

# 不同灌水下复合肥对冬小麦产量及 农田净生态系统生产力的影响

周立峰<sup>1,3</sup>, 冯浩<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 合理灌溉和施用肥料是实现冬小麦节水增产增效的关键, 该研究旨在为复合肥的大面积应用提供科学依据。2009~2010 年, 通过田间试验设置不同灌水和施肥水平, 研究了不同灌水和施用量复合肥对冬小麦产量及农田净生态系统生产力 (NEP) 的影响。结果表明: 各灌水施肥处理中, 拔节期灌水 60 mm、复合肥施肥水平 1 350 kg/hm<sup>2</sup> 时, 冬小麦产量最大, 为 8 894.11 kg/hm<sup>2</sup>。在考虑施肥经济效益的前提下, 不灌水、灌 1 水、灌 2 水下经济最佳施肥量分别为 656、920.13 与 872.38 kg/hm<sup>2</sup>。常规施肥处理农田 CO<sub>2</sub> 排放量小于各复合肥处理; 在冬小麦农田土壤呼吸作用强烈的拔节及灌浆期, 拔节期灌水均能显著提高农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量。考虑农田固碳, 每公顷土地施复合肥 1 800 kg 处理最佳。

**关键词:** 土壤, 灌溉, 试验, 复合肥料, 节水, 增产, 固碳减排

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.07.006

中图分类号: S156.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-07-0031-06

周立峰, 冯浩. 不同灌水下复合肥对冬小麦产量及农田净生态系统生产力的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 31-36.

Zhou Lifeng, Feng Hao. Effects of irrigation and compound fertilizer on yield of winter wheat and net ecosystem productivity of farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 31-36. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分。全球耕地面积约 1 369×10<sup>6</sup>hm<sup>2</sup>, 占全球陆地面积的 10.5%<sup>[1]</sup>。农业源排放的 CO<sub>2</sub> 占人为温室气体排放量的 21%~25%<sup>[2]</sup>。此外, 农田生态系统还容易受到强烈的人为干扰, 是全球碳库中最活跃的部分。全球陆地生态系统碳库中只有农田生态系统可以在较短时间尺度上调节碳库<sup>[3]</sup>。土壤呼吸(soil respiration, Rs)指土壤产生和向大气释放 CO<sub>2</sub> 的过程, 它也是陆地生态系统碳循环中土壤碳的主要输出途径, 其排放量是陆地生态系统向大气排放碳的最大通量之一<sup>[4]</sup>。对 CO<sub>2</sub> 影响最显著的因子是土壤有机质含量<sup>[5-9]</sup>, 而施肥是人为影响土壤有机质含量最主要的因素。在单一过量化肥使用使土壤结构恶化及养分失衡的背景下, 有机无机类功能性肥料的应用意义重大<sup>[10]</sup>。目前中国对农田生态系统碳循环的研究以稻田居多<sup>[4,11]</sup>, 而北部地区冬小麦农田相关研究较少。在有机无机复混肥类产品代

替传统的化肥单施或固定配施的趋势下, 有必要开展有机无机复混肥对农田生态系统碳平衡潜在影响的研究。随着研究的深入, 吴普特等<sup>[12-13]</sup>提出以秸秆、废料等为主要原料, 通过有机无机复合制成能够改良土壤结构状况、提高土壤中有效水分体积分数、减少化肥使用量的土壤扩蓄增容肥 (SAF)。本试验以西北农林科技大学国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心开发的有机无机土壤扩蓄增容肥为对象, 重点研究其不同施用量对冬小麦产量及农田净生态系统生产力 (NEP) 的影响, 为该类肥料的可持续规模性应用提供生产与生态方面的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本情况

试验于 2009-10-2010-07 在陕西省杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站进行。该灌溉试验站位于 E108°24', N34°20', 海拔 521 m, 所处地理位置属于暖温带季风半湿润气候区。站内地形平整, 土层深厚, 土壤质地为中壤土, 1 m 土层的平均田间持水率为 23%~25%, 凋萎含水率为 8.5% (以上均为质量含水率), 平均干体积质量为 1.44 g/cm<sup>3</sup>。该站属渭河三道台塬地区, 全年无霜期 221 d, 降水量多集中在 7、8、9、10 四个月, 地下水埋藏较深, 其向上补给量可以忽略不计。

### 1.2 试验设计及方法

供试小麦品种为小偃 22, 土壤扩蓄增容肥 (SAF)

