

陶宝先, 张保华, 董杰, 等. 设施耕作促进农田土壤有机碳矿化[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2486–2492.

TAO Bao-xian, ZHANG Bao-hua, DONG Jie, et al. Effect of greenhouse cultivation on the decomposition of organic carbon in agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2486–2492.

# 设施耕作促进农田土壤有机碳矿化

陶宝先<sup>1</sup>, 张保华<sup>2</sup>, 董杰<sup>1</sup>, 刘晨阳<sup>1</sup>

(1.聊城大学环境与规划学院, 山东 聊城 252059; 2.聊城大学科学技术处, 山东 聊城 252059)

**摘要:**为研究土地利用方式变化与温度对土壤有机碳矿化的交互作用,利用室内培养实验,研究了寿光市农田转变为设施菜地及设施菜地荒废与增温对土壤有机碳矿化的交互作用。结果表明:增温显著促进土壤有机碳矿化( $P<0.01$ ),农田、设施菜地及荒废设施菜地土壤有机碳累积矿化量分别增加 56.08%、42.32%和 42.36%。农田转变为设施菜地显著促进土壤有机碳矿化( $P<0.05$ ),设施菜地有机碳累积矿化量分别增加 185.81%(25℃)、160.61%(35℃)。相同增温条件对设施菜地土壤有机碳累积矿化量的促进作用明显高于农田,这主要是因为设施菜地土壤有机碳易分解组分的温度敏感性系数( $Q_{10}=1.79$ )明显高于农田( $Q_{10}=1.37$ ),且设施菜地土壤颗粒有机碳含量明显高于农田造成的。设施菜地荒废后,交互作用变为加和效应,因其土壤有机碳易分解组分的温度敏感性系数( $Q_{10}=1.41$ )与农田无差异。综上所述,设施耕作显著促进土壤有机碳矿化,其中增温与农田转变为设施菜地对土壤有机碳矿化的交互作用为正效应。因此,利用单因素之和评估多因素对土壤有机碳矿化的综合影响可能会低估其影响水平。

**关键词:**设施菜地;土壤有机碳;温度敏感性( $Q_{10}$ );交互作用;寿光市

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)12-2486-07 doi:10.11654/jaes.2017-1171

## Effect of greenhouse cultivation on the decomposition of organic carbon in agricultural soils

TAO Bao-xian<sup>1</sup>, ZHANG Bao-hua<sup>2</sup>, DONG Jie<sup>1</sup>, LIU Chen-yang<sup>1</sup>

(1.College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2.Department of Science and Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** An incubation experiment was conducted to investigate the interactive effect of temperature and land use change, either from farmland (FL) to greenhouse soil (GH) or in abandoned greenhouse soil (AG), on the decomposition of soil organic carbon (SOC) in Shouguang City. Temperature increased the cumulative SOC decomposition by 56.08%, 42.32%, and 42.36% in the FL, GH, and AG, respectively ( $P<0.01$ ). Land use change from FL to GH significantly enhanced SOC decomposition ( $P<0.05$ ), and the cumulative SOC decomposition of the GH increased by 185.81% at 25℃ and by 160.61% at 35℃. The positive effect of temperature on SOC decomposition was greater in the GH than in the FL, possibly owing to the GH's larger  $Q_{10}$  value of the labile SOC fractions ( $Q_{10}=1.79$  vs.  $Q_{10}=1.37$ ) and the larger concentration of particulate organic carbon. The interactive effect of temperature and land use change from FL to AG was additive, owing to the similar labile SOC  $Q_{10}$  values of the two land use types ( $Q_{10}=1.41$ ). In general, the GH exhibited greater cumulative SOC decomposition than the FL, and the combination of temperature and land use change (from FL to GH) produced a synergistic effect on SOC decomposition. Therefore, the interactive effect of land use change and temperature on SOC decomposition may be underestimated based on the separate effects of each factor.

