

模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响

杜锟, 李发东, 涂纯, 李兆

引用本文:

杜锟, 李发东, 涂纯, 等. 模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 691–699.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1336>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

模拟增温条件下翻耕免耕农田土壤 CH₄ 通量响应

涂纯, 李发东

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1788–1796 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0182>

我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展

张国, 王效科

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 872–881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0102>

氮素添加对贝加尔针茅草原温室气体通量的影响

张金玲, 李洁, 赵建宁, 刘红梅, 王宇, 杨殿林

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1640–1648 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0030>

减氮配施氮转化调控剂对麦田 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响

王艳群, 彭正萍, 马阳, 吴敏, 王洋, 宋学利, 王会贤

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1657–1664 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1350>

精准农业对华北平原冬小麦温室气体排放和产量的短期影响

卢闯, 王永生, 胡海棠, 董熙, 李存军

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1641–1648 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1381>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杜 锐, 李发东, 涂 纯, 等. 模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 691–699.

DU Kun, LI Fa-dong, TU Chun, et al. Effects of simulated warming on carbon emissions from farmland soil and related mechanisms[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 691–699.



开放科学 OSID

模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响

杜 锐^{1,2,3}, 李发东^{1,2,3*}, 涂 纯⁴, 李 兆^{1,2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 山东禹城农田生态系统国家野外科学观测研究站, 山东 禹城 251200; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要:为研究增温效应下农田温室气体排放的变化和机制, 选择华北平原的山东禹城农田生态系统国家野外科学观测研究站当地典型的冬小麦–夏玉米农田为研究对象, 设计翻耕增温(CTW)处理和翻耕不增温(CTN)对照开展多年增温试验。2014年10月出苗期至2015年12月冬小麦越冬期持续增温, 2016年初至2016年9月增温设备因故障关闭。结果显示, 2014–2015年, 冬小麦期土壤温度显著增加1.31 °C ($P < 0.05$), 夏玉米期土壤温度升高0.71 °C ($P > 0.05$), 而全年土壤体积含水量均值对增温无显著响应, 仅越冬期土壤含水量增加明显。两年期内, 增温抑制冬小麦季CO₂累积排放达20.35%, 以3月和5月差异表现最为明显。2014–2016年冬小麦季, CTW、CTN处理的年均CH₄累积吸收量分别为1 641.2、2 185.7 g·hm⁻², 增温抑制冬小麦季CH₄吸收, 但对夏玉米季CH₄通量无显著作用。冬小麦季增温降低CTW处理土壤微生物生物量碳值达26.55%, 而微生物生物量氮仅个别施肥和灌溉月份对增温响应显著。两年期冬小麦和夏玉米季CTW、CTN地上生物量均值分别为12.19、16.33 mg·hm⁻²和16.41、21.18 mg·hm⁻², 表明增温降低了地上作物生物量。研究表明, 长期增温显著抑制小麦季土壤CO₂释放和CH₄吸收, 但玉米期碳排放和吸收的响应相对较弱。增温条件下, 土壤水热条件和生物量依然是限制土壤碳通量的重要因素。

关键词:模拟增温; 翻耕农田; 土壤; CO₂通量; CH₄通量

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)04-0691-09 doi:10.11654/jaes.2019-1336

Effects of simulated warming on carbon emissions from farmland soil and related mechanisms

DU Kun^{1,2,3}, LI Fa-dong^{1,2,3*}, TU Chun⁴, LI Zhao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Yucheng Shandong Agro-ecosystem National Observation and Research Station, Ministry of Science and Technology, Yucheng 251200, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Control, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Cropland ecosystem is one of the most critical sources of carbon emissions. It is of great importance to study the changes in greenhouse gas emissions from farmland under global warming, and their mechanisms, to understand the global carbon cycle, and to lessen the acceleration of the global greenhouse effect. We carried out a simulated warming experiment at the Yucheng Shandong Agro-ecosystem National Observation and Research Station, Ministry of Science and Technology, located on the North China Plain. The experiment involved a conventional tillage and warming (CTW) treatment, and a conventional tillage with no-warming (CTN) control, or a typical local

收稿日期: 2019-12-04 录用日期: 2020-02-09

作者简介: 杜 锐(1989—), 男, 山东临沂人, 博士, 从事农田生态系统管理研究。E-mail: duk.17b@igsnr.ac.cn

*通信作者: 李发东 E-mail: lifadong@igsnr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771292, 31170414); 国家自然科学基金委员会与联合国环境署合作研究项目(41761144053)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41771292, 31170414); The National Natural Science Foundation of China and United Nations Environment Programme(41761144053)

crop rotation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and summer maize (*Zea mays* L.). The warming period was from October 2014 to December 2015, after which the heating equipment was shut down from the beginning of 2016 to September 2016 due to technical failure. The results showed that, from 2014 to 2015, soil temperature in the winter wheat period was increased significantly by 1.31 °C ($P < 0.05$), but heating had no distinct effect on soil temperature in the summer maize period ($P > 0.05$). The mean soil water content had no significant response to warming during the two-year study period, and only the soil water content in the winter period was increased significantly by the warming. During the two-year study period, heating inhibited cumulative CO₂ emissions in the winter wheat period by 20.35%, especially in March and May. In the winter wheat season from 2014 to 2016, the average annual cumulative CH₄ absorption of CTW and CTN was 1 641.2 g·hm⁻² and 2 185.7 g·hm⁻², respectively. Warming inhibited CH₄ absorption in the winter wheat season but had no significant effect on CH₄ flux in the summer maize period. The soil microbial biomass carbon of CTW was decreased by 26.55% in the winter wheat season, but the response of microbial biomass nitrogen to warming was only obvious in special fertilization and irrigation months. The mean aboveground biomasses of CTW and CTN in winter wheat and summer maize were 12.19, 16.33, 16.41 and 21.18 mg·hm⁻², respectively, indicating that warming had reduced the aboveground crop biomass. It was found that long-term warming significantly inhibited soil CO₂ emissions and CH₄ absorption in the winter wheat season, but the responses of carbon emissions and absorption in the maize stage were not significant. Under warming conditions, soil water and heat conditions and aboveground biomass are still important factors in limiting the soil carbon flux.

