

DOI: 10.20103/j.stxb.202307011403

吴丹咏, 王秀君, 雷慧闽. 华北平原冬小麦-夏玉米农田生态系统土壤自养和异养呼吸模型构建. 生态学报, 2024, 44(6): 2364-2378.

Wu D Y, Wang X J, Lei H M. Soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration models for winter wheat-summer maize rotation cropland in the North China Plain. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2364-2378.

# 华北平原冬小麦-夏玉米农田生态系统土壤自养和异养呼吸模型构建

吴丹咏<sup>1</sup>, 王秀君<sup>1</sup>, 雷慧闽<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

<sup>2</sup> 清华大学水利水电工程系, 北京 100084

**摘要:** 土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要过程, 准确估算土壤呼吸对估算陆地生态系统碳源汇具有重要意义。通过在华北平原典型农田内开展土壤呼吸及其组分的原位观测实验, 构建了适用于华北平原冬小麦-夏玉米轮种制农田生态系统的半经验半机理土壤异养呼吸和土壤自养呼吸模型。结果表明, 冬小麦-夏玉米农田土壤异养呼吸模型可表达为土壤温度和土壤水分的函数, 其中, 土壤温度对土壤异养呼吸的影响适合用 Arrhenius 方程描述, 而土壤水分的影响适合用对称的倒抛物线描述。验证表明, 该模型的  $R^2$  和 RMSE 分别为 0.68 和  $0.52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。土壤自养呼吸模型包括维持呼吸和生长呼吸两个模块, 其中, 维持呼吸表达为土壤温度和叶面积指数的函数, 其形式分别为 Van't Hoff 指数方程和米氏方程; 生长呼吸表达为总初级生产力与维持呼吸之差的线性函数。冬小麦季和夏玉米季土壤自养呼吸模型的结构相同, 但是两种作物的模型参数差异较大。验证表明, 冬小麦季土壤自养呼吸模型的  $R^2$  和 RMSE 分别为 0.64 和  $0.50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 夏玉米季土壤自养呼吸模型的  $R^2$  和 RMSE 分别为 0.67 和  $0.37 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。相比于不区分土壤异养呼吸和土壤自养呼吸的土壤总呼吸模型, 本研究构建的土壤异养呼吸和土壤自养呼吸模型能够更加准确地模拟土壤呼吸的季节变化和年际变化过程, 可为华北平原冬小麦-夏玉米轮种制农田生态系统的土壤呼吸估算提供方法依据。

**关键词:** 土壤异养呼吸; 土壤自养呼吸; 半经验半机理模型; 冬小麦-夏玉米; 华北平原

## Soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration models for winter wheat-summer maize rotation cropland in the North China Plain

WU Danyong<sup>1</sup>, WANG Xiujuan<sup>1</sup>, LEI Huimin<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

<sup>2</sup> Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** Soil respiration is an important process of carbon cycle in terrestrial ecosystem. Accurate estimation of soil respiration is of great significance for estimating terrestrial carbon sinks and carbon sources. The semi-mechanistic models of soil heterotrophic respiration and soil autotrophic respiration were developed for the winter wheat-summer maize rotation cropland through in situ observations of soil respiration and its components in a typical cropland in the North China Plain. The results showed that the soil heterotrophic respiration model for the winter wheat-summer maize cropland could be expressed by a function of soil temperature and soil moisture. In the soil heterotrophic respiration model, the effect of soil temperature on soil heterotrophic respiration was described by the Arrhenius equation, and the effect of soil moisture on soil heterotrophic respiration was described by the quadratic equation of symmetric inverted parabola appropriately. Based on the

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFD1900604)

收稿日期: 2023-07-01; 网络出版日期: 2023-12-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leihm@mail.tsinghua.edu.cn

validation by the filed observation, the values of  $R^2$  and RMSE for the soil heterotrophic respiration model were 0.68 and  $0.52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectively. The soil autotrophic respiration model consisted of two modules: the maintenance respiration module and the growth respiration module. In the maintenance respiration module, maintenance respiration was expressed by a function of soil temperature and leaf area index; in this function, the effect of soil temperature was described by the Van't Hoff exponential equation, and the effect of leaf area index was described by the Michaelis-Menten equation. In the growth respiration module, growth respiration was expressed by a linear function of the difference between gross primary production and maintenance respiration. The structures of soil autotrophic respiration models were the same for winter wheat and summer maize while the parameters for the soil autotrophic respiration models were quite different between the two crops. Based on the validation by the filed observation, the values of  $R^2$  and RMSE for the soil autotrophic respiration model of winter wheat were 0.64 and  $0.50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectively; and the values of  $R^2$  and RMSE for the soil autotrophic respiration model of summer maize were 0.67 and  $0.37 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectively. This study demonstrated that developing soil heterotrophic respiration model and soil autotrophic respiration model separately could more accurately simulate the seasonal and interannual variations of soil respiration compared with using total soil respiration model. The soil heterotrophic respiration model and soil autotrophic respiration model developed in this study can provide a method for better estimating soil respiration in the winter wheat-summer maize rotation cropland ecosystem in the North China Plain.

**Key Words:** soil heterotrophic respiration; soil autotrophic respiration; semi-mechanistic model; winter wheat-summer maize; North China Plain

土壤呼吸( $R_s$ )是陆地生态系统碳循环的重要过程,在全球尺度上约占陆地总初级生产力(GPP)的50%<sup>[1-2]</sup>,也是碳源汇估算不确定性的主要来源<sup>[1, 3]</sup>。土壤呼吸包括土壤异养呼吸( $R_h$ ,以下简称“异养呼吸”)和土壤自养呼吸( $R_{ab}$ ,以下简称“自养呼吸”)<sup>[4-5]</sup>。异养呼吸来源于土壤微生物分解有机质所产生的 $\text{CO}_2$ 排放<sup>[6, 7]</sup>,主要受土壤温度和土壤水分的影响<sup>[5, 8-9]</sup>。自养呼吸是植物根系呼吸产生 $\text{CO}_2$ 的过程,其消耗的底物来源于植物光合作用产物向地下分配的部分<sup>[10]</sup>,因此除温度外,还受植被因子的影响<sup>[11-14]</sup>。由于两种呼吸的底物来源和影响因素不同,分别模拟异养呼吸和自养呼吸是提高土壤呼吸模拟精度的主要途径之一<sup>[5, 15]</sup>。

然而,受限于异养呼吸和自养呼吸观测资料的缺乏,已有研究主要集中于开发不区分异养呼吸和自养呼吸的土壤总呼吸模型<sup>[1, 16-24]</sup>,异养呼吸和自养呼吸模型依旧缺乏。根据模型原理,土壤呼吸模型可大致分为三类:经验或统计模型、半经验半机理模型和基于过程的机理模型<sup>[25]</sup>。三类模型的共性是模型参数依赖于气候、土壤和植被条件。不同之处在于,经验或统计模型为最优的数学拟合方程<sup>[26]</sup>,未考虑土壤呼吸的机理过程,在观测数据时空代表性不足时,可能无法准确模拟土壤呼吸的时空变化<sup>[27]</sup>。基于过程的机理模型可较好地模拟土壤呼吸的时空变化,并可用于预测其未来变化<sup>[5, 28]</sup>,但这类模型需要大量土壤、养分和植被参数作为输入,而这些参数的可获得性和不确定性制约了其发展<sup>[25]</sup>。半经验半机理模型对土壤呼吸的机理过程进行概化<sup>[17, 29]</sup>,并引入卫星遥感数据(如遥感土壤水分和植被指数)作为其状态变量,可降低模型的不确定性,是目前土壤呼吸模型的主要发展方向之一,但不同生态系统的模型结构和参数研究仍不足。

华北平原是中国主要粮食产区之一,其农田面积占我国农田总面积的18.6%<sup>[30]</sup>,主要为冬小麦-夏玉米轮作系统。目前,针对此类农田生态系统开发的土壤呼吸模型均为土壤总呼吸模型,如以遥感数据(地表温度、土壤水分、GPP、归一化植被指数、增强植被指数)作为输入变量的统计模型<sup>[1]</sup>和考虑土壤温度、土壤水分、叶面积指数(LAI)和土壤有机碳(SOC)的生物物理模型<sup>[29]</sup>。然而,尚没有适合的异养呼吸和自养呼吸模型,这可能给本区域乃至中国农田碳循环模拟带来较大不确定性。因此,本研究通过在华北平原典型冬小麦-夏玉米轮作制农田开展异养呼吸和自养呼吸原位观测,构建适用于冬小麦-夏玉米农田生态系统的半经验半机理异养呼吸和自养呼吸模型,从而为华北平原的土壤呼吸估算提供方法。