**Keywords:** greenhouse soil; soil organic carbon; temperature sensitivity ( $Q_{10}$ ); interactive effect; Shouguang City

收稿日期:2017-08-28 录用日期:2017-11-27

作者简介:陶宝先(1981—),男,山东淄博人,讲师,主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail:taobaoxian@sina.com

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41501099);山东省自然科学基金项目(ZR2014DQ015, ZR2016DM14);聊城大学基金项目(318051430)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41501099); Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2014DQ015, ZR2016DM14); Natural Science Foundation of Liaocheng University(318051430)

农业土壤是陆地生态系统重要的碳库<sup>[1]</sup>,呼吸作用是土壤向大气排放 CO<sub>2</sub> 的重要过程<sup>[2]</sup>,其排放约占人为源排放温室气体的 10%~12%<sup>[3]</sup>。因此,农业土壤碳库的变化将对全球变化产生较大影响<sup>[2]</sup>。农业耕作措施是影响农业土壤碳排放过程的重要因素<sup>[4]</sup>。其中,灌溉<sup>[5-6]</sup>、施肥<sup>[7]</sup>、温度<sup>[8]</sup>等因素均对农业土壤碳排放过程产生明显影响。一般认为,可以通过温度敏感性系数( $Q_{10}$ )反映土壤有机碳矿化对温度的响应<sup>[8]</sup>。早期研究发现,有机碳难分解组分的矿化对温度无响应<sup>[9]</sup>,但也有研究表明,有机碳难分解组分与易分解组分矿化具有相似的  $Q_{10}$  值<sup>[10]</sup>,或有机碳难分解组分矿化的  $Q_{10}$  值大于易分解碳组分<sup>[11]</sup>。而且,不同利用方式显著影响土壤碳组分<sup>[12]</sup>。因此,不同利用方式土壤碳排放过程对温度的响应可能不同<sup>[13]</sup>。

设施栽培是我国蔬菜重要生产方式之一,传统农田转变为设施菜地后土壤有机碳含量发生显著变化<sup>[9,15]</sup>。此外,设施菜地独特的耕作措施导致其土壤具有高温、高湿及高施肥量等新特点<sup>[9]</sup>。因此,相对于传统农田,设施菜地独特的耕作措施及其导致的土壤环境条件变化,可能对土壤碳排放过程产生重要影响。目前,针对农业土壤碳排放过程的研究主要集中在小麦、玉米、棉花等作物类型<sup>[5-6,16]</sup>,对农田转变为设施菜地及设施菜地荒废后土壤有机碳矿化的变化特征研究仍不充分。

为了明确设施耕作对土壤碳排放过程的影响,本文以寿光市为例,利用室内培养试验(400 d),研究土地利用方式变化(即农田转变为设施菜地及设施菜地荒废)与温度对土壤有机碳矿化的交互作用,以期明确土地利用方式变化与温度对土壤碳排放过程的综合影响,为设施菜地土壤 CO<sub>2</sub> 减排提供依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

寿光市位于山东半岛北部,属暖温带季风性大陆

气候,该区年均降水量 594 mm,年均气温 12.7 ℃。农田为玉米-冬小麦轮作,耕作过程中主要施加复合肥,年均施肥量(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15)为 1.13 t·hm<sup>-2</sup><sup>[17]</sup>。农田转变为设施菜地前,其基本理化性质具有相似性<sup>[18]</sup>。设施蔬菜以黄瓜、番茄、辣椒等轮作为主,复种指数较高,种植方式与管理具有较大相似性,施肥类型包括有机肥及复合肥。有机肥(鸡粪为主)年均施用量为 207.2 t·hm<sup>-2</sup>(鲜质量),复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15)年均施用量为 10.6 t·hm<sup>-2</sup><sup>[15]</sup>。设施菜地荒废后去除上覆保温措施、撂荒。

### 1.2 样品采集与测试

选取农田(对照)、种植 6 a 设施菜地及荒废 12 a 设施菜地为研究对象。上述 3 类样地在空间上相邻,均处于 500 m×500 m 的范围内。农田选择 3 个 20 m×20 m 的样方,设施菜地及荒废设施菜地每类样地选择 3 个相邻的大棚。在上述各样方或大棚内,按“S”形布点,采集 10 个土样(0~20 cm)、混匀。实验室内手工去除根系、石块及土壤动物等。一部分样品风干、研磨、过 2 mm 筛,并取部分过 2 mm 筛的风干土继续研磨、过 0.15 mm 筛,采用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量,开氏法测定全氮含量,比重计法测定土壤机械组成(2~0.05,0.05~0.002 mm,<0.002 mm),烘干法测定土壤含水率,湿筛法分离大团聚体(2~0.25 mm)并测定其有机碳含量,电位法测定土壤 pH<sup>[19]</sup>;取部分过 2 mm 筛风干土样提取土壤颗粒碳(POM)<sup>[20]</sup>,采用重铬酸钾容量法测定其有机碳含量<sup>[21]</sup>;采用 Rey 等<sup>[21]</sup>的方法测试土壤最大持水量(WHC)。另一部分新鲜土样 4 ℃冷藏,用于培养实验。土壤理化性质见表 1。