收稿日期: 2010-10-09 修订日期: 2011-06-13

基金项目: “十二五”国家 863 计划项目 (2011AA100503); 高等学校学科创新引智计划资助 (NO.111-2-16); 中央高校基本科研业务费专项资金资助。  
作者简介: 周立峰 (1986—), 男, 主要研究方向: 水土资源高效利用。杨凌中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 712100。Email: lee86208@126.com

\*通信作者: 冯浩 (1970—), 男, 研究员。主要研究方向: 水土资源高效利用。杨凌中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 712100。Email: nercwsi@vip.sina.com

由页岩、油渣、沸石粉、活性炭、尿素、磷酸二氢钾、磷酸二铵按一定比例复合造粒制成。该肥养分检测结果如下：有机质质量分数为 25.88%，全氮质量分数为 14.53%， $P_2O_5$  质量分数为 12.43%， $K_2O$  质量分数为 5.02%。试验采用裂区设计：主区为 3 种灌水处理：不灌水、灌 1 水（拔节期灌水 60 mm）、灌 2 水（小麦拔节期灌水 60 mm，灌浆期灌水 40 mm）；裂区为 6 种施肥处理：设常规施肥处理 NF（尿素 450 kg/hm<sup>2</sup> 与磷酸氢二铵 450 kg/hm<sup>2</sup>）与不同 SAF 施用量处理（SAF450 kg/hm<sup>2</sup>，SAF900 kg/hm<sup>2</sup>，SAF1350 kg/hm<sup>2</sup>，SAF1800 kg/hm<sup>2</sup>，SAF2250 kg/hm<sup>2</sup>）。每个处理设 3 个重复，小区面积 12 m<sup>2</sup>，各施肥之间设置 1 m 的保护带，重复之间设置 2 m 的保护带。

### 1.3 取样及测定方法

#### 1.3.1 产量及产量构成因素

小麦成熟后各小区单收称质量，每小区选取有代表性的 1 m<sup>2</sup> 进行考种，调查有效穗数、穗质量、每穗麦粒数和千粒质量。

#### 1.3.2 农田小区 CO<sub>2</sub> 排放量测定及 NEP 的测算

小区 CO<sub>2</sub> 排放量采用静态钠石灰吸收法测定<sup>[14]</sup>，并用静态箱—红外 CO<sub>2</sub> 分析仪法对测定结果进行修正<sup>[15]</sup>。试验前在各小区分别将直径为 30 cm，高度为 20 cm 的圆柱形钢圈插入地面，并清空其内的土壤，用作放置钠石灰，空间上方用直径 40 mm 的铁盖下缘轻轻旋入土壤 3 cm，铁桶上覆盖遮蔽物，防止阳光直射。静态钠石灰吸收法从 10-12 起开始测定，每个处理设 3 个重复。田间测定前，钠石灰于 105℃ 烘干 24 h。测定时，将烘干、称质量、记录后的钠石灰（50 g）装入璃培养皿并用水充分润湿；清除预先挖掘好的空间中的杂物，将培养皿置于其内的小铁架上，测定结束后取出培养皿，于 105℃ 烘干 24 h，称质量记录。测定间隔为 15 d。静态箱—红外 CO<sub>2</sub> 分析仪法测定仪器为 Telaire7001 便携式红外线 CO<sub>2</sub> 分析仪，试验前用 CO<sub>2</sub> 标准气对仪器进行了校正。每次测量 CO<sub>2</sub> 排放通量的同时测定土壤 5、10、15、20、25 cm 处温度。排放通量由箱中气体浓度随时间的变化率计算得出，通量计算方程为

$$F = \frac{h \times M_w \times T_{st}}{M_v \times (T_{st} + T)} \cdot \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中， $F$  为 CO<sub>2</sub> 排放通量，mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>； $dc/dt$  为箱内痕量气体随时间的变化率； $h$  为采样箱高，cm； $M_w$  为痕量气体的摩尔质量，g/mol； $T_{st}$  为标准状态下的温度，273.2 K； $M_v$  为痕量气体的摩尔体积，L/mol； $T$  为测定时的土壤温度，℃。

据测算，作物光合作用合成 1 g 有机质需吸收 C 为 0.45 g<sup>[16]</sup>，作物全生育期的总生物固碳量 NPP 为

$$NPP = 0.45 \frac{Y_w}{H_i} \quad (2)$$

式中， $Y_w$  为经济产量，kg/hm<sup>2</sup>； $H_i$  为经济系数，小麦的  $H_i$  均为 0.4<sup>[17]</sup>。