## 1 观测站概况

本研究的观测站点为位于华北平原中部的清华大学位山引黄灌区生态水文观测站(36°39'N, 116°03'E)。该站点多年平均气温为 13.3°C, 多年平均降水为 532 mm/a, 降水主要分布在 6—8 月。土壤类型为粉砂壤土。站点所在农田种植类型为典型的冬小麦-夏玉米轮种: 冬小麦通常在 10 月初播种, 并于次年 6 月初收割; 夏玉米在冬小麦收割后播种, 当年 10 月初收割。夏玉米收割之后进行一次翻耕, 冬小麦收割之后不进行翻耕。两种作物收割后全部实现秸秆还田。表层 20 cm 内土壤有机碳含量为 11.32 gC/kg, 氮含量为 1.16 gN/kg; 20—40 cm 内土壤有机碳含量为 5.71 gC/kg, 氮含量为 0.55 gN/kg(2010 年测量值)。表层 5 cm 的土壤凋萎含水率、田间持水率及饱和含水率分别为 0.10、0.33 和 0.45 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 观测与数据

#### 2.1.1 土壤呼吸观测

土壤呼吸观测实验开展于 2009—2011 年间, 包括 3 个冬小麦和 2 个夏玉米生长季, 其中 2009—2010 年间仅测量土壤呼吸, 2011 年采用“根排除法”测量异养呼吸和自养呼吸。测量仪器为便携式土壤呼吸测量系统 LI-8100(LI-COR Inc., Lincoln, USA)。为获得异养呼吸和自养呼吸的季节变化过程, 除雨天及其他田间条件不适合测量的情况外, 每日于 13:00—15:00 点间开展测量。此外, 为掌握土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸的日内变化特征, 选择冬小麦典型生育期中的 6 d 开展了土壤呼吸及其组分的日内变化过程监测。具体观测方案详见文献<sup>[31—32]</sup>。由于本研究测量的小时尺度土壤呼吸值无法代表日均值, 本研究利用实测的土壤呼吸日内变化过程数据, 建立了土壤呼吸日均值与 13:00—15:00 点测量值之间的经验关系, 并通过该关系将小时尺度的土壤呼吸实测值升尺度至日均值。

#### 2.1.2 其他相关因子观测

本研究使用的其他相关数据来自于站点通量观测塔的连续观测, 包括 2005—2020 年间的逐日 GPP、生态系统呼吸(ER)、5 cm 深度处的土壤温度和土壤含水率<sup>[33]</sup>。逐日 LAI 来源于基于卫星遥感数据和地面实测数据的计算结果<sup>[34]</sup>。根据涡度相关技术测量的 GPP 和 ER, 以及便携式土壤呼吸测量系统测量的  $R_h$ , 可根据以下公式计算日净初级生产力(NPP):

$$NPP = GPP - (ER - R_h) \quad (1)$$

### 2.2 模型构建

本研究构建模型的基本思路是:(1)借鉴已有研究中广受认可的半经验半机理模型结构;(2)模型能以卫星遥感数据作为输入变量, 以便应用于区域尺度。据此, 本研究构建了不同形式的半机理半经验模型, 再结合已有典型模型, 通过实测数据确定最优的模型结构及参数。此外, 为对比异养呼吸与自养呼吸分开建模方法与土壤总呼吸建模方法的差异, 本研究也构建了最优的土壤总呼吸模型。

#### 2.2.1 土壤异养呼吸模型

土壤温度被认为是影响异养呼吸的最主要因素<sup>[35]</sup>, 升温可以通过提高土壤微生物和酶的活性促进土壤有机质的分解。许多研究采用 Van't Hoff 指数方程(式 2)描述土壤温度与异养呼吸的关系<sup>[31, 36—38]</sup>, 如表 1 中的模型 1—2。

$$R_h = \alpha e^{\beta T} = \alpha Q_{10}^{\frac{T-10}{10}} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$  为经验参数,  $T$  为土壤温度,  $Q_{10}$  为温度增加 10°C 所引起的呼吸速率改变的商( $Q_{10} = e^{10\beta}$ )。

Van't Hoff 方程的  $Q_{10}$  值是恒定的, 在低温时可能低估异养呼吸, 而在高温时可能高估异养呼吸<sup>[35]</sup>。相比之下, Arrhenius 方程(式 3)能够表征温度升高时异养呼吸温度敏感性的降低(式 4)。因此, 研究也采用该方程描述异养呼吸与温度的关系(表 1 中的模型 3—4)。

$$R_h = \alpha e^{\beta(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} \quad (3)$$

$$Q_{10} = e^{\beta(\frac{1}{T-T_0} - \frac{1}{T+10-T_0})} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$  为经验参数,  $T$  为土壤温度,  $T_{ref}$  是参比温度(15°C);  $T_0$  是异养呼吸的温度下限, 为-46°C<sup>[35]</sup>。

土壤水分是影响异养呼吸的另一重要因子。通常认为水分增多可增强土壤微生物的细胞活性, 提高土壤呼吸速率, 但水分含量过高可导致土壤内氧气不足, 进而使好氧微生物的活性受到抑制, 引起呼吸速率下降<sup>[39-40]</sup>。因此, 本研究采用抛物线形式的二次曲线方程来描述土壤水分对异养呼吸的影响<sup>[19, 36-37, 41-43]</sup>。其中, 模型 3 的土壤水分参数化方案是对称的倒抛物线形式, 当土壤含水率为 0 时, 异养呼吸值为 0; 模型 4 的土壤水分参数化方案为非对称的倒抛物线形式, 参数  $\gamma$  为形状调节系数(表 1)。

表 1 土壤异养呼吸模型

Table 1 List of the soil heterotrophic respiration models

模型编号 Model number	模型结构 Model structure	来源 Source	模型编号 Model number	模型结构 Model structure	来源 Source
1	$R_h = \alpha e^{\beta T} (\gamma \theta + \delta \theta^2)$	[37]	3	$R_h = \alpha e^{\beta(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} (\gamma \theta + \delta \theta^2)$	本研究
2	$R_h = \alpha e^{\beta T} (\theta - \theta_{min}) (\theta_{max} - \theta)^\gamma$	[36]	4	$R_h = \alpha e^{\beta(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} (\theta - \theta_{min}) (\theta_{max} - \theta)^\gamma$	本研究

$R_h$ : 土壤异养呼吸 Soil heterotrophic respiration;  $T$ : 土壤温度 Soil temperature;  $T_{ref}$ : 参比温度 Reference temperature;  $T_0$ : 土壤温度下限 Lowest soil temperature;  $\theta$ : 土壤含水率 Soil moisture;  $\theta_{min}$ : 土壤凋萎含水率 Wilting point of soil water content;  $\theta_{max}$ : 土壤饱和含水率 Saturated soil water content;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ : 经验参数 Empirical parameter

### 2.2.2 土壤自养呼吸模型

已有研究通常将自养呼吸表征为维持呼吸( $R_m$ )与生长呼吸( $R_g$ )之和<sup>[5, 38, 44-45]</sup>, 如模型 1(表 2)。维持呼吸可为活细胞的正常活动提供能量, 主要控制因素是温度和底物可用性(即植物用于维持呼吸的底物量)<sup>[46]</sup>; 生长呼吸是光合作用固定 CO<sub>2</sub> 形成有机化合物的能量成本, 随植物体新累积的碳含量变化而变化<sup>[47]</sup>。维持呼吸与温度的关系可用 Van't Hoff 方程表达<sup>[38]</sup>。底物可用性的表征较为复杂, 可采用 GPP、NPP 或 LAI 表示<sup>[48-49]</sup>。维持呼吸与底物可用性的关系可用线性方程或米氏方程表达<sup>[29, 38, 44]</sup>。此外, 植物衰老引起的光合作用能力下降也会影响植物根系的维持呼吸, 因此我们也尝试引入修正系数反映叶片衰老阶段冠层光合能力的降低程度<sup>[38]</sup>。综上, 我们构建了自养呼吸模型 2—6(表 2)。

表 2 土壤自养呼吸模型

Table 2 List of the soil autotrophic respiration models

模型编号 Model number	模型结构 Model structure	来源 Source	模型编号 Model number	模型结构 Model structure	来源 Source
1	$R_m = \alpha \beta^{\frac{T-10}{10}} \text{NPPsR10}$ $R_g = \gamma (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab} = R_m + R_g$	[38, 44]	4	$R_m = \alpha \beta^{\frac{T-10}{10}} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI} + \gamma} \text{sR10}$ $R_g = \delta (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab} = R_m + R_g$	本研究
2	$R_m = \alpha \beta^{\frac{T-10}{10}} \text{GPPsR10}$ $R_g = \gamma (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab} = R_m + R_g$	本研究	4	$R_m = \alpha \beta^{\frac{T-10}{10}} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI} + \gamma} \text{sR10}$ $R_g = \delta (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab} = R_m + R_g$	本研究
3	$R_m = \alpha \beta^{\frac{T-10}{10}} \text{LAI sR10}$ $R_g = \gamma (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab} = R_m + R_g$	本研究	6	$R_m = \alpha e^{\beta(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI} + \gamma} \text{sR10}$ $R_g = \delta (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab} = R_m + R_g$	本研究