### 1.3 室内培养实验

将 50 g(干质量)新鲜土样置于 500 mL 广口瓶内,调节土壤含水率至 60% WHC,随即称量。将广口瓶分别置于 25、35 ℃恒温培养箱中培养 400 d。每个处理 3 个重复。培养实验的第 1、7、14、21、28、42、56、70、84、112、148、168、196、286、400 d 取样。取样前,将

表 1 土壤理化性质

Table 1 Basic characteristics of soil samples from the research sites

| 土地利用方式 | 有机碳/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 全氮/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 大团聚体<br>含量/% | 大团聚体有机碳含量/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 颗粒有机碳含量/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 砂粒/%       | 粉粒/%      | 黏粒/%      | pH       |
|--------|----------------------------|---------------------------|--------------|----------------------------------|--------------------------------|------------|-----------|-----------|----------|
| 农田     | 13.4±0.8b                  | 1.0±0.1b                  | 6.4±2.2c     | 39.0±0.1b                        | 3.4±0.4c                       | 21.3±0.6b  | 57.9±0.1a | 20.9±0.6a | 6.5±0.1b |
| 设施菜地   | 26.3±0.3a                  | 3.5±0.2a                  | 19.8±0.7a    | 54.9±0.8a                        | 11.8±0.5a                      | 23.8±1.2ab | 53.7±1.1b | 22.5±0.1a | 6.9±0.2a |
| 荒废设施菜地 | 13.4±0.9b                  | 1.3±0.1b                  | 14.0±1.4b    | 32.8±2.2c                        | 5.8±0.1b                       | 26.2±1.1a  | 52.5±1.1b | 21.3±0.1a | 7.0±0.2a |

注:同列不同小写字母代表不同土地类型之间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase in each column indicate significant differences among means( $P<0.05$ ).

广口瓶通风、用背景空气置换瓶内气体,然后用带三通的胶塞将广口瓶密封,密封 0、24 h 用带三通的注射器分别抽取 20 mL 瓶内气体,用气相色谱(Agilent 7890A,美国)测定样品  $\text{CO}_2$  浓度,并根据前、后两次样品  $\text{CO}_2$  浓度差,计算土壤有机碳矿化速率。采样结束后去掉胶塞,将瓶口用多层纱布罩住,即保证瓶内空气流通,又减缓瓶内水分损耗。每隔 2~3 d 采用称量法补充土壤水分,使土样保持相对恒定的含水率。

土壤有机碳矿化的温度敏感性系数( $Q_{10}$ )采用 Fissore 等<sup>[22]</sup>提出的方法计算,具体如下:

$$Q_{10} = (R_1/R_2) \exp [10 / (LIT_1 - LIT_2)]$$

式中: $LIT_1$  代表 35 ℃; $LIT_2$  代表 25 ℃; $R_1$  代表 35 ℃时的  $\text{CO}_2$  排放量; $R_2$  代表 25 ℃时的  $\text{CO}_2$  排放量。

土壤有机碳易分解、难分解组分的  $Q_{10}$  根据 Conant 等<sup>[23]</sup>提出的方法计算:首先,将土样的培养时间延长至各处理的土壤有机碳累积矿化量均超过其土壤有机碳含量的 7%。其次,选择适当函数拟合培养时间及其对应的土壤有机碳累积矿化量的关系。再次,根据所得函数计算参数  $T_1$ 、 $T_2$  及  $Q_{10}$ ,具体如下:

$$Q_{10} = T_1 / T_2$$

式中:当  $Q_{10}$  代表土壤有机碳易分解组分的温度敏感性系数时, $T_1$ 、 $T_2$  分别代表为 25、35 ℃条件下,培养实验开始至有机碳累积矿化量为土壤有机碳含量的 1% 时所需的时间;当  $Q_{10}$  代表土壤有机碳难分解组分的温度敏感性系数时, $T_1$ 、 $T_2$  分别代表在 25、35 ℃条件下,有机碳累积矿化量为土壤有机碳含量的 6%~7% 时所需的时间。