Keywords: simulated warming; conventional tillage system; soil; CO₂ flux; CH₄ flux

当前,大气温室气体浓度增加是导致全球变暖的主要原因之一,对全球气候增温贡献达80%^[1]。温室气体中CO₂、CH₄是主要的含碳气体,对温室效应的贡献率分别为60%、15%^[1],因此,减少和控制大气温室气体来源的排放已成为当前研究的热点之一。研究表明,土壤为全球第二大碳库(1.394×10¹⁸g),是大气CO₂、CH₄的重要来源,每年土壤向大气排放的CO₂和CH₄约占全球总排放量的5%~20%和15%~30%。另有研究指出,农业活动导致的温室气体(Greenhouse gas, GHG)释放量占人为释放量的20%^[2]。因此,加强人类农业活动下农田土壤排放CO₂、CH₄的变化和响应研究,对于摸清和估算陆地生态系统的碳排放具有重要意义。

近数十年来,研究者针对全球气候变暖对土壤温室气体CO₂、CH₄释放的影响和机制进行了一系列原位实地研究^[3-5]。Melillo^[6]和Bergner等^[7]发现,增温前期对森林土壤呼吸的刺激效应显著,但在增温持续数年后,增温导致的CO₂排放的变化并不明显。另外, Wan等^[8]发现气候导致的水温要素等会影响土壤排放对增温的响应。Lu等^[9]和Shi等^[10]在青藏高原开展增温试验后发现,短期增温导致的大气和土壤温度增加促进土壤微生物数量和活性,进而使土壤CO₂排放显著增加。Hou等^[11]指出,华北地区农田土壤总呼吸和异养呼吸对增温的响应不显著,但在长期试验条件下有可能表现出增加的趋势。此外,有研究发现农田土壤CO₂的释放表现出大豆季高于小麦季的特征^[12]。与CO₂对增温的响应类似,研究发现,增温促进土壤对大气CH₄的吸收,这是增温引起土壤温度升高,进

而提高了与大气CH₄氧化过程相关的甲烷氧化菌数量和活性导致的^[13]。然而,也有研究指出,一是增温引起土壤干旱,进而抑制了土壤氧化菌的转化能力,导致土壤吸收大气CH₄的能力下降^[14];二是增温导致土壤氮转化过程加快^[15],使甲烷单加氧酶优先转化土壤中的NH₄⁺,进而抑制了土壤CH₄的吸收^[16]。综合前人研究发现,开展相关农田地区的增温试验相对较少,且增温试验的开展年限多属于短期试验。因此,研究多年模拟增温条件下农田土壤CO₂、CH₄通量的响应特征,进而了解和识别土壤排放变化的驱动要素和内在机制,对于促进农田土壤减排和控制大气增温具有重要意义。

华北平原农田是我国重要的粮食产地之一,具有耕地面积广、耕作强度大、耕作时间长的特点,是我国典型的代表性农田耕作区。本研究选择华北农田土壤为研究对象,利用人工红外热源加热技术,对农田大气-土壤-植物系统开展增温试验,通过观测和分析不同年限下生育期农田土壤CO₂、CH₄的排放通量和农田土壤、作物的相关要素,对未来增温效应的响应和驱动机制进行研究,以促进当地合理安排农业活动,提高农田措施管理并降低农田土壤CO₂、CH₄排放。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东禹城农田生态系统国家野外科学观测研究站(36°40′~37°12′N, 116°22′~116°45′E)。研究区地处华北平原,土壤为黄河冲积物母质

发育,潮土和盐化潮土是其主要土壤类型。该地属温带半干旱季风气候,多年气温均值为13.4℃,多年降水均值为567 mm,夏季降雨量占全年雨量60%以上,多年无霜期为220 d,日照时间超过2600 h^[17],其气候条件利于农作物种植和生长。

1.2 试验设计

试验设翻耕增温(CTW)和翻耕不增温(CTN,对照)两个处理,每个处理4个重复小区。增温试验开始于2010年4月,利用红外增温器MSR-2420(Kalglo Electronics Inc, Bethlehem, PA, USA)对大气和土壤进行模拟增温,架设增温器的高度为3 m,增温功率为2000 W,有效增温面积为4 m²,全年实测有效增温为0.8~2.2℃。为降低增温器外遮雨板对光照和降雨等要素的影响,在非增温试验地架设同样高度和材质的遮雨器。2016年初至2016年9月增温设备因故障关闭。多年种植制度为冬小麦-夏玉米轮作,冬小麦生育期为10月中旬到次年6月上旬,玉米生育期为6月下旬到当年10月上旬,详细耕作管理措施参见文献[17]。

1.3 气体采集

根据静态密闭气室法^[18]采集并分析农田土壤CO₂和CH₄通量,采集时间为2014年10月下旬小麦出苗期至2016年10月上旬玉米收获期,采气在晴朗天气上午9:00—11:00进行,每次间隔5~7 d。采气装置由不锈钢底座和PVC气罩组成,将其置于增温架的正下方,除播种时拔出,其余时间固定在土壤中。详细采气装置和测定方法描述见文献[17]。

CO₂和CH₄通量计算公式^[19-20]如下:

$$F = K \times \frac{273}{273 + T_a} \times \frac{M}{V} \times H \times \frac{dc}{dt}$$

