧光参数和光合特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 176-183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170623&flag=1. DIO: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.023.
ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, WANG Changming, et al. Effect of different water and nitrogen levels on chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic characteristics of rice [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 176-183. (in Chinese)
- 10 ZHENG Ennan, ZHANG Zhongxue, WANG Changming, et al. Influence of water-saving irrigation and nitrogenous fertilizer application on assessment of the rice quality[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2017, 19(5): 1213-1219.
- 11 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 18-24.
LI Yinkun, CHEN Minpeng, XIA Xu, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1): 18-24. (in Chinese)
- 12 YU S, CHEN Y, ZHAO J, et al. Temperature sensitivity of total soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components in six vegetation types of subtropical China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 160-167
- 13 WANG X H, PIAO S L, CIAIS P, et al. Are ecological gradients in seasonal Q10 of soil respiration explained by climate or by vegetation seasonality [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42: 1728-1734.
- 14 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785.
ZHANG Dongqiu, SHI Peili, ZHANG Xianzhou. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. Advance in Earth Science, 2005, 20(7): 778-785. (in Chinese)
- 15 LI X D, FU H, GUO D, et al. Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a setaria italica (L.) beav. cropland on the loess plateau, northern China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42: 337-346.
- 16 HAN G X, ZHOU G S, XU Z Z, et al. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39: 418-425.
- 17 CHEN B Y, LIU S R, GE J P, et al. Annual and seasonal variations of Q10 soil respiration in the sub-alpine forests of the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42: 1735-1742.
- 18 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 efficiency [J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(3): 407-419. (in Chinese)
- 19 KRAPP A, SALIBA-COLOMBANI V, DANIEL-VEDELE F. Analysis of C and N metabolisms and of C/N interactions using quantitative genetics [J]. Photosynthesis Research, 2005, 83: 251-263
- 20 施润和, 牛铮, 庄大方. 利用高光谱数据估测植物叶片碳氮比的可行性研究 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(2): 76-80.
SHI Runhe, NIU Zheng, ZHUANG Dafang. Feasibility of estimating leaf C/N ratio with hyperspectral remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(2): 76-80. (in Chinese)
- 21 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献 [J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4273-4280.
CAI Yan, DING Weixin, CAI Zucong. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4273-4280. (in Chinese)
- 22 杨士红, 王乙江, 徐俊增, 等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 140-146.
YANG Shihong, WANG Yijiang, XU Junzeng, et al. Changes of soil respiration of paddy fields with water-saving irrigation and its influencing factors analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 140-146. (in Chinese)
- 23 汪可欣, 付强, 姜辛, 等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 181-186. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141227&journal_id=jcsam. DIO: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.027.
WANG Kexin, FU Qiang, JIANG Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 181-186. (in Chinese)
- 24 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 等. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 630-637.
LÜ Lihua, TAO Hongbin, WANG Pu, et al. The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 630-637. (in Chinese)

- 25 申丽霞,王璞,兰林旺,等.施氮对夏玉米碳氮代谢及穗粒形成的影响[J].植物营养与肥科学报,2007,13(6):1074-1079. SHEN Lixia, WANG Pu, LAN Linwang, et al. Effect of nitrogen supply on carbon-nitrogen metabolism and kernel set in summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1074-1079. (in Chinese)
- 26 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)
- 27 阮新民,施伏芝,罗志祥.施氮对高产杂交水稻生育后期叶碳氮比与氮素吸收利用的影响[J].中国土壤与肥料,2011(2):35-38. YUAN Xinmin, SHI Fuzhi, LUO Zhixiang. Effects of nitrogen application on the leaf of C/N and nitrogen uptake and utilization at later developmental stages in different high yield hybrid rice varieties [J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2011(2): 35-38. (in Chinese)
- 28 韩锦峰,史宏志,官春云,等.不同施氮水平和氮素来源烟叶碳氮比及其与碳氮代谢的关系[J].中国烟草学报,1996,2(1):19-25. HAN Jinfeng, SHI Hongzhi, GUAN Chunyun, et al. C/N of tobacco leaf and its relations with carbon and nitrogen metabolism as related to nitrogen level and source [J]. Acta Tabacaria Sinica, 1996, 2(1): 19-25. (in Chinese)
- 29 史宏志,韩锦峰,刘国顺,等.烤烟碳氮代谢与烟叶香味关系的研究[J].中国烟草学报,1998,4(2):56-63. SHI Hongzhi, HAN Jinfeng, LIU Guoshun, et al. Studies on the relations of carbon and nitrogen metabolism to leaf flavor quality in flue-cured tobacco [J]. Acta Tabacaria Sinica, 1998, 4(2): 56-63. (in Chinese)
- 30 王迎男.不同氮素供应水平对马铃薯植株碳氮比及块茎形成的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017. WANG Yingnan. Influence of different nitrogen supplying levels on the C/N and tuber formation in potato plants [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 31 李建敏,丁维新,蔡祖聪.氮肥对玉米生长季土壤呼吸的影响[J].应用生态学报,2010,21(8):2025-2030. LI Jianmin, DING Weixin, CAI Zucong. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration during maize growth season [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 2025-2030. (in Chinese)
- 32 DING W X, MENG L, YIN Y F. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39: 669-679.
- 33 张耀鸿,朱红霞,李映雪,等.氮肥施用对玉米根际呼吸温度敏感性的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2033-2039. ZHANG Yaohong, ZHU Hongxia, LI Yingxue, et al. Effects of nitrogen fertilization on temperature sensitivity of rhizosphere respiration during maize growing stages [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10): 2033-2039. (in Chinese)
- 34 XU W H, WAN S Q. Water-and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40: 679-687.
- 35 MORELL F J, ÁLVARO F J, LAMPURLANES J, et al. Soil CO₂ fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: effects of tillage systems and nitrogen fertilization [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 139(1-2): 167-173.
- 36 张芳,郭胜利,邹俊亮,等.长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响[J].环境科学,2011,32(11):3174-3180. ZHANG Fang, GUO Shengli, ZOU Junliang, et al. Effects of nitrogen fertilization, soil moisture and soil temperature on soil respiration during summer fallow season [J]. Environment Science, 2011, 32(11): 3174-3180. (in Chinese)
- 37 JOHNSON D, GEISINGER D, WALKER R, et al. Soil CO₂, soil respiration and root activity in CO₂-fumigated and nitrogen-fertilizer edponderosa pine [J]. Plant and Soil, 1994, 165: 129-138.