#### 1.4 交互作用类型的确定

交互作用类型的确定参照如下方法<sup>[24]</sup>,并进行适当调整:25 ℃条件下农田土壤有机碳累积矿化量定为  $A_0$ ;增温(25 ℃升至 35 ℃)对农田土壤有机碳累积矿化量的促进作用定义为  $T_0$ ;25 ℃条件下,设施菜地(或荒废设施菜地)与农田累积矿化量的差值定义为  $A_1$ ,代表农田转变为设施菜地(或荒废设施菜地)后对土壤有机碳矿化的影响;增温与农田转变为设施菜地(或荒废设施菜地)对土壤有机碳矿化交互作用的理论值为  $B_0$ , $B_0 = A_0 + T_0 + A_1$ 。35 ℃条件下,设施菜地(或荒废设施菜地)土壤有机碳累积矿化量代表增温与农田转变为设施菜地(或荒废设施菜地)对土壤有机碳矿化交互作用的实测值( $B_1$ )。(1)当  $B_0$  显著大于  $B_1$  ( $P < 0.05$ ),交互作用类型为负效应(Antagonistic effect),表明单因素影响之和大于实际交互作用。(2)当  $B_0$  显著小于  $B_1$  ( $P < 0.05$ ),交互作用类型为正效应(Syner-

gistic effect),表明单因素影响之和小于实际交互作用;(3)当  $B_0$  与  $B_1$  无明显差异( $P > 0.05$ ),交互作用类型为加和效应(Additive effect),即单因素影响之和等于实际交互作用。

#### 1.5 数据处理

土壤理化性质、有机碳累积矿化量及  $Q_{10}$  值在不同样地类型间的差异采用单因素方差分析(LSD 法)。土地利用方式及培养温度对土壤有机碳累积矿化量的交互影响采用双因素方差分析。有机碳累积矿化量与各因素相关性采用 Pearson 相关分析。统计显著水平  $\alpha = 0.05$ 。采用 SPSS 13.0 软件统计分析相关数据。采用 Origin 8.0 软件作图。

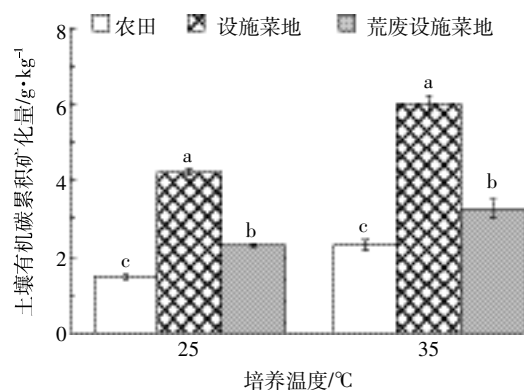
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质

由表 1 可知,设施菜地土壤有机碳、全氮、大团聚体及其有机碳含量、颗粒有机碳含量显著高于农田 ( $P < 0.05$ ),分别为农田的 1.96、3.50、3.09、1.41、3.47 倍。设施菜地荒废后土壤有机碳及全氮含量降至农田水平,但大团聚体及其颗粒有机碳含量仍显著高于农田 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 土壤有机碳累积矿化量

由图 1 可知,25 ℃和 35 ℃条件下,设施菜地、荒废设施菜地和农田的土壤有机碳累积矿化量分别为  $4.23 \pm 0.08$ 、 $2.29 \pm 0.07$ 、 $1.48 \pm 0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $6.02 \pm 0.21$ 、 $3.26 \pm 0.24$ 、 $2.31 \pm 0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。增温使农田、设施菜地及荒废设施菜地土壤有机碳累积矿化量分别增加 56.08%、42.32%、42.36% ( $P < 0.01$ )。农田转变为设施菜地加快土壤有机碳矿化(图 2,  $P < 0.05$ ),其有机碳累



小写字母代表不同样地间累积矿化量差异显著 ( $P < 0.05$ )  
Different lowercase letters indicate significant differences among the three land use types ( $P < 0.05$ )