式中: F 为CO₂(mg CO₂·m⁻²·h⁻¹)、CH₄通量(μg CH₄·m⁻²·h⁻¹); K 为转化系数,CO₂、CH₄分别为1、0.001; T_a 为气室内空气温度,℃; H 为气室高度,m; dc/dt 为单位时间内浓度变化率,μL·L⁻¹·h⁻¹。

冬小麦-夏玉米季的月累积CO₂和CH₄通量使用相邻两次测定速率与采气间隔时间乘积后累加得出^[21]。

1.4 土壤水热要素和微生物生物量碳、氮及地上生物量的测定

采集农田土壤释放/吸收的气体的同时,利用便携式土壤温湿度测定仪对表层0~10 cm土壤的温度和土壤体积含水量进行测定。研究期生育期内多次采集土样,带回实验室后,将鲜土及时采用氯仿熏蒸

法提取微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)待测液,并利用硫酸-重铬酸钾滴定法^[22]、紫外分光光度法测定待测液中C、N含量^[23],从而得到MBC、MBN含量。收获期,在单位面积内贴地割除地上作物,采用烘干法称质量得到作物含水量,计算得到农田地上生物量。

1.5 数据处理

利用SPSS 19.0进行数据处理,利用LSD方法对测得数据进行单因素方差分析,显著水平 $\alpha=0.05$ 。利用Excel和Origin 2018进行作图。

2 结果与分析

2.1 研究区水热条件变化

两年作物生育期月均气温和降雨量分析结果(图1)显示,研究期内大气月均气温变化趋势相似,变化范围为5.0~30.5℃。2014—2015年和2015—2016年冬小麦季生育期气温均值分别为9.0℃和8.1℃,冬季(12月至次年2月)均值分别为1.15℃和-0.06℃,返青期至收获期(3月至6月)气温均值分别为21.77℃和21.78℃。2015年和2016年夏玉米季气温月均值分别为26.2℃和23.1℃。综合分析表明,2015年全年温度略高于2016年,年际差异明显。

2014—2015年和2015—2016年,冬小麦生育期降雨累积量分别为138.0 mm和132.3 mm,显著低于历史多年降雨均值170.1 mm。2015年和2016年,夏玉米季降雨累积量分别为77.5 mm和408.3 mm。2015年玉米季降雨明显偏少,为防止干旱影响作物生长,该年玉米生育期增加灌溉次数。

2.2 土壤温度和含水量

2014—2016年,不同处理下,土壤温度月均值的变化趋势相同(图2),全年尺度上表现为冬季低、夏季高,与大气温度变化趋势一致。2014—2015年,冬小麦越冬期(12月至次年2月)和返青期至灌浆期(3月至5月)CTW、CTN的土壤温度月均值分别为6.39、4.51℃和16.77、16.14℃;夏玉米季CTW、CTN的土壤温度月均值分别为26.77、26.07℃。两种处理对比发现,土壤温度表现出CTW高于CTN的特征,且增温对土壤温度的促进作用以小麦季越冬期最为明显(尤其是2015年1月, $P<0.01$)。2015—2016年冬小麦季和夏玉米季CTN土壤温度月均值分别为11.51℃和26.15℃(2016年CTW处理土壤温湿度监测设备故障),与2014—2015年CTN均值相近。

2014—2015年生育期,土壤体积含水量表现出冬季和2015年5月灌浆期低、夏季高的特征(图2)。

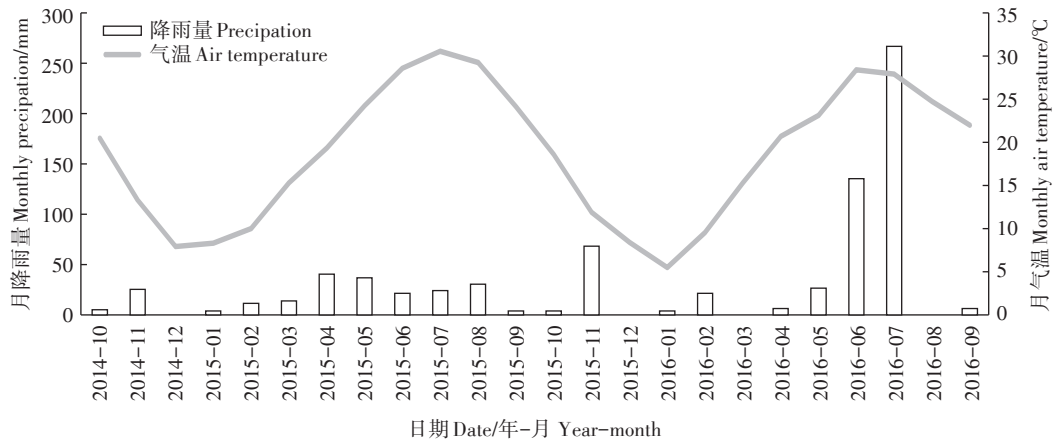


图1 2014—2016年冬小麦-夏玉米生育期水热条件

Figure 1 The hydrothermal conditions during the growth period of winter wheat–summer corn from 2014 to 2016