采用净生态系统生产力（NEP）<sup>[18]</sup> 来表示生态系统碳平衡。NEP 为正值时，表示系统是大气 CO<sub>2</sub> 的吸收“汇”；

反之为大气 CO<sub>2</sub> 的排放“源”。碳平衡计算公式为

$$NEP = NPP - R_s \quad (3)$$

式中， $R_s$  为土壤呼吸碳排放量，g/hm<sup>2</sup>。

采用 Excel 2003 及 SPSS 11.5 统计分析软件对试验数据进行处理和分析。

#### 1.3.3 气象资料

由西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站提供。

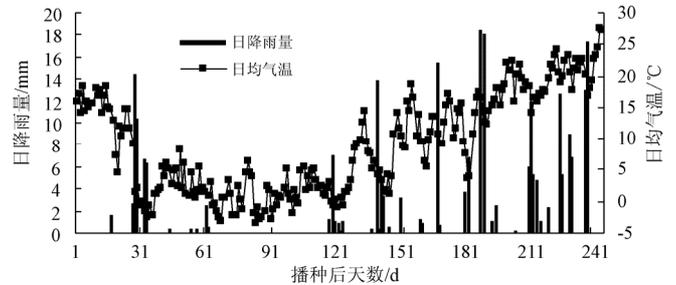


图 1 冬小麦全生育期气温与降雨分布

Fig.1 Moisture distribution and temperature at total growth stage of winter wheat

试验期间小麦全生育期总降雨量 247.5 mm，总积温 2 209℃。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 SAF 对小麦产量的影响

#### 2.1.1 不同 SAF 施用量对冬小麦产量的影响及其经济最佳施肥点的确定

不同 SAF 施用量下冬小麦产量如表 1 所示。试验结果表明：3 种灌水条件下，SAF 处理小麦产量均显著大于 NF 处理。小麦产量与 SAF 施用量呈二次抛物线关系（图 2），不灌水、灌 1 水与灌 2 水的二次回归关系式如下

$$y_1 = -0.0009x_1^2 + 2.2808x_1 + 7217.6 \quad (R^2=0.9159) \quad (1)$$

$$y_2 = -0.0016x_2^2 + 4.0444x_2 + 6338.3 \quad (R^2=0.9519) \quad (2)$$

$$y_3 = -0.0012x_3^2 + 3.1937x_3 + 6441.0 \quad (R^2=0.9467) \quad (3)$$

式中， $y_1$ ， $y_2$ ， $y_3$  分别为不灌水、灌 1 水、灌 2 水时的产量，kg/hm<sup>2</sup>； $x_1$ ， $x_2$ ， $x_3$  分别为不灌水、灌 1 水、灌 2 水时的施肥量，kg/hm<sup>2</sup>。

SAF1350 处理小麦产量高于 SAF1800 处理可能是因为 SAF1800 处理施肥量太大导致其对作物生长产生负作用所致<sup>[24]</sup>。对 3 个灌水条件下产量与施肥量的回归方程进行求解，求得在不灌水、灌 1 水与灌 2 水下的产量最佳施肥水平分别为 1 267.11、1 263.88 和 1 330.71 kg/hm<sup>2</sup>，其对应的理论最大产量则分别为 8 662.62、8 894.11 和 8 565.94 kg/hm<sup>2</sup>。

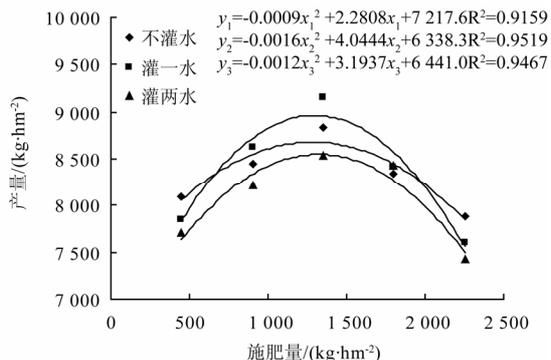
表 1 2009—2010 年不同灌水及施肥处理下冬小麦产量  
Table 1 Yields under the different irrigation methods and fertilizer treatments of winter wheat from 2009 to 2010

处理	不灌水	灌 1 水	灌 2 水
	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
NF	6834.51d	6935.44e	6725.27d
SAF450	8088.60c	7855.66d	7698.26c
SAF900	8450.90b	8628.95b	8212.37b