$R_m$ : 维持呼吸 Maintenance respiration;  $R_g$ : 生长呼吸 Growth respiration;  $R_{ab}$ : 土壤自养呼吸 Soil autotrophic respiration; GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity; LAI: 叶面积指数 Leaf area index; NPP: 前一天的净初级生产力 Net primary productivity a day before; sR10: 修正系数 Adjusted coefficient

sR10 的计算方法如下:

播种到成熟(即 LAI 达到峰值)时: sR10=1

$$\text{成熟到收获时: } sR10 = \frac{LAI}{LAI_{\max} C_s}$$

式中,  $C_s$  为修正因子, 取值为 1.2<sup>[38]</sup>,  $LAI_{\max}$  为作物生长期内 LAI 的最大值

### 2.2.3 土壤总呼吸模型

本研究选取了文献中较为典型的 3 种土壤总呼吸模型(表 3 中模型 1—3); 同时, 考虑植被、土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的影响, 构建了 4 种新的土壤总呼吸模型 4—7(表 3)。

表 3 土壤总呼吸模型

Table 3 List of the total soil respiration models

模型编号 Model number	模型结构 Model structure	来源 Source	模型编号 Model number	模型结构 Model structure	来源 Source
1	$R_s = \alpha e^{\beta T} (\theta - \theta_{\min}) (\theta_{\max} - \theta)^\gamma$	[36]	4	$R_s = (\alpha + \beta GPP) e^{\gamma(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} (\delta\theta + \mu\theta^2)$	本研究
2	$R_s = \alpha e^{\beta T} (\gamma\theta + \delta\theta^2)$	[37]	5	$R_s = (\alpha + \beta LAI) e^{\gamma(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} (\delta\theta + \mu\theta^2)$	本研究
3	$R_s = (\alpha + \beta LAI) e^{\gamma T} \theta$	[16]	6	$R_s = (\alpha + \beta LAI) e^{\gamma(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} (\theta - \theta_{\min}) (\theta_{\max} - \theta)^\delta$	本研究
7	$R_s = (\alpha + \beta LAI) e^{\gamma T} (\delta\theta + \mu\theta^2)$	本研究			

$R_s$ : 土壤呼吸 Soil respiration;  $\mu$ : 经验参数 Empirical parameter

### 2.3 参数率定与模型验证方法

本研究采用 Levenberg-Marquardt 算法以最小残差平方和为优化目标估计模型参数。为确保参数估计收敛到全局最优值, 根据已有的研究结果给定参数的初始值和取值范围。本研究分两步对模型进行验证。首先, 以 2011 年的观测数据为基础, 使用 Holdout 交叉验证方法率定和验证表 1—3 中的模型, 即随机选取 2/3 的数据用于参数率定, 剩余 1/3 的数据用于模型验证, 由于随机选取的数据具有偶然性, 我们将这一过程重复 100 次, 选取模型参数的平均值与评价指标的平均值作为最终结果。其次, 采用由 2011 年观测数据选定的最优异养呼吸、自养呼吸和总呼吸模型计算 2009—2010 年的土壤呼吸, 并采用土壤呼吸实测值对分开建模(即自养呼吸与异养呼吸分别模拟后求和, 简称 Rs1)和土壤总呼吸建模(简称 Rs2)这两种方法进行进一步验证。

### 2.4 模型评价指标

本研究采用皮尔逊相关系数的平方 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 和赤池信息准则 (AIC) 来评价模型的精度。 $R^2$  表示实测值和模拟值的相关性, 值越接近 1, 表示实测值和模拟值的线性关系越好; RMSE 表示实测值与模拟值之间的误差程度, 值越小表明模型误差越小; AIC 可综合表征模型复杂度(即参数数量的多少)和拟合优度(即 RMSE 的大小), AIC 值越小表明模型越好<sup>[50]</sup>。各评价指标的计算公式如下:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_o^i - \bar{y}_o) (y_s^i - \bar{y}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_o^i - \bar{y}_o)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_s^i - \bar{y}_s)^2}} \right)^2 \tag{5}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_o^i - y_s^i)^2}{n}} \tag{6}$$

$$AIC = n \ln \frac{\sum_{i=1}^n (y_o^i - y_s^i)^2}{n} + 2(K + 1) \tag{7}$$

式中,  $n$  为样本个数,  $y_o^i$  为实测值,  $\bar{y}_o$  为实测值的平均值,  $y_s^i$  为模拟值,  $\bar{y}_s$  为模拟值的平均值,  $K$  为模型参数的数量。

## 2.5 不同建模方法对比

为对比 Rs1 和 Rs2 两种建模方法模拟的冬小麦-夏玉米土壤呼吸在季节和年际变化上的差异,本研究以站点实测的 5 cm 深度处的日均土壤温度和土壤水分、LAI 和 GPP 作为输入,采用最优的异养呼吸、自养呼吸和总呼吸模型计算了 2005—2020 年间的逐日土壤呼吸值。采用冬小麦和夏玉米生长季内土壤呼吸的最大值、最小值和达到最值时的日期等指标来描述土壤呼吸的季节变化过程,采用变差系数(CV)、最大值、最小值以及线性趋势等指标来描述土壤呼吸的年际变化。

## 3 结果

### 3.1 冬小麦-夏玉米农田土壤异养呼吸模型

在模型 1—4 中(表 4),模型 3 的  $R^2$  最高、RMSE 最低、AIC 最小,因此选择模型 3 作为本站点的最优异养呼吸模型(图 1)。具体来说,模型 3 比模型 1 的  $R^2$  更高、RMSE 更低、AIC 更小,说明 Arrhenius 方程比 Van't Hoff 方程更适合于描述异养呼吸和土壤温度的关系,模型 4 和模型 2 的比较也可得出相同的结论。模型 3 比模型 4 的  $R^2$  更高、RMSE 更低、AIC 更小,说明对称的倒抛物线形式比非对称的倒抛物线形式更能表征土壤水分对异养呼吸的影响,模型 1 和模型 2 对比也可得出相同的结论。由模型 3 的拟合参数可知,当土壤含水率为饱和含水率的 58%时(即  $0.26 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ),异养呼吸值达到最大。

表 4 冬小麦-夏玉米农田土壤异养呼吸模型的验证结果

Table 4 The validation of the soil heterotrophic respiration models for winter wheat-summer maize cropland

模型编号 Model number	模型 Model	$R^2$	$P$	RMSE/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	AIC
1	$R_h = 4.79e^{0.047(2.57\theta - 4.83\theta^2)}$	0.64	0.000	0.56	-26.27
2	$R_h = 51.12e^{0.047(\theta - \theta_{\min})}(\theta_{\max} - \theta)^{1.00}$	0.59	0.000	0.61	-23.23
3	$R_h = 4.32e^{160.07(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T - T_0})}(4.95\theta - 9.45\theta^2)$	0.68	0.000	0.52	-31.40
4	$R_h = 97.79e^{165.35(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T - T_0})}(\theta - \theta_{\min})(\theta_{\max} - \theta)^{1.03}$	0.65	0.000	0.56	-29.23

$R^2$ : 皮尔逊相关系数的平方 The square of the Pearson correlation coefficient; RMSE: 均方根误差 Root mean square error; AIC: 赤池信息准则 Akaike information criterion

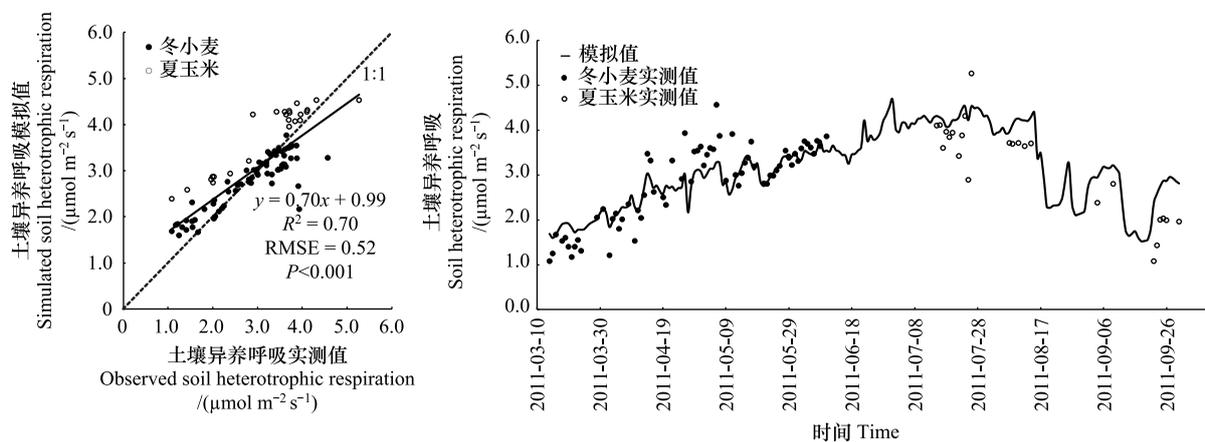


图 1 冬小麦-夏玉米农田土壤异养呼吸实测值与模型 3 模拟值的对比

Fig.1 Comparison of the observation and simulated soil heterotrophic respiration by model 3 in winter wheat-summer maize cropland