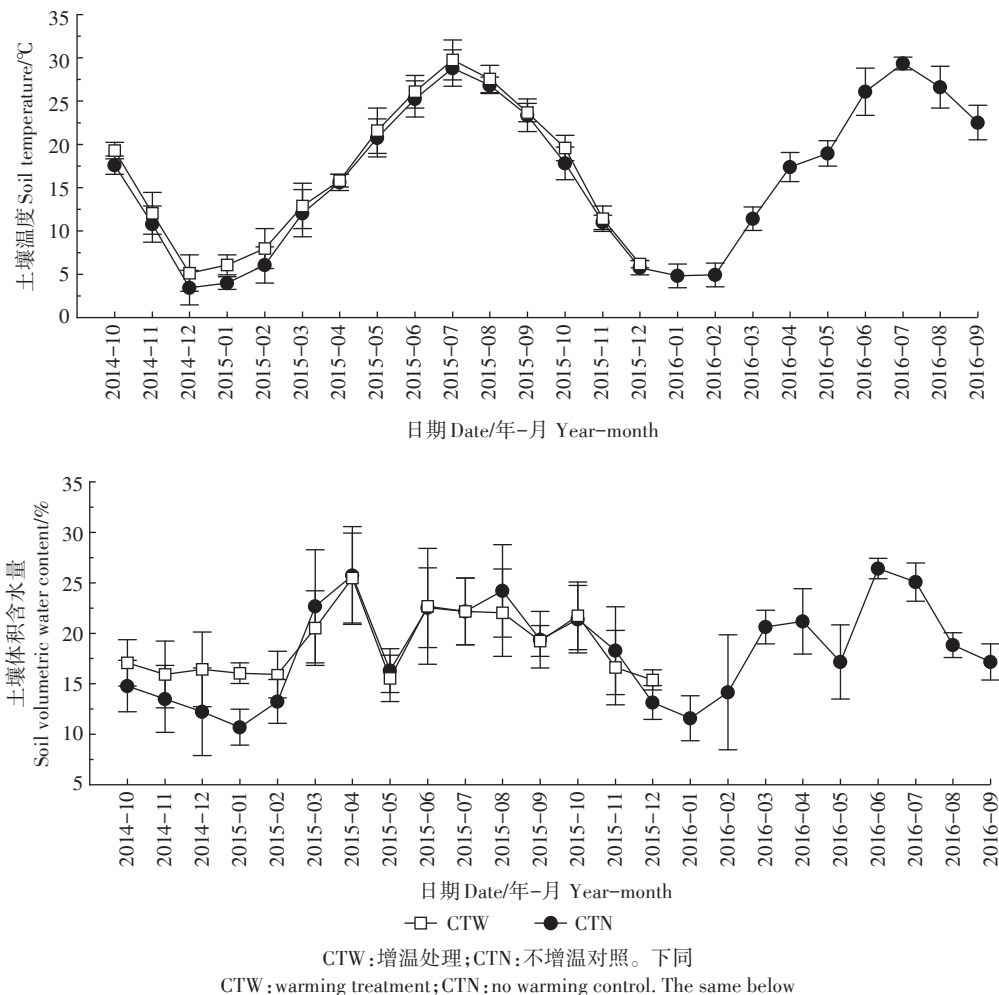


图2 2014—2016年冬小麦-夏玉米生育期土壤温度和体积含水量

Figure 2 The soil temperature and volumetric water content during the growth period of winter wheat–summer corn from 2014 to 2016

2014—2015年,冬小麦越冬期(12月至次年2月)和返青期至灌浆期(3月至5月)CTW、CTN的土壤体积含水量月均值分别为16.14%、12.06%和20.51%、

21.58%;夏玉米季CTW、CTN的土壤体积含水量月均值分别为21.53%、22.07%。两种处理对比发现,土壤湿度在不同处理间差异不显著,数值上全年

CTW 低于 CTN, 但冬小麦越冬期 CTW 土壤湿度值高于 CTN, 表明冬季增温促进了土壤冻结水的融化, 从而提高土壤含水量。2015—2016 年, 冬小麦季和夏玉米季 CTN 土壤湿度月均值分别为 17.19%、21.88% (2016 年 CTW 处理土壤温湿度监测设备故障), 小麦季土壤含水量明显低于 2014—2015 年小麦季, 表明 2015 年干旱和高温对非增温处理小麦季土壤含水量存在抑制作用。

2.3 土壤碳排放通量

2.3.1 土壤 CO₂ 通量

2014—2016 年, 土壤 CO₂ 通量月均值见图 3, 在全年不同月份间比较, CTW、CTN 处理均表现出明显的小麦季出苗期和返青期 (10 月至次年 2 月) 较低, 返青期至灌浆成熟期 (次年 3 月至 5 月) 逐渐升高的趋势, 玉米季则表现出 7 月至 8 月较高的趋势。年际之间比较, 2015 年小麦季土壤 CO₂ 排放量明显高于 2016 年,

而玉米季正相反, 这与 2015 年 3 月至 5 月降雨量高于 2016 年对应月份降雨量, 而 2015 年 6 月至 7 月降雨量低于 2016 年对应时期降雨量有关。计算生育期 CO₂ 累积排放量发现, 小麦季 CTW 处理的 CO₂ 排放年均累积量显著低于 CTN 对应累积量的 20.35%; 而在玉米季, CTW 与 CTN 的 CO₂ 年排放量差异不显著。

2.3.2 土壤 CH₄ 通量

土壤 CH₄ 通量, 在月均值水平上表现出吸收的趋势 (图 4)。2014—2016 年, 土壤 CH₄ 吸收量的月均值范围为 118.36~549.38 g·hm⁻²。两种处理下, 冬小麦季土壤 CH₄ 吸收量均明显大于玉米季。2014—2016 年冬小麦季, CTW、CTN 处理的年均 CH₄ 累积吸收量分别为 1 641.2、2 185.7 g·hm⁻², CTN 处理显著高于 CTW 处理 24.9% ($P<0.05$); 玉米季, CTW、CTN 处理的年均 CH₄ 累积吸收量分别为 809.7、989.8 g·hm⁻², 增温作用不显著。2016 年, CTW 处理下, 土壤 CH₄ 吸收量