续表

处理	不灌水	灌 1 水	灌 2 水
	产量/(kg·hm <sup>2</sup> )	产量/(kg·hm <sup>2</sup> )	产量/(kg·hm <sup>2</sup> )
SAF1350	8827.85a	9149.57a	8526.6a
SAF1800	8341.93b	8410.30c	8421.15ab
SAF2250	7875.87c	7606.61d	7430.26c

注：NF 为常规施肥处理；SAF450 为施土壤扩蓄增容肥 450 kg/hm<sup>2</sup>；SAF900 为施土壤扩蓄增容肥 900 kg/hm<sup>2</sup>；SAF1350 为施土壤扩蓄增容肥 1350 kg/hm<sup>2</sup>；SAF1800 为施土壤扩蓄增容肥 1800 kg/hm<sup>2</sup>；SAF2250 为施土壤扩蓄增容肥 2250 kg/hm<sup>2</sup>。表中各列小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。



注：y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, y<sub>3</sub> 分别为不灌水、灌 1 水、灌 2 水时的产量，kg/hm<sup>2</sup>；x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub> 分别为不灌水、灌 1 水、灌 2 水时的施肥量，kg/hm<sup>2</sup>。

图 2 不同灌水下各土壤扩蓄增容肥处理小麦产量

Fig.2 Yields of winter wheat under different irrigation methods and fertilizer treatments

随着施肥量的增大，产量随施肥量增长的增长速率单调递减。肥料增产效应一般分为 3 个阶段：第一阶段自起始点到平均增产量的最高点，第二阶段从平均增产量的最高点到最高产量点，超过最高产量点即到第三阶段。当边际产量等于肥料与产品的价格比时，即边际产值等于边际成本时，单位面积的施肥利润最大。其边际利润值用 R 表示<sup>[25]</sup>

$$R = \frac{P_y}{P_x} \cdot \frac{dy}{dx} - 1 \quad (4)$$

其中，P<sub>y</sub>为小麦价格，元/kg；P<sub>x</sub>为肥料价格，元/kg。

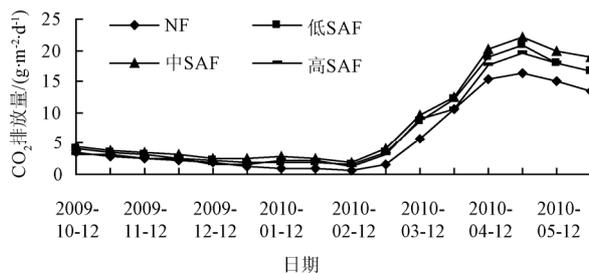
根据市场调查，该 SAF 的价格为 2.2 元/kg，小麦价格为 1 元/kg，其比值为 1.1。根据边际效益递减原理，当 R=0，即边际利润为 0 时，此时  $\frac{dy}{dx} = 1.1$  (i=1,2,3) 时

所对应的施肥量为该灌水下经济最佳施肥量。经计算，不灌水、灌 1 水、灌 2 水下经济最佳施肥量 x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub> 分别为 656、920.13 与 872.38 kg/hm<sup>2</sup>，这也是不同灌水下该肥在实际应用中宜采用的施用量。

## 2.2 不同施肥及灌水条件下土壤扩蓄增容肥对冬小麦农田 CO<sub>2</sub> 排放影响

### 2.2.1 不同土壤扩蓄增容肥施用量对冬小麦生长季农田 CO<sub>2</sub> 排放通量的影响

为了研究各施肥处理对冬小麦农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响，于 2009-10-12—2010-05-28 对冬小麦生长期 CO<sub>2</sub> 排放通量进行了测量。结果如图 3 所示。



注：将 SAF450 与 SAF900 合并后求平均值，作为低水平 SAF 处理；将 SAF1350 和 SAF1800 记为中水平 SAF 处理；SAF2250 则为高水平 SAF 处理，下同。