在季节变化上(图 1),异养呼吸模拟值(模型 3)和实测值表现出一致的单峰季节变化特征,模拟值和实测值的季节变化范围分别为  $1.52\text{—}4.68 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  和  $1.08\text{—}5.26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,表明模型可较好地捕捉异养

呼吸的最大值和最小值。

### 3.2 土壤自养呼吸模型

#### 3.2.1 冬小麦季土壤自养呼吸模型

在模型 1—5 中(表 5),模型 4 的  $R^2$  最高、RMSE 最低、AIC 最小,因此选择模型 4 作为本站点的最优冬小麦季自养呼吸模型(图 2)。模型 1、2 和 3 相比,模型 3 的精度最高,模型 1 的精度最低,说明 LAI 最适合用来表征维持呼吸的底物可用性,而 GPP 次之,前一天的 NPP 最不适合。模型 4 比模型 3 的精度更高,说明米氏方程比线性方程更适合于描述底物可用性对维持呼吸的影响。模型 4 比模型 5 的精度更高,表明考虑叶片衰老阶段冠层光合能力的下降可提高模型精度。模型 4 比模型 6 的精度更高,说明 Van't Hoff 方程比 Arrhenius 方程更适合表达维持呼吸与土壤温度的关系。

表 5 冬小麦季土壤自养呼吸模型的验证结果

Table 5 The validation of the soil autotrophic respiration models in winter wheat season

模型编号 Model number	模型 Model	$R^2$	$P$	RMSE/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	AIC
1	$R_m = 0.19 \times 0.66 \frac{T-10}{10} \text{NPPsR10}$ $R_g = 0.08 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_wheat} = R_m + R_g$	0.56	0.001	0.55	-19.55
2	$R_m = 0.17 \times 0.75 \frac{T-10}{10} \text{GPPsR10}$ $R_g = 0.06 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_wheat} = R_m + R_g$	0.58	0.000	0.54	-20.51
3	$R_m = 0.32 \times 0.79 \frac{T-10}{10} \text{LAIsR10}$ $R_g = 0.09 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_wheat} = R_m + R_g$	0.61	0.000	0.53	-21.89
4	$R_m = 4.98 \times 1.05 \frac{T-10}{10} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI} + 11.29} \text{sR10}$ $R_g = 0.07 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_wheat} = R_m + R_g$	0.64	0.000	0.50	-22.66
5	$R_m = 16.48 \times 0.76 \frac{T-10}{10} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI} + 37.53}$ $R_g = 0.05 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_wheat} = R_m + R_g$	0.60	0.000	0.58	-14.93
6	$R_m = 4.37 e^{85.89(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI} + 7.78} \text{sR10}$ $R_g = 0.06 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_wheat} = R_m + R_g$	0.61	0.000	0.51	-21.03

$R_{ab\_wheat}$ :冬小麦季土壤自养呼吸 Soil autotrophic respiration of winter wheat

在季节变化上,自养呼吸模拟值和实测值呈现出明显的单峰季节变化特征(图 2),模拟值(模型 4)和实测值的季节变化范围分别为  $0.43\text{—}2.76 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $0.10\text{—}3.68 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

#### 3.2.2 夏玉米季土壤自养呼吸模型

在模型 1—5 中(表 6),模型 4 的  $R^2$  最高、RMSE 最低、AIC 最小,因此选择模型 4 作为本站点的最优夏玉米自养呼吸模型(图 3)。模型 1、2 和 3 相比,模型 3 的精度最高,模型 1 的精度最低,说明 LAI 最适合用于表征维持呼吸的底物可用性,而前一天的 NPP 最不适合。模型 3 和模型 4 相比,米氏方程比线性方程更能表达底物可用性对维持呼吸的影响。模型 4 和模型 5 相比,表明考虑叶片衰老阶段冠层光合能力的下降能提高自养呼吸的模型精度。模型 4 和模型 6 相比,说明 Van't Hoff 方程比 Arrhenius 方程适合于表达夏玉米维持呼吸与土壤温度的关系。此外,夏玉米季的自养呼吸模型结构与冬小麦季相同,但模型参数不同(表 5 和 6)。

在季节变化上,7 月中旬至 9 月底夏玉米季的自养呼吸大致呈单峰变化特征(图 3),模拟值(模型 4)和实测值的季节变化范围分别为  $0.47\text{—}2.56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $0.11\text{—}2.81 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

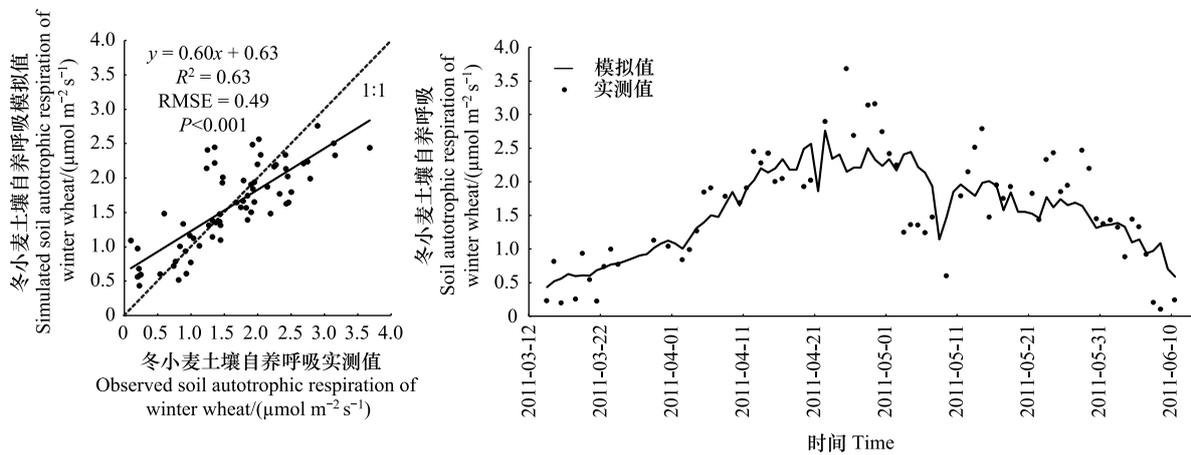


图 2 冬小麦季土壤自养呼吸实测值与模型 4 模拟值的对比

Fig.2 Comparison of the observation and simulated soil autotrophic respiration by model 4 in winter wheat season

表 6 夏玉米季土壤自养呼吸模型的验证结果

Table 6 The validation of the soil autotrophic respiration models in summer maize season

模型编号 Model number	模型 Model	$R^2$	$P$	RMSE/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	AIC
1	$R_m = 0.16 \times 0.68 \frac{T-10}{10} \text{NPPsR10}$ $R_g = 0.13 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_maize} = R_m + R_g$	0.38	0.168	0.61	-0.02
2	$R_m = 0.79 \times 0.42 \frac{T-10}{10} \text{GPPsR10}$ $R_g = 0.001 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_maize} = R_m + R_g$	0.49	0.113	0.51	-3.05
3	$R_m = 0.37 \times 1.22 \frac{T-10}{10} \text{LAIsR10}$ $R_g = 0.05 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_maize} = R_m + R_g$	0.53	0.089	0.50	-3.47
4	$R_m = 1.76 \times 0.98 \frac{T-10}{10} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}+0.16} \text{sR10}$ $R_g = 0.05 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_maize} = R_m + R_g$	0.67	0.029	0.37	-6.46
5	$R_m = 0.72 \times 1.98 \frac{T-10}{10} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}+1.02}$ $R_g = 0.02 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_maize} = R_m + R_g$	0.65	0.045	0.39	-5.65
6	$R_m = 1.24 e^{124.92(\frac{1}{T_{\text{ref}}-T_0} - \frac{1}{T-T_0})} \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}+0.58} \text{sR10}$ $R_g = 0.05 (\text{GPP} - R_m)$ $R_{ab\_maize} = R_m + R_g$	0.52	0.060	0.46	-2.50

$R_{ab\_maize}$ : 夏玉米季土壤自养呼吸 Soil autotrophic respiration of summer maize

### 3.3 冬小麦-夏玉米农田土壤总呼吸模型

在模型 1—7 中(表 7), 模型 5 的  $R^2$  最高、RMSE 最低、AIC 最小, 因此选择模型 5 作为本站点的最优土壤总呼吸模型(图 4)。在季节变化上, 土壤呼吸模拟值与实测值表现出一致的双峰季节变化特征, 模型可较好地捕捉冬小麦季和夏玉米季土壤呼吸的最大值和最小值(图 4)。冬小麦季土壤呼吸实测值和模拟值的季节变化范围分别为  $1.30\text{--}6.69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $1.98\text{--}5.88 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 夏玉米季实测值和模拟值的季节变化范围分别为  $2.07\text{--}8.07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $2.07\text{--}6.69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