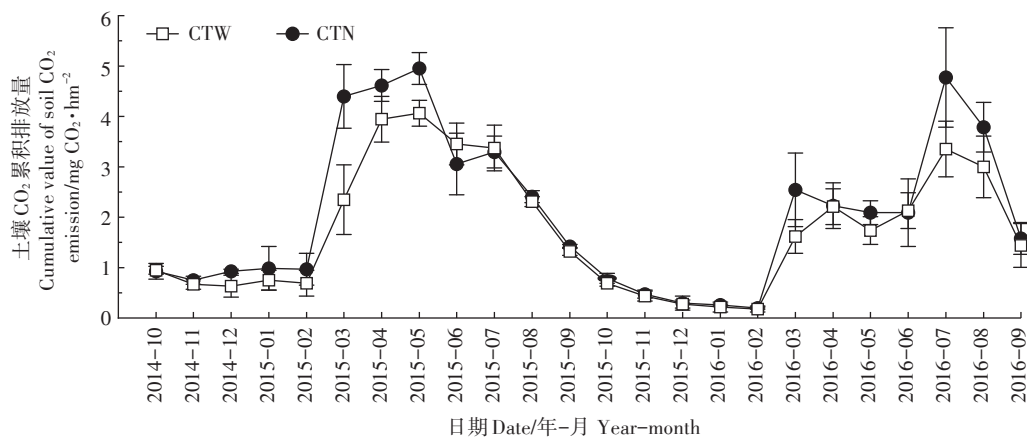


图3 2014—2016年冬小麦-夏玉米生育期土壤 CO₂ 累积排放量

Figure 3 The monthly average values of soil CO₂ emissions during the winter wheat–summer corn growth period from 2014 to 2016

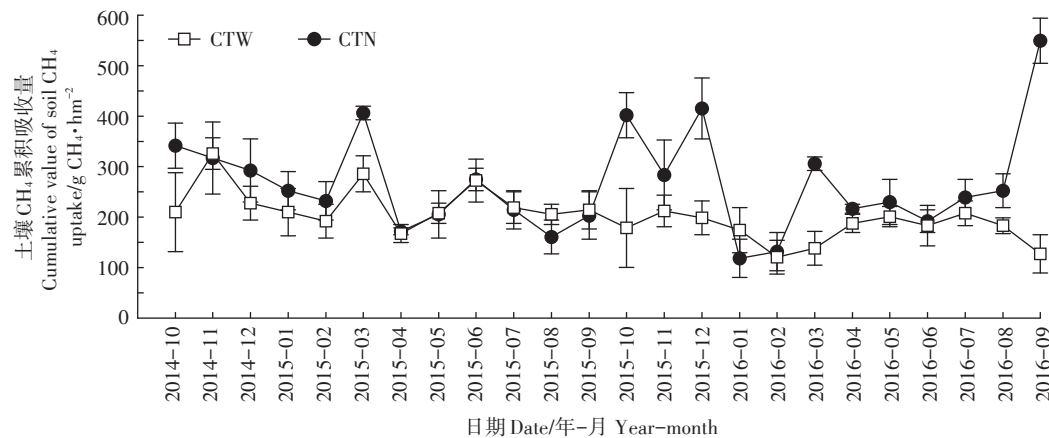


图4 2014—2016年冬小麦-夏玉米生育期土壤 CH₄ 累积吸收量

Figure 4 The monthly values of soil CH₄ uptake during the growth period of winter wheat–summer maize from 2014 to 2016

依然小于 CTN 处理,表明增温效应导致的对土壤微生物活性和土壤养分转化过程的影响具有滞后性。

2.4 生物量

2.4.1 MBC 和 MBN

2014—2016 年研究期内,土壤 MBC 在全年时间尺度上,表现出冬小麦越冬期(12月至次年2月)和夏玉米出苗期(6月)较低,生长旺盛的3月至5月和7月至8月较高的趋势(图5)。两处理间比较,2015年的3、5月和2016年的6月间差异极显著。综合分析生育期 MBC 均值发现,2014—2015 年和 2015—2016 年,小麦季 CTW 处理的 MBC 显著低于 CTN 处理 30.9%、22.2%,夏玉米季 CTW 处理的 MBC 低于 CTN 处理 14.52% ($P>0.05$)、22.3% ($P<0.05$)。

研究期内,MBN 月均值在月尺度上的变化与 MBC 相似,在作物生长旺盛的季节 MBN 均值较高(图5)。两处理间比较,两年期生育期 MBN 均值在小麦季和夏玉米季均差异不显著。但在 2015 年 3 月小麦

返青期,两处理差异显著,与 CTN 相比,CTW 处理的 MBN 值减少 54.9%,而在 2015 年 7 月(玉米季追肥),CTW 处理显著高于 CTN 处理 62.5%。

2.4.2 地上作物生物量

分析地上作物生物量(图6)发现,两种处理间,2014—2015 年和 2015—2016 年小麦季,CTW、CTN 处理地上作物生物量分别为 13.03、15.63 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 11.34、17.02 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,CTW 处理显著低于 CTN 处理 16.63%、33.37%;玉米季,CTW、CTN 处理地上作物生物量分别为 21.47、25.34 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 33.13、37.75 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,CTW 处理显著低于 CTN 处理 15.27%、12.24%。同一处理下,分别比较 2014—2015 年和 2015—2016 年之间小麦季和玉米季生育期地上生物量差异显著性,结果表明年际间小麦季的 CTW、CTN 地上生物量均不存在显著差异,而年际间玉米季 CTW、CTN 地上生物量均差异显著,2016 年玉米季显著高于 2015 年玉米季,表明 2015 年夏干旱显著影响了作物生长,而