图 1 研究区土壤有机碳累积矿化量

Figure 1 Cumulative decomposition of soil organic carbon

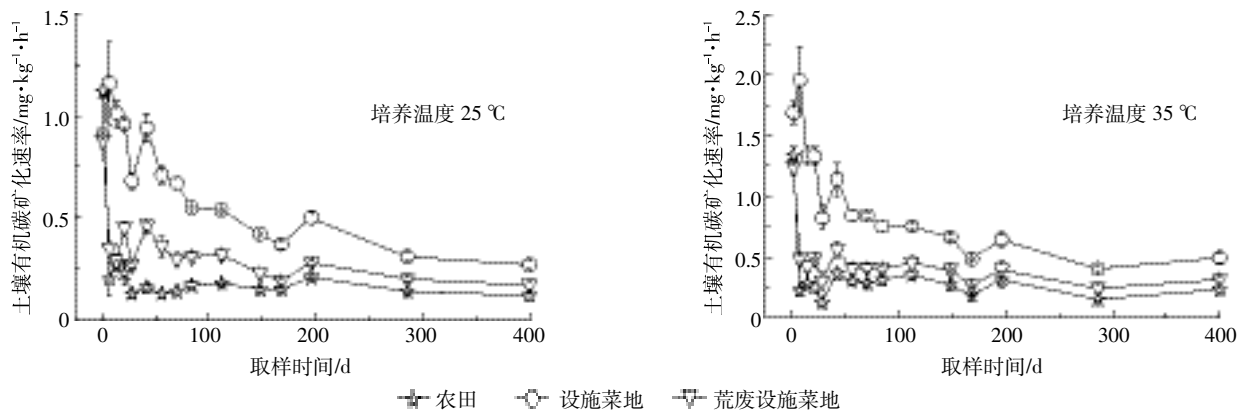
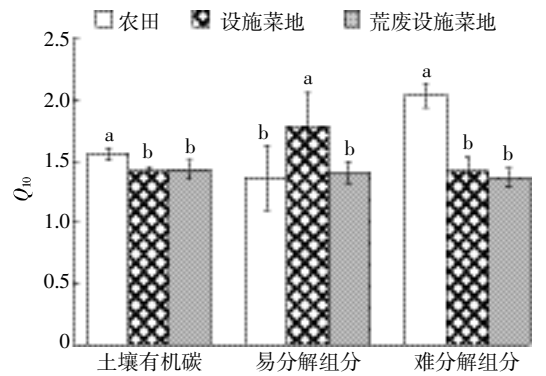


图 2 研究区土壤有机碳矿化速率  
Figure 2 Rate of soil organic carbon decomposition

积矿化量分别增加了 185.81%(25 °C)、160.61%(35 °C)。设施菜地荒废后土壤有机碳矿化速率明显下降,但仍高于农田( $P<0.05$ )。荒废设施菜地土壤有机碳累积矿化量较农田分别增加了 54.73%(25 °C)、41.13%(35 °C)。由表 2 可知,土壤有机碳累积矿化量分别与土壤有机碳、全氮、大团聚体有机碳、颗粒有机碳含量及 pH 呈显著正相关关系( $P<0.01$ )。

### 2.3 土壤有机碳矿化温度敏感性系数( $Q_{10}$ )

由图 3 可知,农田转变为设施菜地及设施菜地荒废后,土壤有机碳矿化及有机碳难分解组分矿化的 $Q_{10}$ 值均显著降低( $P<0.05$ )。农田、设施菜地及荒废设施菜地土壤有机碳矿化的 $Q_{10}$ 均值分别为 1.56、1.42、1.43,土壤有机碳难分解组分矿化的 $Q_{10}$ 均值分别为 2.04、1.42、1.37。然而,农田转变为设施菜地后,土壤有机碳易分解组分矿化的 $Q_{10}$ 值明显升高( $P<0.05$ ),农田、设施菜地及荒废设施菜地土壤有机碳易分解组分矿化的 $Q_{10}$ 均值分别为 1.37、1.79、1.41,表明农田转变为设施菜地增强土壤有机碳易分解组分矿化对温度的响应程度。



小写字母代表不同样地间 $Q_{10}$ 值差异显著( $P<0.05$ )  
Different lowercase letters indicate significant differences among the three different land use types( $P<0.05$ )

图 3 土壤有机碳矿化温度敏感性系数( $Q_{10}$ )值  
Figure 3  $Q_{10}$  value of soil organic carbon decomposition