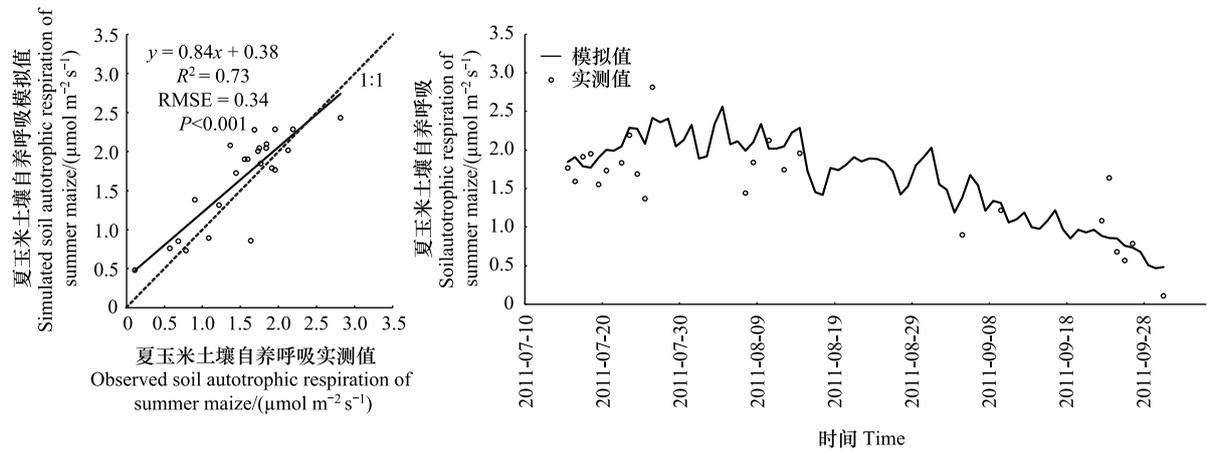


图3 夏玉米季土壤自养呼吸实测值与模型4模拟值的对比

Fig.3 Comparison of the observation and simulated soil autotrophic respiration by model 4 in summer maize season

表7 冬小麦-夏玉米农田土壤总呼吸模型的验证结果

Table 7 The validation of the total soil respiration models for winter wheat-summer maize cropland

模型编号 Model number	模型 Model	$R^2$	$P$	RMSE/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	AIC
1	$R_s = 74.93e^{0.037T}(\theta - \theta_{\min})(\theta_{\max} - \theta)^{0.90}$	0.44	0.002	1.11	13.64
2	$R_s = 5.83e^{0.037T}(3.27\theta - 5.75\theta^2)$	0.44	0.001	1.08	14.46
3	$R_s = (5.46 + 1.06\text{LAI})e^{0.037T}\theta$	0.43	0.002	1.22	19.98
4	$R_s = (6.41 + 0.35\text{GPP})e^{88.72(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T - T_0})}(3.25\theta - 5.99\theta^2)$	0.66	0.000	0.85	1.39
5	$R_s = (5.07 + 1.23\text{LAI})e^{106.01(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T - T_0})}(3.52\theta - 6.69\theta^2)$	0.74	0.000	0.73	-7.89
6	$R_s = (94.26 + 17.91\text{LAI})e^{115.32(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T - T_0})}(\theta - \theta_{\min})(\theta_{\max} - \theta)^{1.03}$	0.65	0.000	0.86	-0.05
7	$R_s = (5.66 + 1.44\text{LAI})e^{0.037T}(2.20\theta - 4.17\theta^2)$	0.71	0.001	0.81	-3.06

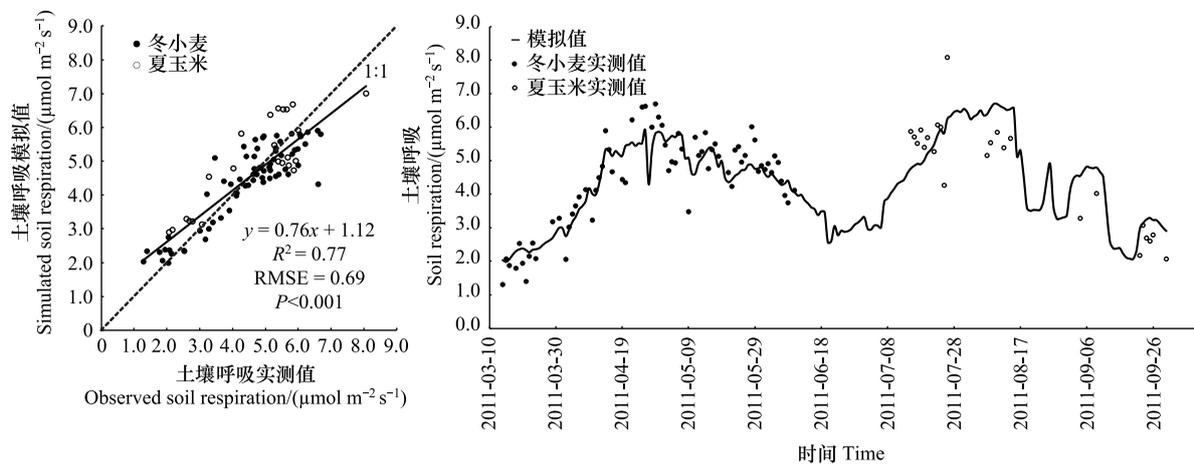


图4 冬小麦-夏玉米农田土壤呼吸实测值与模型5模拟值的对比

Fig.4 Comparison of the observation and simulated soil respiration by model 5 for winter wheat-summer maize cropland

3.4 两种建模方法的验证

Rs1 模拟值和实测值线性回归的  $R^2$  (0.55) 比 Rs2 (0.42) 高 (图 5), RMSE ( $1.01 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 比 Rs2 低

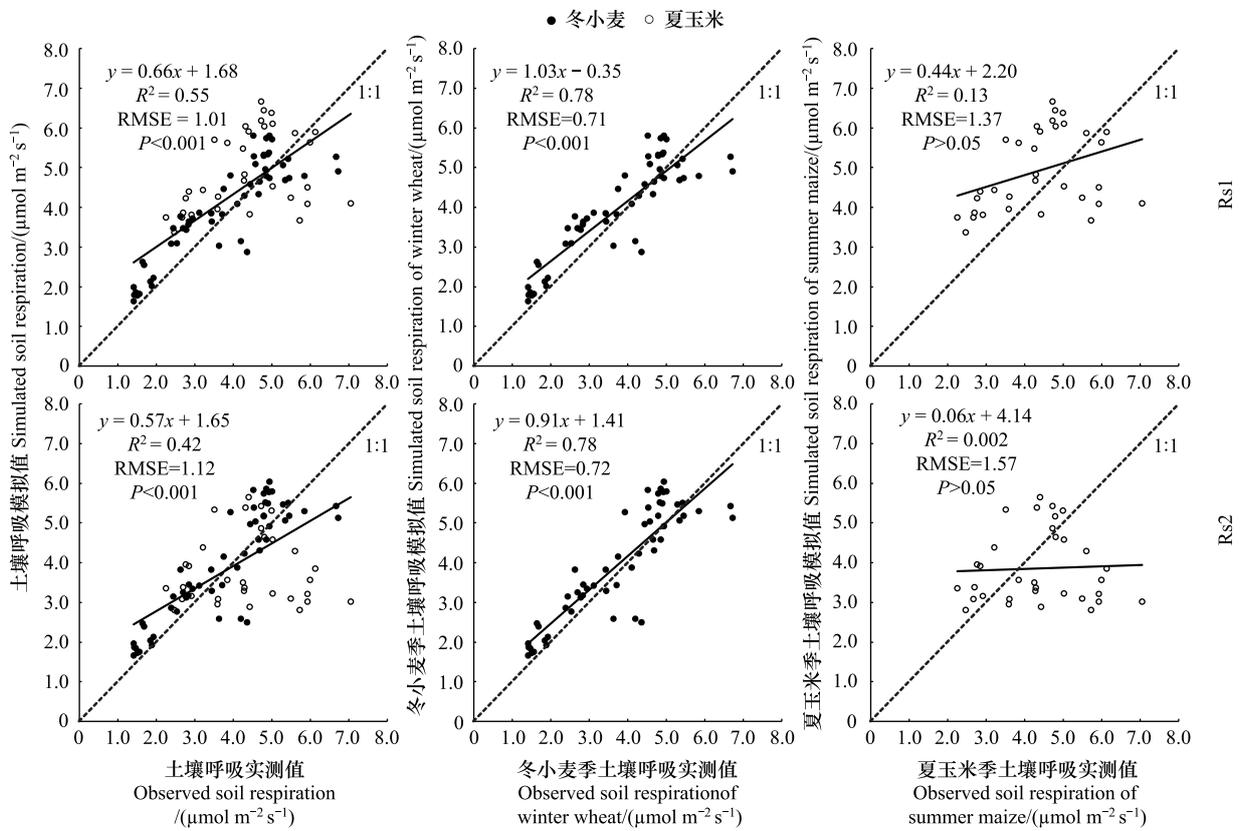


图 5 2009—2010 年土壤呼吸实测值与模拟值的对比

Fig.5 Scatter plot of the observed and simulated soil respiration from 2009 to 2010