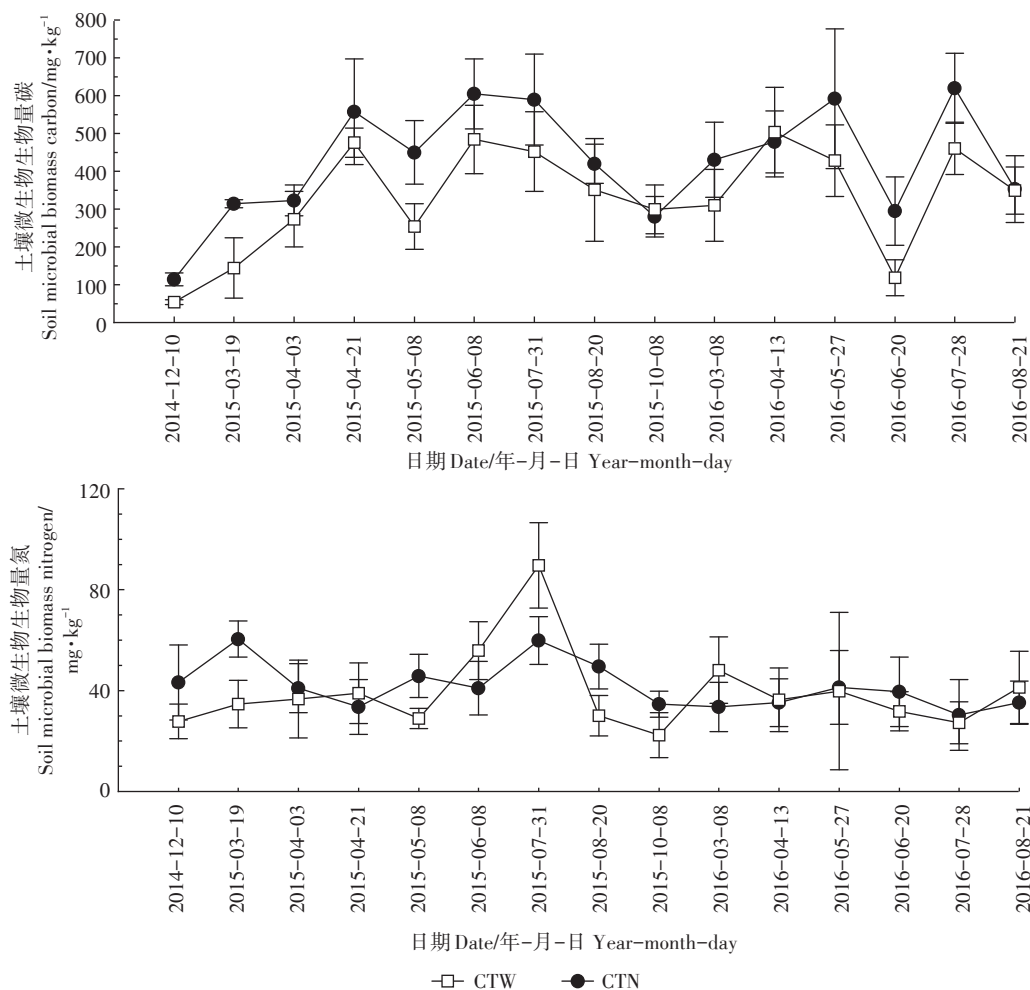


图5 2014—2016年冬小麦-夏玉米生育期土壤MBC、MBN

Figure 5 The soil MBC, MBN during the growth period of winter wheat-summer corn from 2014 to 2016

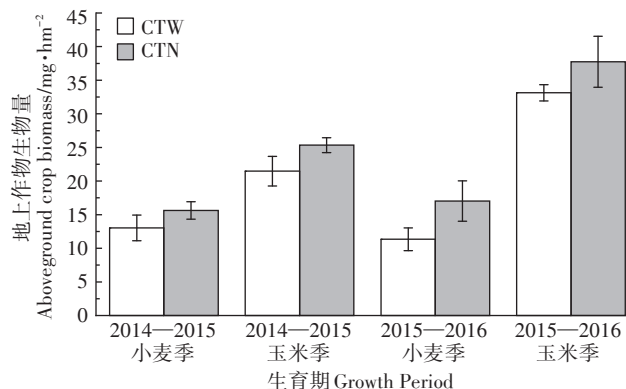


图6 2014—2016年冬小麦-夏玉米生育期地上作物生物量

Figure 6 The above-ground crop biomass during winter wheat-summer maize growth period from 2014 to 2016

两年间雨热差异对小麦生长无明显影响。

3 讨论

3.1 增温对农田土壤CO₂释放的影响

前人研究表明,短期增温可以促进土壤温度升高,增加土壤微生物活性,提高土壤有机质分解,进而加速土壤碳元素的转化利用,最终导致土壤CO₂释放量增大^[7,10]。但多年长期增温(5年及以上)发现,土壤易过度干旱,土壤含水量降低成为不利因素,导致土壤微生物转化和分解能力下降,从而抑制土壤CO₂的释放^[24-26]。本研究中,2014—2016年小麦季增温抑制翻耕农田的土壤CO₂释放,与前人得出的5~6年期增温抑制土壤中微生物、降低土壤排放量的研究相似^[6,25]。从单月均值可以发现,在2015年3月和5月,这种抑制作用尤为明显,究其原因,是3月冬小麦灌溉、追肥,而5月是冬小麦灌浆成熟期,对农田养分的吸收和利用较大,从而极易受土壤水热环境变化的影响。而在玉米季,增温对农田土壤排放CO₂的作用不明显,这是由于研究区的降水大多发生在夏季,从而影响了温度上升对土壤呼吸的主效应导致的。