### 2.4 土地利用方式与温度对土壤有机碳矿化的交互作用

土地利用方式与温度对土壤有机碳累积矿化量有明显交互作用( $P<0.001$ ,表 3)。由图 4 可知,农田

表 2 土壤有机碳累积矿化量与环境因子间相关分析结果

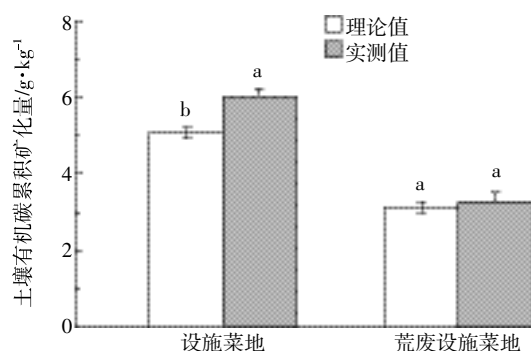
| Table 2 The Pearson's relationships between cumulative SOC decomposition and environment factors |          |        |        |         |           |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|--------|---------|-----------|--------|
| 项目                                                                                               | 有机碳累积矿化量 | 有机碳含量  | 全氮含量   | 颗粒有机碳含量 | 大团聚体有机碳含量 | pH     |
| 有机碳累积矿化量                                                                                         | 1        | 0.87** | 0.89** | 0.88**  | 0.90**    | 0.68** |
| 有机碳含量                                                                                            |          | 1      | 0.99** | 0.99**  | 0.96**    | 0.57*  |
| 全氮含量                                                                                             |          |        | 1      | 0.99**  | 0.98**    | 0.64** |
| 颗粒有机碳含量                                                                                          |          |        |        | 1       | 0.97**    | 0.60** |
| 大团聚体有机碳含量                                                                                        |          |        |        |         | 1         | 0.76   |
| pH                                                                                               |          |        |        |         |           | 1      |

注:\*\* 显著性差异  $P<0.01$ 。\* 显著性差异  $P<0.05$ 。  
Note: \*\* Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed). \* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed).

表3 土地利用方式与培养温度对土壤有机碳矿化的  
双因素方差分析结果

Table 3 Two-way ANOVA analysis

| 项目          | <i>F</i> | <i>P</i> |
|-------------|----------|----------|
| 培养温度        | 273.357  | <0.001   |
| 土地利用方式      | 711.671  | <0.001   |
| 培养温度×土地利用方式 | 12.074   | <0.001   |



小写字母代表理论与实测值之间差异显著( $P<0.05$ )  
Different lowercase letters indicate significant differences  
between theoretical and experimental values( $P<0.05$ )

图4 土地利用方式与培养温度对土壤有机碳矿化交互作用的  
理论与实测值

Figure 4 Theoretical and experimental values for cumulative  
SOC decomposition

转变为设施菜地与增温对土壤有机碳矿化交互作用的理论值小于实测值( $P<0.05$ ),表明交互作用的类型为正效应,即农田转变为设施菜地与增温对土壤有机碳矿化的交互作用明显大于两因素单独影响之和( $P<0.05$ )。然而设施菜地荒废后与增温对土壤有机碳矿化交互作用的理论值与实测值无显著差异,故产生加和效应。

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用方式及温度对土壤有机碳矿化的影响

耕作措施是影响农业土壤碳排放的重要因素。其中,施用有机肥<sup>[7]</sup>及氮肥<sup>[25]</sup>显著促进土壤碳排放。此外,有研究发现,好气条件下农业土壤大团聚体有机碳累积矿化量明显大于其他粒级团聚体,表明大团聚体有机碳是农业土壤有机碳矿化的主要贡献者<sup>[26]</sup>。相比传统农田(如冬小麦-玉米轮作),设施菜地种植过程中施用大量有机肥(以禽畜粪便为主)及氮肥<sup>[7,15,17]</sup>,设施菜地荒废后停止施肥,致使土壤有机碳、大团聚体有机碳、颗粒有机碳及全氮含量随土地利用方式变化呈先升后降趋势( $P<0.05$ ,表1);且上述指标分别与土壤有机碳累积矿化量呈显著正相关关系( $P<$

0.01,表2)。表明施肥是导致研究区不同土地利用方式下土壤有机碳累积矿化量改变的主要原因(图1)。此外,有研究表明,传统农田转变为设施菜地显著增加土壤磷脂脂肪酸(PLFA)总量及土壤细菌数量<sup>[9,27]</sup>,且有机肥配施氮肥为设施菜地土壤微生物创造较适宜生存环境,使其保持较高的群落功能多样性和碳源利用能力<sup>[28]</sup>。据此推测,研究区设施菜地有机肥配施复合肥增加了土壤微生物生物量,提高土壤微生物群落功能多样性及其对碳源的利用能力,加速土壤有机碳矿化。