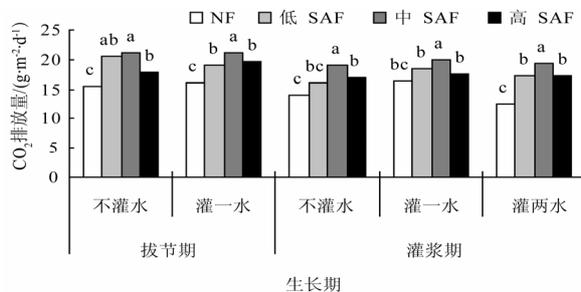
图 3 不同施肥处理冬小麦生长季农田 CO<sub>2</sub> 排放动态

Fig.3 Soil CO<sub>2</sub> Emission dynamics of different fertilizer treatments

由图 3 可知：小麦播种后直到 12 月中旬，NF 与各 SAF 处理的农田 CO<sub>2</sub> 排放通量均逐渐下降，且各处理无显著差异。12 月中旬至 2 月中旬，NF 处理农田 CO<sub>2</sub> 排放通量继续下降至 0.56 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>，而此时期各 SAF 处理农田 CO<sub>2</sub> 排放通量保持 1.5 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> 左右。2 月中旬以后，各施肥处理农田 CO<sub>2</sub> 排放通量迅速上升并在 4 月份达到最大值，此时期 NF 处理农田 CO<sub>2</sub> 排放通量明于各 SAF 处理。

### 2.2.2 不同灌水下各施肥处理冬小麦关键期农田 CO<sub>2</sub> 排放的影响

为了探究灌水对各施肥处理对冬小麦关键期农田 CO<sub>2</sub> 排放的影响，选取拔节期（灌 1 水）与灌浆期（灌 2 水）的处理进行比较，结果如图 4 所示。



注：表中各列小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

图 4 不同灌水下及施肥下冬小麦关键生长期农田 CO<sub>2</sub> 排放量

Fig.4 Soil CO<sub>2</sub> emission dynamics of different irrigation and fertilizer treatments at critical stages of winter wheat

由图 4 可知：在拔节期，不灌水条件下 NF 处理与高 SAF 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量分别为 15.59 与 17.76 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>，明显小于中、低 SAF 处理的 21.23 与 20.52 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>；而灌 1 水条件下则表现为中 SAF 处理 CO<sub>2</sub> 排放通量最大，为 20.05 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>，其次为高、低 SAF 处理，NF 处理最低，仅为 16.02 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。以上结果可能是因为灌水后增加了土壤含水率，高 SAF 处理在高土壤含水率的条件下水肥耦合效果好于不灌水处理<sup>[26]</sup>，导致其 CO<sub>2</sub> 排放通量增大，但由图可看出拔节期是否灌水对冬小麦农田 CO<sub>2</sub> 排放量的影响不显著。在灌浆期，各灌水下不同施肥处理 CO<sub>2</sub> 排放通量较拔节期都有所降低。此时期灌 1 水条件下各施肥处理 CO<sub>2</sub> 排放通量与不灌水大体相同，但测

量结果总体高于不灌水处理；灌2水条件下，各SAF处理CO<sub>2</sub>排放通量情况和灌1水大体相同，但灌浆期NF处理则从灌1水条件下的16.47 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>下降至灌2水条件下的12.52 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>，差异明显，而各SAF处理不同灌水下CO<sub>2</sub>排放通量无显著差异。

### 2.3 不同土壤扩蓄增容肥施用量对冬小麦产量及NEP综合效应研究

#### 2.3.1 不同土壤扩蓄增容肥施用量对冬小麦农田NEP的影响

通过测算各施肥处理小区农田NEP的数值来判断其对大气CO<sub>2</sub>的贡献。各处理NEP为正值代表该小区农田为大气CO<sub>2</sub>的“汇”，负值则代表其为CO<sub>2</sub>的“源”。测算结果如下

表2 各处理小区农田NEP情况

处理	NF	SAF450	SAF900	SAF1350	SAF1800	SAF2250
不灌水	3712.33d	4052.63b	4086.35b	3862.13c	4310.55a	3856.25c
灌1水	3887.24cd	4396.47a	4187.37b	3950.39bc	4412.93a	3922.54c
灌2水	3725.44c	4042.16b	4105.32ab	3845.17c	4305.69a	3864.67c

由表2可知，各灌水处理间NEP差异没有施肥处理明显，NEP的差异主要表现在各施肥处理中。各施肥处理中SAF1800处理NEP值最大，其次为SAF450、SAF900处理，SAF1350、SAF2250及NF相对较小。相关研究表明高NPP往往伴随着Rs的增大<sup>[27]</sup>，此结论在本研究中也有所体现。由于NEP是由NPP与Rs之差决定的，而与以上两个因素相关的作物产量与CO<sub>2</sub>排放量的最大值均出现在灌1水处理中，加之施肥因素对NEP的影响远大于灌水处理，故灌水对NEP的影响有待进一步专门研究。