3.2 增温对农田土壤CH₄吸收的影响

Castro等^[27]指出,土壤体积含水量15%~30%是土壤吸收CH₄的最适范围,过多的水分导致土壤孔隙透气性降低,抑制土壤CH₄的氧化能力,甚至在淹水的厌氧环境下,土壤也可以释放CH₄。前人多种研究表明,华北地区旱作农田是CH₄的弱汇,在全年尺度上吸收大气CH₄,本研究结论与此一致。前人研究认为长期增温造成土壤含水量降低^[13,18,28],过度干旱会进一步抑制土壤甲烷氧化菌活性,导致土壤吸收CH₄能

力降低^[28]。然而,本研究发现,增温并未导致土壤含水量显著降低,这可能与2015年降水较少,导致增温对土壤湿度产生的差异不显著有关。本研究中,5~6年期增温抑制小麦季翻耕农田土壤的CH₄吸收,表明土壤甲烷氧化菌对CH₄的吸收能力下降,综合土壤含水量的变化,本研究认为这是前文中小麦季增温导致土壤温度升高导致的^[16]。相反,玉米季土壤CH₄吸收能力对增温效应的响应不显著,这与本文中夏季气温较高、土壤温度受增温影响不显著,且玉米季土壤含水量无明显变化有关。

3.3 增温影响下生物量变化及其对土壤碳排放的影响

MBC是表征土壤碳元素循环过程的重要指标,能够指示土壤对碳元素的氧化和释放/吸收能力^[29]。本研究发现,增温显著抑制小麦季土壤MBC,而玉米季土壤MBC对增温无明显响应,与增温引起小麦季土壤温度升高而玉米季响应不显著有关,这也进一步验证了前文中增温抑制小麦季CO₂和CH₄通量的结论。究其原因,认为这是因为增温抑制土壤微生物活性,最终影响了土壤MBC含量^[13-14,30]。至于MBN,仅个别灌溉和施肥月份下,增温抑制土壤MBN,表明MBN变化主要受土壤氮元素含量和水分影响,但研究期内,增温对土壤含水量的整体影响较小,从而导致土壤MBN均值对增温效应的响应不显著。两年研究期内,地上作物生物量在增温影响下显著降低,与丁乐乐等^[31]和吴杨周等^[32]分别得出的3年期和1年期增温促进冬小麦地上生物量的结论相反,这是试验的增温年限不同导致的。本研究中作物生长受增温的抑制作用影响,一方面,土壤MBC在小麦季显著降低,另一方面,增温导致小麦季土壤CO₂释放量降低,说明小麦季土壤碳元素转化效率降低,这导致了植物根系可吸收养分减少,最终对作物生长产生不利影响。相关系数分析显示(结果见本文首页OSID码),2014—2016年生育期,与CO₂、CH₄变化显著相关的是MBC和地上生物量,这进一步表明,增温对土壤和作物生物量影响最终将对土壤碳的释放和吸收产生重要影响。

研究期内,2015年全年干旱导致气温过高,降低了增温效应的影响。而2016年非增温处理小麦季和玉米季温度与2015年相近,一定程度上表明两年研究期内土壤温度的基础条件相近。而2015年全年降水过少,2016年仅玉米季降水稍有增多,但仍小于多年平均水平。因此,水热条件仍是影响野外模拟增温效应作用的限制条件。2016年增温设备故障,但研

究发现,多年增温下,即使停止增温,华北农田土壤的 CO_2 释放和 CH_4 吸收依然存在差异,表明土壤中微生物活性已发生明显变化,而这种改变不会在短期内恢复。因此,基于水热条件和增温效应的延续性,开展多年连续增温试验具有重要意义,以了解增温效应在时间尺度上是否具有连续累积效应以及累积效应发生变化的年限需求。