增温显著提高土壤有机碳矿化( $P<0.05$ ,图1和图2),这与大多数研究的结论相似<sup>[9-12]</sup>。升温 $10^{\circ}\text{C}$ 后,农田、设施菜地及荒废设施菜地土壤有机碳累积矿化量分别为增温前的1.56、1.42、1.42倍,这与土壤有机碳矿化及难分解有机碳组分矿化温度敏感性系数( $Q_{10}$ )的变化趋势相同,即农田转变为设施菜地后,土壤有机碳矿化的温度敏感性有所下降(图3)。研究发现,土壤碳排放的 $Q_{10}$ 值随着温度升高而下降,因为微生物对较高温度条件有所适应<sup>[29]</sup>。相对于传统农田,研究区设施菜地的保温措施使其土壤温度高于农田<sup>[9]</sup>。设施菜地土壤微生物对较高的土壤温度条件具有一定适应性,升温虽能促进设施土壤碳排放,但其增幅较农田有所下降,导致 $Q_{10}$ 值低于农田。设施菜地种植过程中施用的有机肥以禽畜粪便为主<sup>[9,18,20]</sup>,其中含有较多的易分解有机碳组成(表1),且农田转变为设施菜地后土壤有机碳易分解组分的 $Q_{10}$ 值明显升高( $P<0.05$ ,图3)。意味着设施菜地高温、持续且大量施加有机肥等将加速土壤有机碳易分解组分的矿化,导致设施菜地土壤有机碳累积矿化量明显大于农田。

#### 3.2 土地利用方式与温度对土壤有机碳矿化的交互作用

土地利用方式变化及增温对土壤有机碳矿化有明显交互作用(表3),且交互作用的类型存在差异(图4)。农田转变为设施菜地及增温对土壤有机碳矿化的交互作用类型为正效应。本研究区农田转变为设施菜地后土壤有机碳易分解组分的 $Q_{10}$ 值升高。表明相同增温条件下,设施菜地土壤有机碳易分解组分矿化速率提升幅度大于农田,且设施菜地土壤颗粒有机碳含量高于农田(表1)。因此,相同增温条件下,设施菜地土壤有机碳累积矿化量平均增幅( $1.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )大于农田( $0.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),产生正效应。然而,设施菜地荒废后土壤有机碳易分解组分的 $Q_{10}$ 值较农田无显著

变化(图3),因此交互作用类型变为加和效应(图4)。说明不同土地利用方式土壤有机碳易分解组分 $Q_{10}$ 值的变化是引起交互作用类型改变的主要原因。此外,近期研究发现,增温与施用氮肥对土壤碳排放产生非加和效应<sup>[30]</sup>。增温促进土壤氮矿化,该内源氮的释放对土壤有机碳矿化产生进一步的影响,使温度和施用氮素对土壤有机碳矿化的交互作用为非加和效应<sup>[16]</sup>。设施菜地种植过程中施加大量有机肥<sup>[14-15,17]</sup>,增温可以大幅促进设施菜地土壤氮素矿化,增加土壤内源氮释放。且土壤氮含量与有机碳累积矿化量呈显著正相关关系(表2),土壤内源氮释放能进一步促进土壤有机碳矿化,产生正效应。然而,设施菜地荒废后停止施肥,增温对土壤内源氮素矿化的促进作用不足以显著影响土壤有机碳矿化,故产生加和效应。

土壤碳排放过程是各影响因素综合作用的结果,以往的研究多侧重各因素对土壤碳排放过程的单独影响<sup>[5-6,8,14]</sup>。本研究发现,增温与农田转变为设施菜地对土壤碳排放过程的综合影响大于单因素影响之和。如果利用单因素对土壤碳排放影响之和预测多因素的交互作用,可能低估土壤碳排放水平。因此,今后应注重多因素对土壤碳排放过程的交互作用研究,以深入认识各因素对土壤碳排放过程的综合影响。

## 4 结论

(1)农田转变为设施菜地后,土壤有机碳累积矿化显著增加。设施菜地荒废12 a后,土壤有机碳累积矿化量虽显著下降,但仍大于农田。

(2)增温显著促进土壤有机碳矿化。农田转变为设施菜地后,土壤有机碳及其难分解组分矿化的 $Q_{10}$ 值显著降低。但有机碳易分解组分的 $Q_{10}$ 值却显著增加,加速设施菜地土壤有机碳易分解组分的矿化。

(3)由于农田转变为设施菜地后有机碳易分解组分的 $Q_{10}$ 值明显增加,农田转变为设施菜地与增温对土壤有机碳矿化交互作用类型为正效应。然而,设施菜地荒废后土壤有机碳易分解组分的 $Q_{10}$ 值较农田无显著变化,故交互作用类型变为加和效应。因此,应加强多因素对土壤碳排放过程的交互作用研究。