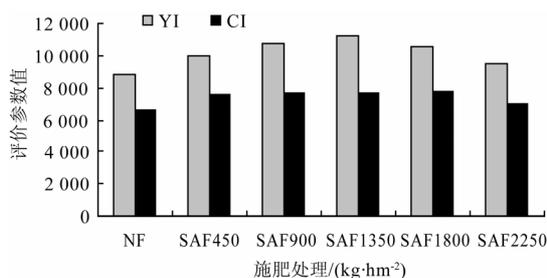
#### 2.3.2 基于冬小麦产量与农田NEP的SAF施用量优选

由以上结果可知：各施肥水平下，产量与NEP最优处理均出现在灌1水条件下，故选取灌1水下各施肥处理冬小麦产量及固碳量作为评价因子，记为y<sub>i</sub>与c<sub>i</sub>，分别以产量结果和固碳量为主因子考虑最佳SAF施用量，采用主因子值与二因子平均值二者的均方根作为评价参数值，记为YI与CI。其中

$$YI = \sqrt{y_i^2 + \left(\frac{y_i + c_i}{2}\right)^2} \quad (5)$$

$$CI = \sqrt{c_i^2 + \left(\frac{y_i + c_i}{2}\right)^2} \quad (6)$$

计算结果如图5所示。



注：YI, CI 见式(5) - (6)。

图5 不同施肥处理的优选评价参数值

Fig.5 Optimal evaluation parameter values under different fertilizer treatments

由图5可知，灌1水下，SAF1350处理YI值最高，其次为SAF900处理与SAF1800处理，NF处理YI值最低；而SAF1800处理CI值最高，其次为SAF900处理，NF处理最低。由此可见，在综合考虑作物产量与农田固碳综合效应的前提下，若将产量作为主要判别因子，则SAF1350处理为最优处理，SAF900处理与SAF1800次之；若偏重考虑农田固碳效应，则SAF1800处理最佳，SAF450、SAF900与SAF1350处理次之。

## 3 讨论

各灌水下SAF处理小麦产量均显著大于常规施肥处理，这与以往相关研究结果一致<sup>[19-23]</sup>，SAF1350包含的无机肥含量仅为675 kg/hm<sup>2</sup>，低于当地常规施肥水平，灌1水各施肥处理的产量大于灌2水处理，这说明了加大灌水与施肥量并不意味着产量的增加。王红光研究表明随着灌水量的增大，取得最大产量的施肥水平有增大的趋势<sup>[24]</sup>。SAF处理农田CO<sub>2</sub>排放量大于NF可能是因为土壤中加入有机物使土壤有机质加速矿化<sup>[6]</sup>。此外，施用有机肥能显著提高土壤活性有机碳的含量，同时又可以改善土壤的物理性状，提供更多微生物生命活动所需要的能源，最终使土壤具有较高的微生物活性，促进土壤呼吸<sup>[7-8]</sup>。由试验可知，越冬期NF处理农田CO<sub>2</sub>排放通量降低、2月下旬及4月份NF处理CO<sub>2</sub>排放通量增长速度小于SAF处理，这2个因素是NF处理农田CO<sub>2</sub>排放通量小于各SAF处理的主要原因。拔节期是小麦需水关键期，此时土温升高，土壤微生物活动也很强烈，补充土壤水分有助于根系吸水与微生物活动，进一步使土壤呼吸强烈<sup>[28-29]</sup>。由于目前国际碳交易体系尚不成熟，故基于经济效益的YI、CI值的研究有待进一步研究。

## 4 结论

1) 在各灌水处理中，理论最大产量出现在灌1水处理中，即拔节期灌水60 mm，此时冬小麦产量为8 894.11 kg/hm<sup>2</sup>，对应的施肥水平为SAF1350。而在实际应用中，不灌水、灌1水、灌2水下经济最佳SAF施肥量分别为656、920.13与872.38 kg/hm<sup>2</sup>。从结论中可知，该生长季降雨分配集中在3—5月，特别是3月和5月份，这正处在小麦的拔节至灌浆期。在这种降雨条件下，拔节期灌1次水能明显提高冬小麦的产量，说明拔节期冬小麦对水分的要求是很高的，此时土体蒸发强烈，对土体进行补水是必要的。而灌浆期由于降雨充足，水热条件都比较充沛，在这种条件下灌水有可能降低土壤空隙的通气性能，抑制土壤微生物的活动，这对作物根系生长及营养物质的转运是不利的。