4 结论

模拟增温结果表明,增温促进2014—2015年冬小麦季土壤温度显著上升,但对夏玉米季土壤温度和全年土壤体积含水量无显著影响。两年试验期后,增温抑制冬小麦季累积 CO_2 排放和 CH_4 吸收,但对夏玉米季 CO_2 、 CH_4 通量作用不显著。冬小麦季增温降低土壤月均MBC,但土壤MBN无显著变化,而增温抑制地上作物生物量。长期增温抑制冬小麦季土壤 CO_2 释放和 CH_4 吸收,但玉米期碳通量变化相对较小。长期气候变暖,增温效应具有累积性,将对华北农田的碳汇/源作用产生重要影响。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Patiño-Úniga L, Ceja-Navarro J A, Govaerts B, et al. The effect of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emissions of N_2O , CO_2 and CH_4 in the central highlands of Mexico: A laboratory study[J]. *Plant & Soil*, 2008, 314 (1/2): 231–241.
- [3] Cheng H, Ren W, Ding L, et al. Responses of a rice-wheat rotation agroecosystem to experimental warming[J]. *Ecological Research*, 2013, 28(6): 959–967.
- [4] Aguilos M, Takagi K, Liang N, et al. Sustained large stimulation of soil heterotrophic respiration rate and its temperature sensitivity by soil warming in a cool-temperate forested peatland[J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 2013, 65(1): 1903–1912.
- [5] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures [J]. *Ecological Applications*, 1994, 4(3): 617–625.
- [6] Melillo J M. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173–2176.
- [7] Bergner B, Johnstone J, Treseder K K. Experimental warming and burn severity alter soil CO_2 flux and soil functional groups in a recently burned boreal forest[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(12): 1996–2004.
- [8] Wan S Q, Norby R J, Ledford J, et al. Responses of soil respiration to elevated CO_2 , air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2411–2424.
- [9] Lu M, Zhou X, Yang Q, et al. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: A meta-analysis[J]. *Ecology*, 2013, 94(3): 726–738.
- [10] Shi F, Chen H, Chen H, et al. The combined effects of warming and drying suppress CO_2 and N_2O emission rates in an alpine meadow of the eastern Tibetan Plateau[J]. *Ecological Research*, 2012, 27(4): 725–733.
- [11] Hou R, Ouyang Z, Wilson G V, et al. Response of carbon dioxide emissions to warming under no-till and conventional till systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(1): 280–289.
- [12] 张耀鸿, 楚岱蔚, 谢晓金, 等. 夜间增温对麦田土壤呼吸速率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1389–1395.
ZHANG Yao-hong, CHU Dai-wei, XIE Xiao-jin, et al. Effect of nighttime warming on soil respiration in winter wheat soil[J]. *Journal of Agro-Environmant Science*, 2013, 32(7): 1389–1395.
- [13] Dijkstra F A, Prior S A, Runion G B, et al. Effects of elevated carbon dioxide and increased temperature on methane and nitrous oxide fluxes: Evidence from field experiments[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2012, 10(10): 520–527.
- [14] Dijkstra F A, Morgan J A, Fischer J C, et al. Elevated CO_2 and warming effects on CH_4 uptake in a semiarid grassland below optimum soil moisture[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116 (1): 79–89.
- [15] Gill R A. The influence of 3-years of warming and N-deposition on ecosystem dynamics is small compared to past land use in subalpine meadows[J]. *Plant & Soil*, 2014, 374(1/2): 197–210.
- [16] 李俊, 同小娟, 于强. 不饱和土壤 CH_4 的吸收与氧化[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 143–149.
LI Jun, TONG Xiao-juan, YU Qiang. Methane uptake and oxidation by unsaturated soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 143–149.
- [17] 涂纯, 李发东. 模拟增温条件下翻耕免耕农田土壤 CH_4 通量响应[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1788–1796.
TU Chun, LI Fa-dong. Responses of soil CH_4 fluxes to simulated warming in conventional tillage and no-tillage systems[J]. *Journal of Agro-Environmant Science*, 2016, 35(9): 1788–1796.
- [18] Liu L, Hu C, Yang P, et al. Effects of experimental warming and nitrogen addition on soil respiration and CH_4 fluxes from crop rotations of winter wheat-soybean/fallow[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 207: 38–47.
- [19] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH_4 和 CO_2 排放通量的影响初探[J]. 中国农业气象, 2004, 25(3): 8–10.
WAN Yun-fan, LIN Er-da. The influence of tillage on CH_4 and CO_2 emission flux in winter fallow cropland[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(3): 8–10.
- [20] Cai Y, Ding W, Luo J. Nitrous oxide emissions from Chinese maize-wheat rotation systems: A 3-year field measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65(1): 112–122.
- [21] Tellez R A, García M S, Navas M, et al. N_2O and CH_4 emissions from

- a fallow-wheat rotation with low N input in conservation and conventional tillage under a Mediterranean agroecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 508:85-94.
- [22] 赵江红, 焦 燕, 徐 柱, 等. 不同天然草地开垦年限下土壤特性对CH₄吸收的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(2):148-153.
- ZHAO Jiang-hong, JIAO Yan, XU Zhu, et al. Effects of soil properties on CH₄ absorption under different cultivation years of grassland reclamation[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(2):148-153.
- [23] 黄懿梅, 安韶山, 曲 东, 等. 两种测定土壤微生物量氮方法的比较初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6):124-129.
- HUANG Yi-mei, AN Shao-shan, QU Dong, et al. Comparison between two methods of determination soil microbial biomass nitrogen [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6):124-129.
- [24] 杨 毅, 黄 玫, 刘洪升, 等. 土壤呼吸的温度敏感性和适应性研究进展[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10):1811-1820.
- YANG Yi, HUANG Mei, LIU Hong-sheng, et al. The interrelation between temperature sensitivity and adaptability of soil respiration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(10):1811-1820.
- [25] Wang X, Liu L, Piao S, et al. Soil respiration under climate warming: Differential response of heterotrophic and autotrophic respiration[J]. *Global Chang Biology*, 2014, 20(10):3229-3237.
- [26] Hartley I P, Heinemeyer A, Ineson P. Effects of three years of soil warming and shading on the rate of soil respiration: Substrate availability and not thermal acclimation mediates observed response[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(8):1761-1770.
- [27] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, et al. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1):1-10.
- [28] Patrick J M, Myron J M, Francis P B. Soil warming in a northern hardwood forest: Trace gas fluxes and leaf litter decomposition[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28(9):1365-1372.
- [29] 张明乾, 韩证仿, 陈 金, 等. 夜间增温对冬小麦土壤微生物量碳氮及其活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11):56-62.
- ZHANG Ming-qian, HAN Zheng-fang, CHEN Jin, et al. Impacts of nighttime warming on soil microbial biomass carbon and nitrogen and its activity in the main cropping areas of winter wheat in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11):56-62.
- [30] 蒋 容, 余 一, 唐玉蓉, 等. 增温和生物炭添加对农田土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(1):75-80, 88.
- JIANG Rong, YU Yi, TANG Yu-rong, et al. Effects of warming and biochar addition on soil enzyme activities in farmland[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(1):75-80, 88.
- [31] 丁乐乐, 程 浩, 刘增富, 等. 环境增温对稻麦轮作生态系统中作物产量的影响[J]. 植物科学学报, 2013, 31(1):49-56.
- DING Le-le, CHENG Hao, LIU Zeng-fu, et al. Experimental warming on the rice-wheat rotation agroecosystem[J]. *Plant Science Journal*, 2013, 31(1):49-56.
- [32] 吴杨周, 陈 健, 胡正华, 等. 水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1):280-287.
- WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, et al. Effects of reduced water and diurnal warming on winter-wheat biomass and soil respiration[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1):280-287.