## 参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] IPCC. The Physical Science Basis-Working Group I Contribution to IPCC Fourth Assessment Report[R]. London: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [4] Eagle A J, Olander L P. Greenhouse gas mitigation with agricultural land management activities in the United States: A side-by-side comparison of biophysical potential[J]. *Advances in Agronomy*, 2012, 115: 79-179.
- [5] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(12): 2420-2430.  
ZHANG Qian-bing, YANG Ling, WANG Jin, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12): 2420-2430.
- [6] Yan Z F, Liu C X, Todd-Brown K E, et al. Pore-scale investigation on the response of heterotrophic respiration to moisture conditions in heterogeneous soils[J]. *Biogeochemistry*, 2016, 131: 121-134.
- [7] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1445-1451.  
ZANG Yi-fei, HAO Ming-de, ZHANG Li-qiong, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1445-1451.
- [8] Lavoie M, Mack M C, Schuur E A G. Effects of elevated nitrogen and temperature on carbon and nitrogen dynamics in Alaskan arctic and boreal soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G3): 130-137.
- [9] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 858-861.
- [10] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, et al. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature[J]. *Nature*, 2005, 433(7021): 57-59.
- [11] Vanhala P, Karhu K, Tuomi M, et al. Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 2967-2970.
- [12] 张晓东, 李东, 张峰. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型土壤养分及活性有机碳组分研究[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 55-62.  
ZHANG Xiao-dong, LI Dong, ZHANG Feng. Variation of soil nutrients and soil active organic carbon under different land use patterns in Aibinur Lake region of Xinjiang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 55-62.
- [13] Arevalo C B M, Chang S X, Bhatti J S, et al. Mineralization potential and temperature sensitivity of soil organic carbon under different land uses in the parkland region of Alberta, Canada[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(1): 241-251.
- [14] 高新昊, 张英鹏, 刘兆辉, 等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1452-1459.  
GAO Xin-hao, ZHANG Ying-peng, LIU Zhao-hui, et al. Effects of cultivating years on soil ecological environment in greenhouse of Shouguang City, Shandong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1452-1459.
- [15] 曾希柏, 白玲玉, 苏世鸣, 等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸

- 化与盐渍化[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1853–1859.
- ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, SU Shi-ming, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1853–1859.
- [16] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155–165.
- ZHAO Ya-li, XUE Zhi-wei, GUO Hai-bin, et al. Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanisms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 155–165.
- [17] 曾希柏, 白玲玉, 李莲芳, 等. 山东寿光不同利用方式下农田土壤有机质和氮磷钾状况及其变化[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3737–3746.
- ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, LI Lian-fang, et al. The status and changes of organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium under different soil using styles of Shouguang of Shandong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3737–3746.
- [18] 山东土壤肥料工作站. 寿光土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 166–411.
- Shandong Workstation of Soil and Fertilizer. Shandong soils[M]. Beijing: Agricultural Press, 1994: 166–411.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12–288.
- LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12–288.
- [20] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- [21] Rey A, Petsikos C, Jarvis P G, et al. Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(5): 589–599.
- [22] Fissore C, Giardina C P, Kolka R K, et al. Soil organic carbon quality in forested mineral wetlands at different mean annual temperature[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(3): 458–466.
- [23] Conant R T, Drijber R A, Haddix M L, et al. Sensitivity of organic matter decomposition to warming varies with its quality[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(4): 868–877.
- [24] Tao B X, Song C C, Guo Y D. Short-term effects of nitrogen additions and increased temperature on wetland soil respiration, Sanjiang Plain, China[J]. *Wetlands*, 2013, 33(4): 727–736.
- [25] Huang Z Q, Clinton P W, Baisden W T, et al. Long-term nitrogen additions increased surface soil carbon concentration in a forest plantation despite elevated decomposition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 302–307.
- [26] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 等. 好气与淹水条件下水稻土各粒级团聚体有机碳矿化量[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1944–1950.
- HAO Rui-jun, LI Zhong-pei, CHE Yu-ping, et al. Organic carbon mineralization in various size aggregates of paddy soil under aerobic and submerged conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1944–1950.
- [27] 宋蒙亚, 李忠佩, 吴 萌, 等. 不同种植年限设施菜地土壤微生物量和群落结构的差异[J]. 中国农业科学, 2015, 48(28): 3635–3644.
- SONG Meng-ya, LI Zhong-pei, WU Meng, et al. Changes in soil microbial biomass and community structure with cultivation chronosequence of greenhouse vegetables[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(28): 3635–3644.
- [28] 李 猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 44–53.
- LI Meng, ZHANG En-ping, ZHANG Shu-hong, et al. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 44–53.
- [29] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413: 622–625.
- [30] Hu Y W, Zhang L, Deng B L, et al. The non-additive effects of temperature and nitrogen deposition on CO<sub>2</sub> emissions, nitrification, and nitrogen mineralization in soils mixed with termite nests[J]. *Catena*, 2017, 154: 12–20.