2) 各施肥处理在小麦不同生长期的差异主要体现在：越冬期NF处理农田CO<sub>2</sub>排放通量下降，2月下旬及4月份NF处理CO<sub>2</sub>排放通量增长速度小于各SAF处理，这也导致了NF处理农田CO<sub>2</sub>排放总量小于各SAF处理。

3) 灌水对土壤CO<sub>2</sub>排放通量影响不大。冬小麦农田土壤呼吸作用强烈的拔节及灌浆期，在高SAF施肥水平下拔节期灌1次水均能显著提高农田土壤CO<sub>2</sub>排放通量。

灌浆期由于土体水热条件充足, 灌水有可能降低土壤空隙的通气性能, 抑制土壤中好氧微生物的活动, 导致常规施肥处理土体呼吸作用低于拔节期。

4) 灌 1 水下, SAF1800 处理 NEP 值最大, 其次为 SAF450、SAF900 处理, SAF1350、SAF2250 及 NF 相对较小。综合考虑作物产量与农田固碳综合效应的前提下, 若将产量作为主要判别因子, 则 SAF1350 处理为最优处理; 若偏重考虑农田固碳, 则 SAF1800 处理最佳。

#### [参 考 文 献]

- [1] FAO (2001). Agriculture: Towards 2015/30. Technical interim report April 2000[R]. Rome, Food and Agriculture Organization.
- [2] 林而达. 气候变化与农业可持续发展[M]. 北京: 北京出版社, 2001: 1—32.
- [3] 赵生才. 中国农田生态系统碳库的发展机制和趋势: 第 236 次香山科学会议侧记[J]. 地球科学进展, 2005, 20: 587—590.
- [4] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 7—20.
- [5] IRRI. IRRI studies role of rice field methane in global climate change[M]. The IRRI Report, 1991, 4: 1—2.
- [6] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 等. 中国农业土壤固碳潜力与气候变化[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] Debozs K, Rasmussen P H, Pedersen A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effect of organic matter input[J]. Applied Soil Ecology, 1999, 13: 209—218.
- [8] 翟瑞常, 张之一. 耕作对农田土壤生物碳库影响[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 201—210.  
Zhai Ruichang, Zhang Zhiyi. Effects of tillage on dynamics of soil biomass carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(2): 201—210. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北地区冬小麦农田土壤呼吸概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1552—1560.  
Chen Shuyue, Li Jun, Lu Peiling, et al. Soil respiration characteristics in winter wheat field in north china plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9): 1552—1560. (in Chinese with English abstract)
- [10] 许秀成. 再议“我国复混肥行业现状及发展机遇”[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(1): 1—5.  
Xu Xiucheng. Further discussion on the present status and development opportunity of compound fertilizer industry in China[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2008, 23(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [11] 荣湘民, 袁正平, 胡瑞芝, 等. 地下水位、有机堆肥及水文情况对稻田甲烷排放的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2001, 27(5): 346—349.  
Rong Xiangmin, Yuan Zhengping, Hu Ruizhi, et al. Effects of groundwater level, organic manure and water regime on methane emission from rice fields[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2001, 27(5): 346—349. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴普特. 雨水资源化与现代节水农业[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 15—20.  
Wu Pute. Rainwater harvesting and modern water saving agriculture [J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2007, 9(1): 15—20. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王珍, 冯浩, 吴普特, 等. 土壤扩蓄增容肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 25(11): 114—119.  
Wang Zhen, Feng Hao, Wu Pute, et al. Effects of soil amendment fertilizers on yield and water use efficiency of spring maize[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 114—119. (in Chinese with English abstract)
- [14] Markus Kleber. Carbon exchange in humid grassland soils. University Hohenheim(310), D-70593 Stuttgart. 1997, ISSN0942-0754.
- [15] 胡立峰, 王宝芝, 李洪文. 土壤呼吸、农田 CO<sub>2</sub> 排放及 NEE 的比较研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 578—581.  
Hu Lifeng, Wang Baozhi, Li Hongwen. The comparative study of the soil respiration, CO<sub>2</sub> emission and NEE from the farmland in the north of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 578—581. (in Chinese with English abstract)
- [16] Larcher W. Physiological Plant Ecology[M]. 4th ed. Germany: Springer, 2003: 513. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王修兰. 全球农作物对大 CO<sub>2</sub> 及其倍增的吸收量估算[J]. 气象学报, 1996, 54(4): 466—473.  
Wang Xiulan. The estimation on crop absorbing CO<sub>2</sub> under current and double CO<sub>2</sub> conditions in the world[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1996, 54(4): 466—473. (in Chinese with English abstract)
- [18] 牛灵安, 郝晋珉, 张宝忠, 等. 长期施肥对华北平原农田土壤呼吸及碳平衡的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1054—1060.  
Niu Ling'an, Hao Jinmin, Zhang Baozhong et al. Soil respiration and carbon balance in farmland ecosystems on North China Plains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1054—1060. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈连海, 冯浩, 杜建. 土壤扩蓄增容肥对土壤养分含量及小麦产量影响的试验研究[J]. 生态经济, 2009, 2: 6—10.  
Chen Lianhai, Feng Hao, Du Jia. Study on the effect of soil fertility and yield of the soil magnistorage compatibilizer[J]. Ecological Economy, 2009, 2: 6—10. (in Chinese with English abstract)
- [20] 谷洁. 有机无机复混肥对冬小麦产量及其水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 65—68.  
Gu Jie. Effect of organic-inorganic fertilizers on the yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For: Nat. Sci. Ed., 2004, 32(2): 65—68. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周丽华, 李维炯. 长期施用 EM 生物有机肥对冬小麦生产的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 221—224.  
Zhou LiHua, Li WeiJiong. Effects of long term application of EM biologic fertilizer on winter wheat production[J].

- Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp): 221–224. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张睿, 刘党校. 氮磷与有机肥配施对小麦光合作用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 543–547. Zhang Ru, Liu Diang Xiao. Effects of N, P and organic fertilizer on photosynthesis, yield and quality of winter wheat. [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 543–547. (in Chinese with English abstract)
- [23] Feng M L, Xiao L L, Shi Q L. Effect of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat[J]. Agricultural water management, 2001, 49: 163–171.
- [24] 王红光, 于振文. 推迟拔节水及其灌水量对小麦耗水量和耗水来源及农田蒸散量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1183–1191. Wang Hong Guang, Yu Zhen Weng. Effects of delayed irrigation at jointing stage and irrigation level on consumption amount and resources of water in wheat and farmland evapotranspiration[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(7): 1183–1191. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙羲, 陶勤南, 秦遂初, 等. 作物营养与施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1990: 44–48.
- [26] 曹永强, 刘琳, 姜莉, 等. 冬小麦水肥生产函数最小二乘法回归建模及分析[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 45–48. Cao Yongqiang, Liu Lin, Jiang Li, et al. Modeling and analysis of water fertilizer production function of winter wheat by use of least square regression[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 45–48. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王艳萍, 高吉喜, 冯朝阳, 等. 北京京郊果园施用不同农肥的土壤呼吸特征研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(1): 77–83. Wang Yanping, Gao Jixi, Feng Chaoyang, et al. Soil respiration characteristics of different fertilization types in peach farms in Beijing suburb[J]. Journal of Zhejiang University: Agricl and Life Sci1, 2009, 35(1): 77–83. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972–978. Chen Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972–978. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈书涛, 朱大威, 牛传坡, 等. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2858–2865. Chen Shutao, Zhu Dawei, Niu Chuanpo, et al. Effects of management regime on soil respiration from agroecosystems[J]. Environmental Science, 2009, 30(10): 2858–2865. (in Chinese with English abstract)

## Effects of irrigation and compound fertilizer on yield of winter wheat and net ecosystem productivity of farmland

Zhou Lifeng<sup>1,3</sup>, Feng Hao<sup>1,2\*</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A 2-year experiment was conducted to study the effects of irrigation and soil amendment fertilizer on yields of winter wheat and net ecosystem productivity (NEP) of farmland in 2009, 2010. Results showed that the maximum yield was 8 894.11 kg/hm<sup>2</sup> with irrigation water of 60 mm in jointing stage and fertilized soil amendment fertilizer of 1350 kg/hm<sup>2</sup>. The optimum amount of SAF fertilization under no irrigation, irrigation once, irrigation twice was 656、920.13 and 872.38 kg/hm<sup>2</sup> respectively. Plot CO<sub>2</sub> emission under normal fertilizer treatment was lower than that of soil amendment fertilizer treatments. In jointing stage and seed filling stage which soil respiration of winter wheat were intensively, irrigation at jointing stage could significantly improve soil CO<sub>2</sub> emission flux. SAF1800 treatment was recommend as the strategy for improving farmland carbon sequestration.

**Key words:** soils, irrigation, experiments, compound fertilizer, water-saving, yield increase, carbon sequestration