( $1.12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), Rs1 的模拟值也比 Rs2 更加集中分布在 1:1 线附近。两种方法模拟的土壤呼吸值在全年都呈现双峰的变化特征,但二者在冬小麦季的差异较小,在夏玉米季的差异较大(图 6)。

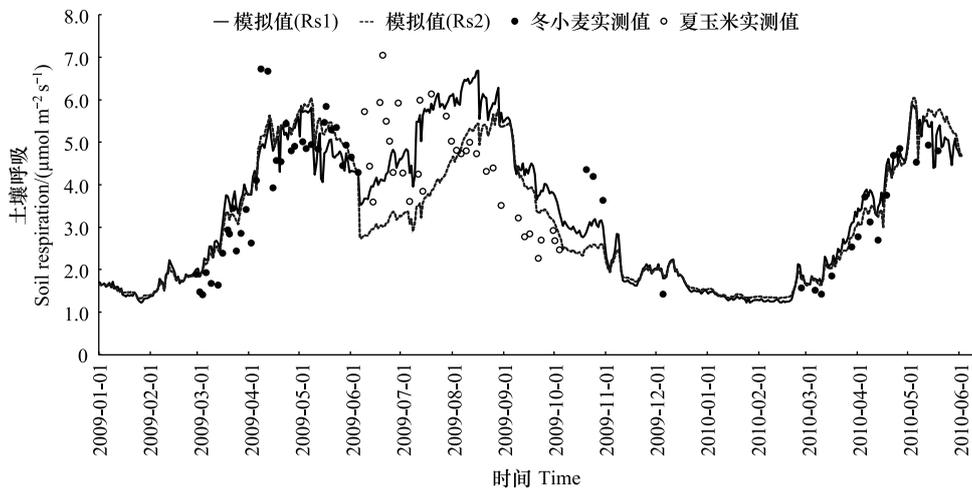


图 6 2009—2010 年土壤呼吸实测值与模拟值的季节变化过程

Fig.6 Seasonal variation of the observed and simulated soil respiration from 2009 to 2010

冬小麦生长季内, Rs1 和 Rs2 模拟值与实测值的  $R^2$  都达到了 0.78(图 5), RMSE 接近, 两者的季节变化特征也基本一致(图 6), 两种方法模拟的土壤呼吸最大值及其出现日期也较为接近(表 8)。夏玉米生长季内,

Rs1 模拟值与实测值的  $R^2$  明显高于 Rs2, RMSE 比 Rs2 低(图 5); 虽然两种方法模拟的土壤呼吸季节变化都呈单峰特征, 但 Rs2 模拟的土壤呼吸最大值及其出现日期与 Rs1 存在着较大的差异(表 8)。此外, Rs2 模拟的土壤呼吸值低于 Rs1, 尤其是从 6 月上旬夏玉米播种到 8 月中旬期间(图 6)。

表 8 2009—2010 年模拟的土壤呼吸最大值及其出现日期

Table 8 The simulated maximum of soil respiration and its corresponding date during 2009—2010

建模方法 Modeling method	冬小麦季 Winter wheat season				夏玉米季 Summer maize season	
	2009 年最大值 Maximum in 2009/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	最大值出现日期 Corresponding date of maximum	2010 年最大值 Maximum in 2010/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	最大值出现日期 Corresponding date of maximum	2010 年最大值 Maximum in 2010/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	最大值出现日期 Corresponding date of maximum
	Rs1	5.58	5 月 2 日	5.88	5 月 3 日	6.69
Rs2	6.05	5 月 8 日	6.04	5 月 4 日	5.76	8 月 28 日

Rs1: 自养呼吸与异养呼吸分别模拟后求和 Sum of soil autotrophic respiration and soil heterotrophic respiration model; Rs2: 土壤总呼吸建模 Total soil respiration model

### 3.5 两种建模方法模拟的年际变化和季节变化过程

在年际变化上, Rs1 和 Rs2 模拟的土壤呼吸多年平均值分别为  $3.67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $3.35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , Rs2 比 Rs1 低 10%。两种方法模拟的土壤呼吸最大值都出现在 2010 年(图 7), 分别为  $4.38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $4.24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; 土壤呼吸最小值都出现在 2012 年, 分别为  $2.96 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $2.56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。Rs1 和 Rs2 模拟的土壤呼吸年际波动基本一致 ( $CV$  分别为 0.12 和 0.14), 但 Rs1 模拟值呈不显著的下降趋势, Rs2 模拟值呈不显著的上升趋势(图 7)。

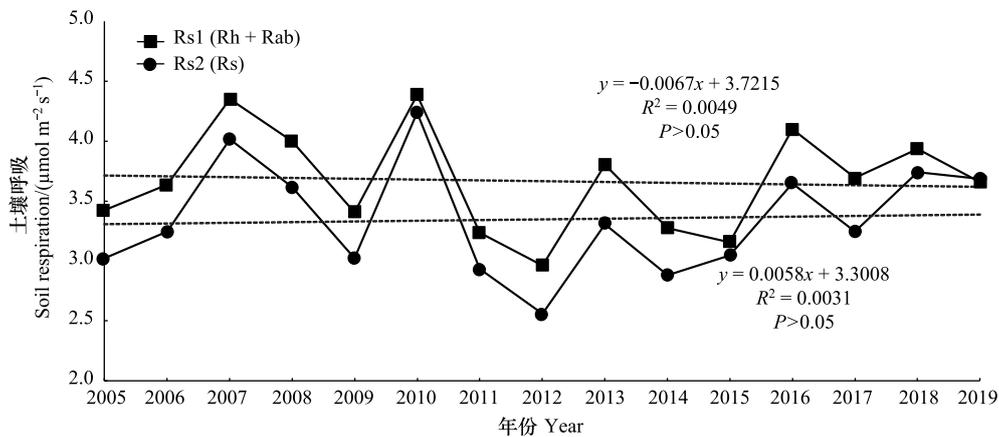


图 7 2005—2020 年土壤呼吸模拟值的年际变化过程

Fig.7 Interannual variation of simulated soil respiration from 2005 to 2020

在季节变化上, 与 2009—2010 年的对比结果相似, 两种方法模拟的土壤呼吸值在年内都呈双峰的变化特征, 且在冬小麦季内的差异较小, 在夏玉米季内的差异较大(图 8)。冬小麦季 Rs1 和 Rs2 的峰值(分别为  $5.44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $5.78 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )及其出现日期(分别为 5 月 6 日和 5 月 7 日)较为接近, 但是两种方法模拟的冬小麦收获-夏玉米播种期间的土壤呼吸最低值(分别为  $3.64 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $2.92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )及其出现日期(分别为 6 月 11 日与 6 月 21 日)较为不同; 夏玉米季 Rs1 和 Rs2 模拟的土壤呼吸峰值相差较大(分别为  $6.23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $5.49 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 峰值出现日期(分别为 7 月 21 日和 8 月 12 日)也相差了近 20 天。

## 4 讨论

### 4.1 土壤异养呼吸和土壤自养呼吸模型

与大部分已有研究相同, 本研究构建的冬小麦-夏玉米农田异养呼吸模型由土壤温度和水分驱动<sup>[23, 37]</sup>。

然而,异养呼吸(或土壤呼吸)与温度之间的关系,不同学者的研究结果并不相同。目前许多学者采用 Van't Hoff 方程来表达异养呼吸(或土壤呼吸)随土壤温度升高而升高这一过程<sup>[5, 19, 37, 51]</sup>,也包括在华北平原地区开展的研究<sup>[52]</sup>。而本研究的结果表明,相较于 Van't Hoff 方程, Arrhenius 方程更适用于异养呼吸模型,这与 Michael 等在冬小麦和青贮玉米农田的对比结果一致<sup>[53]</sup>,但也有学者发现这两个方程在玉米和玉米-大豆轮作农田中的模拟精度并无明显差异<sup>[41]</sup>。对于土壤水分,本研究表明对称的倒抛物线二次曲线更适合于描述土壤水分对异养呼吸和土壤呼吸的影响,这与在农田<sup>[29, 41]</sup>、森林<sup>[37]</sup>和草原<sup>[19]</sup>生态系统中已构建的土壤总呼吸模型结果相似,也表明将异养呼吸(或土壤呼吸)对土壤水分的响应表征为单调递增的函数<sup>[5, 16, 54]</sup>可能存在问题。对于自养呼吸,由生长呼吸和维持呼吸两个模块组成的模型结构已经较为普遍<sup>[5, 38, 44—45]</sup>,但在维持呼吸驱动因素的选择上,本研究表明,无论是在冬小麦还是夏玉米季中,维持呼吸模型都更适合采用 LAI 表征底物可用性,与 Hibbard 和 Law 在森林和草原的对比结果相同<sup>[27]</sup>。

在参数取值方面,本研究得到的冬小麦-夏玉米农田异养呼吸模型在 10℃ 时的  $Q_{10}$  值为 1.54,与张雪松等<sup>[52]</sup>在禹城站( $Q_{10}$  值为 1.50)的结果接近,但与德国一冬小麦农田和芬兰的玉米地( $Q_{10}$  值为分别 1.05 和 2.50)结果差异较大<sup>[55—56]</sup>;与其他生态系统,如森林( $Q_{10}$  值为 1.50—1.80)<sup>[57—58]</sup>和草地( $Q_{10}$  值为 1.59—2.02)<sup>[57]</sup>的  $Q_{10}$  值也有所不同。此外,当土壤含水率为饱和含水率的 58% 时,异养呼吸值达到最大,这与一些已有研究得到的量值(51%—61%)<sup>[9, 36, 59—61]</sup>结果接近。本研究冬小麦和夏玉米维持呼吸的  $Q_{10}$  值分别为 1.05 和 0.98,表明维持呼吸对土壤温度的敏感性较低,显著低于其他生态系统的  $Q_{10}$  值(如草本植物的  $Q_{10}$  值为 1.90<sup>[62]</sup>,黄瓜、冬小麦和森林的  $Q_{10}$  值均为 2.0<sup>[38, 44, 63]</sup>),这可能与作物类型<sup>[64]</sup>或作物对温度的适应性有关<sup>[65]</sup>。此外,本研究中,自养呼吸模型参数  $\alpha$  和  $\gamma$  在冬小麦和夏玉米农田的取值相差较大,也说明作物类型对自养呼吸的影响较大。自养呼吸模型中  $\delta$  的取值(0.05—0.07)与已有研究结果(0.25—0.35)<sup>[38, 44, 66]</sup>的差异也较大,这可能与物种生长条件的差异或者模型的经验性有关<sup>[66]</sup>,说明区分不同地区和不同作物类型构建自养呼吸模型的必要性。

#### 4.2 不同组分土壤呼吸分开建模的优势

本研究的分析结果表明,采用 2011 年的数据验证模型时,土壤总呼吸模型的评价指标结果与异养呼吸和自养呼吸分开建模之和的结果几乎一致, $R^2$  都为 0.77, RMSE 分别为  $0.70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $0.69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。然而,将这两种建模方法应用于其他年份(2009—2010 年)时,验证结果却是 Rs1 的精度优于 Rs2,这表明考虑了一定机理过程的分开建模方法更能描述土壤呼吸在年际间的变化。此外, Rs1 和 Rs2 两种建模方法模拟的土壤呼吸季节变化上也呈现出显著的差异,尤其在夏玉米生长季内, Rs2 低估了 6 月上旬播种到 8 月中旬的土壤呼吸值。这些都说明将异养呼吸和自养呼吸分开模拟是十分必要的。然而,华北平原已有的土壤呼吸模型均为土壤总呼吸模型<sup>[1, 29, 67]</sup>,这意味着已有土壤总呼吸模型在应用于长期模拟或预测时可能会引起较大的不确定性。

#### 4.3 研究不足

在数据处理上,本研究通过建立土壤呼吸日均值与 13:00—15:00 点测量值之间的经验关系将小时尺度的土壤呼吸实测值升尺度至日均土壤呼吸值,这种升尺度方法可能会带来一定不确定性。在模型结构上,由于缺乏长期土壤呼吸和土壤因子等观测数据,本研究未考虑 SOC 等土壤因子的影响<sup>[23, 38, 68]</sup>。尽管在短期内 SOC 的变化可能并不大<sup>[69]</sup>,但当模型用于长期模拟时,可能出现因 SOC 等土壤因子发生变化而导致的系统

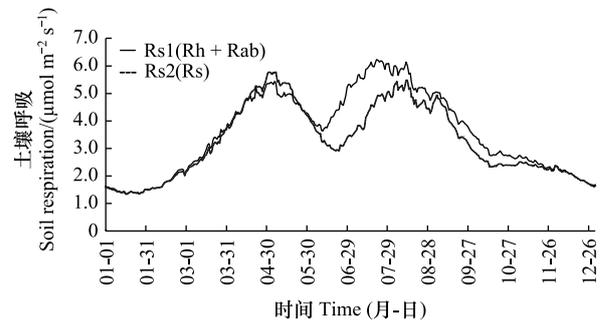


图 8 2005—2020 年土壤呼吸模拟值的多年平均日均值  
Fig.8 Multi-year average of simulated daily soil respiration during 2005—2020

偏差。在模拟精度上,  $R_{s1}$  和  $R_{s2}$  在夏玉米季的精度均比冬小麦季低, 可能是模型未考虑到玉米地内影响土壤呼吸的某些特殊因素或机理, 也有可能是玉米季降水较多, 土壤呼吸的观测存在一定不确定性<sup>[32]</sup>。未来, 开展长期且高频率的土壤呼吸观测是弥补这些不足的有效途径。

## 5 结论

本研究基于土壤呼吸及其组分原位观测实验数据, 构建了适用于华北平原冬小麦-夏玉米农田生态系统的半经验半机理异养呼吸和自养呼吸模型。异养呼吸模型由土壤温度和土壤水分共同驱动, 其中土壤温度影响的形式为 Arrhenius 方程, 而土壤水分影响的形式为对称倒抛物线。自养呼吸模型包括维持呼吸和生长呼吸两个模块。维持呼吸模块中, 土壤温度影响的形式为 Van't Hoff 指数方程, LAI 影响的形式为米氏方程, 该模块还考虑了叶片衰老导致光合作用能力下降对自养呼吸的影响。生长呼吸表达为 GPP 和维持呼吸之差的线性函数。冬小麦季和夏玉米季自养呼吸模型结构相同, 但二者的参数不同。相比于土壤总呼吸模型, 区分异养呼吸和自养呼吸的建模方法能更好地捕捉土壤呼吸的季节和年际变化, 且两种建模方法在季节和年际变化上呈现出显著不同。本研究构建的模型既考虑了土壤呼吸的主要影响机理, 又可以以卫星遥感数据作为输入, 为华北平原冬小麦-夏玉米轮种制农田的土壤呼吸模拟提供了方法。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Huang N, Wang L, Song X P, Black T A, Jassal R S, Myneni R B, Wu C Y, Wang L, Song W J, Ji D B, Yu S S, Niu Z. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabb8508.
- [ 2 ] Zhang Y Q, Kong D D, Gan R, Chiew F H S, McVicar T R, Zhang Q, Yang Y T. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002—2017. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 165-182.
- [ 3 ] Jägermeyr J, Gerten D, Lucht W, Hostert P, Migliavacca M, Nemani R. A high-resolution approach to estimating ecosystem respiration at continental scales using operational satellite data. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1191-1210.
- [ 4 ] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [ 5 ] Chen X W, Post W M, Norby R J, Classen A T. Modeling soil respiration and variations in source components using a multi-factor global climate change experiment. *Climatic Change*, 2011, 107(3): 459-480.
- [ 6 ] Harmon M E, Bond-Lamberty B, Tang J W, Vargas R. Heterotrophic respiration in disturbed forests: A review with examples from North America. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00K04.
- [ 7 ] Werth M, Subbotina I, Kuzyakov Y. Three-source partitioning of CO<sub>2</sub> efflux from soil planted with maize by <sup>13</sup>C natural abundance fails due to inactive microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2772-2781.
- [ 8 ] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis. *Ecology*, 2012, 93(4): 930-938.
- [ 9 ] Moyano F E, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 59: 72-85.
- [ 10 ] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [ 11 ] Iqbal J, Hu R G, Feng M L, Lin S, Malghani S, Ali I M. Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: A case study at Three Gorges Reservoir Area, South China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(3/4): 294-307.
- [ 12 ] Trinder C J, Artz R R E, Johnson D. Contribution of plant photosynthate to soil respiration and dissolved organic carbon in a naturally recolonising cutover peatland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1622-1628.
- [ 13 ] Vargas R, Detto M, Baldocchi D D, Allen M F. Multiscale analysis of temporal variability of soil CO<sub>2</sub> production as influenced by weather and vegetation. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1589-1605.
- [ 14 ] Pumpanen J, Kulmala L, Lindén A, Kolari P, Nikinmaa E, Hari P. Seasonal dynamics of autotrophic respiration in boreal forest soil estimated by continuous chamber measurements. *Boreal Environment Research*, 2015, 20: 637-650.
- [ 15 ] Dilustro J J, Collins B, Duncan L S, Crawford C. Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2005, 204(1): 87-97.
- [ 16 ] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, Houborg R, Starks P J, Agam N. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(12): 4227-4241.

- [17] Hursh A, Ballantyne A, Cooper L, Maneta M, Kimball J, Watts J. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 2090-2103.
- [18] Jian J S, Frissell M, Hao D L, Tang X L, Berryman E, Bond-Lamberty B. The global contribution of roots to total soil respiration. *Global Ecology and Biogeography*, 2022, 31(4): 685-699.
- [19] Liang Y N, Cai Y P, Yan J X, Li H J. Estimation of soil respiration by its driving factors based on multi-source data in a sub-alpine meadow in North China. *Sustainability*, 2019, 11(12): 3274.
- [20] Moureaux C, Debaq A, Hoyaux J, Suleau M, Tourneur D, Vancutsem F, Bodson B, Aubinet M. Carbon balance assessment of a Belgian winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1353-1366.
- [21] Wu C Y, Gaumont-Guay D, Andrew Black T, Jassal R S, Xu S G, Chen J M, Gonsamo A. Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 94: 80-90.
- [22] Yu G R, Zheng Z M, Wang Q F, Fu Y L, Zhuang J, Sun X M, Wang Y S. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16): 6074-6080.
- [23] Rodríguez A, Durán J, Curiel Yuste J, Valladares F, Rey A. The effect of tree decline over soil water content largely controls soil respiration dynamics in a Mediterranean woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 333: 109398.
- [24] Weiland L, Rogers C A, Sothe C, Arain M A, Gonsamo A. Satellite-based land surface temperature and soil moisture observations accurately predict soil respiration in temperate deciduous and coniferous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 340: 109618.
- [25] 陈书涛, 邹建文, 胡正华. 陆地生态系统土壤呼吸的观测与模拟. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1985-1996.
- [26] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [27] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, Sulzman J. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 29-70.
- [28] Ryan E M, Ogle K, Kropp H, Samuels-Crow K E, Carrillo Y, Pendall E. Modeling soil CO<sub>2</sub> production and transport with dynamic source and diffusion terms: testing the steady-state assumption using DETECT v1.0. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(5): 1909-1928.
- [29] Chen S T, Zou J W, Yao X W, Wang J, Hu Z H, Lu Y Y. A biophysical model to simulate seasonal variations of soil respiration in agroecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 338: 109524.
- [30] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [31] Zhang Q, Lei H M, Yang D W. Seasonal variations in soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 180: 34-43.
- [32] 张权, 杨大文, 雷慧闽, 薄宏波, 蔡建峰. 华北平原典型冬小麦农田土壤呼吸日内变化规律. *清华大学学报: 自然科学版*, 2015, 55(1): 33-38.
- [33] Zhang Q, Lei H M, Yang D W, Xiong L H, Liu P, Fang B J. Decadal variation in CO<sub>2</sub> fluxes and its budget in a wheat and maize rotation cropland over the North China Plain. *Biogeosciences*, 2020, 17(8): 2245-2262.
- [34] Yang C, Lei H M. Climate and management impacts on crop growth and evapotranspiration in the North China Plain based on long-term eddy covariance observation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 325: 109147.
- [35] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315.
- [36] Mielenick P C, Dugas W A. Soil CO<sub>2</sub> flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 221-228.
- [37] Zobitz J, Aaltonen H, Zhou X, Berninger F, Pumpanen J, Köster K. Comparing an exponential respiration model to alternative models for soil respiration components in a Canadian wildfire chronosequence (FireResp v1.0). *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(10): 6605-6622.
- [38] Pique G, Fieuzal R, Al Bitar A, Veloso A, Tallec T, Brut A, Ferlicq M, Zawilski B, Dejoux J F, Gibrin H, Ceschia E. Estimation of daily CO<sub>2</sub> fluxes and of the components of the carbon budget for winter wheat by the assimilation of Sentinel 2-like remote sensing data into a crop model. *Geoderma*, 2020, 376: 114428.
- [39] Rubio V E, Detto M. Spatiotemporal variability of soil respiration in a seasonal tropical forest. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(17): 7104-7116.
- [40] Suseela V, Conant R T, Wallenstein M D, Dukes J S. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 336-348.
- [41] Huang N, Niu Z. Estimating soil respiration using spectral vegetation indices and abiotic factors in irrigated and rainfed agroecosystems. *Plant and Soil*, 2013, 367(1): 535-550.
- [42] Wan S Q, Luo Y Q. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: results of a clipping and shading experiment. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1054.
- [43] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Mo W H, Koizumi H. Effects of rainfall events on soil CO<sub>2</sub> flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest. *Ecological Research*, 2002, 17(3): 401-409.
- [44] Turner D P, Ritts W D, Styles J M, Yang Z, Cohen W B, Law B E, Thornton P E. A diagnostic carbon flux model to monitor the effects of disturbance and interannual variation in climate on regional NEP. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2006, 58(5): 476.
- [45] Wang J B, Liu J Y, Cao M K, Liu Y F, Yu G R, Li G C, Qi S H, Li K R. Modelling carbon fluxes of different forests by coupling a remote-sensing model with an ecosystem process model. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(21): 6539-6567.

- [46] Cannell M G R, Thornley J H M. Modelling the components of plant respiration: some guiding principles. *Annals of Botany*, 2000, 85(1): 45-54.
- [47] Waring R H, Landsberg J J, Williams M. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiology*, 1998, 18(2): 129-134.
- [48] Collalti A, Tjoelker M G, Hoch G, Mäkelä A, Guidolotti G, Heskell M, Petit G, Ryan M G, Battipaglia G, Matteucci G, Prentice I C. Plant respiration: Controlled by photosynthesis or biomass? *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1739-1753.
- [49] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, Tenhunen J, Valentini R, Banza J, Casals P, Cheng Y F, Grünzweig J M, Irvine J, Joffre R, Law B E, Loustau D, Miglietta F, Oechel W, Ourcival J M, Pereira J S, Peressotti A, Ponti F, Qi Y, Rambal S, Rayment M, Romanya J, Rossi F, Tedeschi V, Tirone G, Xu M, Yakir D. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1104.
- [50] Richardson A D, Braswell B H, Hollinger D Y, Burman P, Davidson E A, Evans R S, Flanagan L B, Munger J W, Savage K, Urbanski S P, Wofsy S C. Comparing simple respiration models for eddy flux and dynamic chamber data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141(2): 219-234.
- [51] Savage K, Davidson E A, Richardson A D, Hollinger D Y. Three scales of temporal resolution from automated soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 2012-2021.
- [52] 张雪松, 申双和, 谢铁嵩, 邓爱娟. 华北平原冬麦田根呼吸对土壤总呼吸的贡献. *中国农业气象*, 2009, 30(3): 289-296, 301.
- [53] Demyan M S, Ingwersen J, Funkuin Y N, Ali R S, Mirzaeitalarposhti R, Rasche F, Poll C, Müller T, Streck T, Kandeler E, Cadisch G. Partitioning of ecosystem respiration in winter wheat and silage maize—modeling seasonal temperature effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 224: 131-144.
- [54] Gao X, Mei X R, Gu F X, Hao W P, Li H R, Gong D Z. Ecosystem respiration and its components in a rainfed spring maize cropland in the Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17614.
- [55] Prolingheuer N, Scharnagl B, Graf A, Vereecken H, Herbst M. Spatial and seasonal variability of heterotrophic and autotrophic soil respiration in a winter wheat stand. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(6): 9137.
- [56] Tuomi M, Vanhala P, Karhu K, Fritze H, Liski J. Heterotrophic soil respiration—Comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling*, 2008, 211(1): 182-190.
- [57] Zhou T, Shi P, Hui D, Luo Y Q. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration ( $Q_{10}$ ) and its implications for carbon-climate feedback. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, 114(G02016).
- [58] Liu X, Chen S, Yang Z, Lin C, Xiong D, Lin W, Xu C, Chen G, Xie J, Li Y, Yang Y. Will heterotrophic soil respiration be more sensitive to warming than autotrophic respiration in subtropical forests? *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(3): 655-663.
- [59] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1267-1272.
- [60] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, Barr A G, Jassal R S, Nesic Z. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1): 220-235.
- [61] 卢闯, 胡海棠, 淮贺举, 程成, 田宇杰, 李存军. 夏玉米-冬小麦轮作期土壤呼吸的温度敏感性分析. *中国农业气象*, 2020, 41(7): 403-412.
- [62] Mariko S, Koizumi H. Respiration for maintenance and growth in *Reynoutria japonica* ecotypes from different altitudes on Mt Fuji. *Ecological Research*, 1993, 8(2): 241-246.
- [63] Marcelis L F M, Baan Hofman-Eijer L R. Growth and maintenance respiratory costs of cucumber fruits as affected by temperature, and ontogeny and size of the fruits. *Physiologia Plantarum*, 1995, 93(3): 484-492.
- [64] Tong X J, Li J, Nolan R H, Yu Q. Biophysical controls of soil respiration in a wheat-maize rotation system in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 231-240.
- [65] Amthor J S. The McCree-de wit-penning de vries-thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, 2000, 86(1): 1-20.
- [66] Amthor J S. *Respiration and Crop Productivity*. New York: Springer-Verlag, 1989.
- [67] Huang N, Gu L H, Niu Z. Estimating soil respiration using spatial data products: A case study in a deciduous broadleaf forest in the Midwest USA. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(11): 6393-6408.
- [68] Konings A G, Bloom A A, Liu J J, Parazoo N C, Schimel D S, Bowman K W. Global satellite-driven estimates of heterotrophic respiration. *Biogeosciences*, 2019, 16(11): 2269-2284.
- [69] Wang Y Y, Hu C S, Dong W X, Li X X, Zhang Y M, Qin S P, Oenema O. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 33-45.