

涂 纯, 李发东. 模拟增温条件下翻耕免耕农田土壤 CH₄ 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 CH₄ fluxes to simulated warming in conventional tillage and no-tillage systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1788–1796.

模拟增温条件下翻耕免耕农田土壤 CH₄ 通量响应

涂 纯^{1,2}, 李发东^{1,2*}

(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.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为研究未来气候变暖下我国华北翻耕、免耕农田 CH₄ 通量响应, 评估该地农田碳汇/源情况, 使用远红外辐射增温仪模拟气候变暖, 设计翻耕增温(CTW)、翻耕不增温(CTN)、免耕增温(NTW)、免耕不增温(NTN) 4 个处理。研究表明, 2013—2015 年小麦—玉米季, 增温分别显著提高翻耕、免耕农田 10 cm 土壤温度 1.5 °C 和 1.4 °C ($P < 0.05$); 但对两种耕作农田土壤水分的影响并不显著 ($P > 0.05$)。各处理土壤 CH₄ 通量无明显季节变化, 但累积 CH₄ 吸收具有显著年际差异。2013—2014 年小麦季, CTW 和 NTW 相比 CTN 和 NTN 处理, 累积 CH₄ 吸收分别显著增加 35.8% 和 108.8% ($P < 0.01$); 但在 2014—2015 年, CTW 处理显著降低 17.7% ($P < 0.05$)。两年玉米季, 处理间累积 CH₄ 吸收无显著差异 ($P > 0.05$)。各处理土壤微生物生物量碳(MBC)含量与 CH₄ 存在显著正相关关系。未来气候变暖条件下, 翻耕农田 MBC 含量减小将可能减缓华北农田 CH₄ 吸收。

关键词:模拟增温; 翻耕农田; 免耕农田; 土壤 CH₄ 通量

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)09-1788-09 doi:10.11654/jaes.2016-0182

Responses of soil CH₄ fluxes to simulated warming in conventional tillage and no-tillage systems

TU Chun^{1,2}, LI Fa-dong^{1,2*}

(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.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Methane (CH₄) is one of the most important greenhouse gases contributing to climate warming. Understanding the responses of cropland soil CH₄ fluxes to climate warming under different tillage systems is critical to evaluation of the dynamics of soil carbon sink/source along with climate changes in the North China Plain (NCP). A field experiment of simulated climate warming using infrared radiation instrument was conducted to measure CH₄ fluxes from the wheat-maize rotation field with four treatments including conventional tillage with and without warming (CTW and CTN) and no-tillage with and without warming (NTW and NTN). Results showed that during wheat-maize growing period in 2013–2015 soil temperature at 10 cm soil depth was significantly elevated by 1.5 °C in CTW, and 1.4 °C in NTW, compared with CTN and NTN, respectively ($P < 0.05$). The warming did not significantly affect soil moisture in these two tillage systems because of irrigation ($P > 0.05$). Furthermore, soil CH₄ fluxes did not show obvious seasonal changes among treatments. However, annual cumulative soil CH₄ uptake showed significant differences among years. During wheat season in 2013–2014, the cumulative CH₄ uptake in CTW and NTW increased by 35.8% and 108.8%, compared with those in CTN and NTN, respectively ($P < 0.01$). During 2014–2015, however, it was reduced by 17.7% in CTW, compared with CTN ($P < 0.05$). During maize season in two years, cumulative CH₄ uptake was not significantly affected by experimental warming in two tillage systems ($P > 0.05$). In addition, a significant positive relationship between soil microbial biomass carbon (MBC) and CH₄ uptake was found. Decreased MBC content in CTW indicated that the limitation of climate warming projection on activity of soil organism may reduce the capability of soil CH₄ sink in conventional tillage farmland of NCP.

Keywords: simulated warming; conventional tillage system; no-tillage system; soil CH₄ flux

收稿日期: 2016-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170414); 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 涂 纯(1986—), 博士研究生, 主要从事农田生态系统碳、氮循环研究。E-mail: tuc.13b@igsnr.ac.cn

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

气候变暖是当今全球关注的重要环境问题,其原因主要是大气中 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体浓度升高所致,尽管 CH₄ 在大气中的浓度远小于 CO₂,但其单位质量的全球增温潜势是 CO₂ 的 25~28 倍^[1-2],对气候变暖具有重要影响。土壤是已知吸收大气 CH₄ 的唯一生物壑,每年吸收量约 30 Tg,占全球 CH₄ 排放总量的 10%~15%^[1-3],对减缓气候变化具有重要意义。然而,未来气候变暖背景下,陆地生态系统,尤其是农田生态系统 CH₄ 通量的变化响应,关系到陆地生态系统碳源-汇功能的精确评估。

目前,针对土壤 CH₄ 通量对模拟增温的响应研究,已在森林^[4-6]、高寒草甸^[7]、湿地^[8]以及半干旱地区草地^[9-10]等不同生态系统广泛开展,而有关农田生态系统的研究还较少涉及。之前的研究认为^[9-11],增温对 CH₄ 吸收的影响主要源于土壤温度升高促进甲烷氧化菌的数量及其活性,增加 CH₄ 氧化吸收;相反,对 CH₄ 氧化的限制主要是增温导致的土壤干旱制约到上述微生物活动。Liu 等^[12]在干旱-半干旱农田区的研究认为,增温造成的土壤干旱胁迫,限制了甲烷氧化细菌活性及其对大气 CH₄ 的氧化吸收,但研究并没有发现增温对相关微生物有显著影响。而在稻田的研究发现,土壤水分虽然不是限制性因子,但增温并未显著加强 CH₄ 通量及相关微生物活动^[13]。因此,明确增温条件下农田 CH₄ 通量的控制机制,是评估未来农田 CH₄ 源-汇响应的关键过程。

我国华北旱作农田主要作为 CH₄ 汇富集区^[14-15],该地实施的翻耕和免耕管理措施对 CH₄ 吸收的影响研究已有大量报道,例如万云帆等^[16]、田慎重等^[17]、张明园等^[18]研究都发现,翻耕后土壤孔隙度增大,增强了大气 CH₄ 和 O₂ 向土壤扩散,促进 CH₄ 通量交换;相反,免耕造成的土壤表层紧实阻碍到土壤透气性以及相关微生物的活动繁殖,不利于 CH₄ 吸收。然而,未来气候变暖是否改变这两种耕作措施的土壤理化性质以及微生物的活性,进而影响土壤 CH₄ 通量特征,目前研究还尚未涉及。因此,本研究通过设计远红外辐射增温实验来模拟气候变暖,探讨未来增温环境下,华北翻耕、免耕农田土壤 CH₄ 通量的响应及其控制机制,为评估气候变暖背景下区域温室气体排放提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究选址于中国科学院禹城综合试验站(36°40'~

37°12'N, 116°22'~116°45'E),该地是华北地区典型的农田生态系统,冬小麦-夏玉米为主要的轮作系统。该地属于温带半干旱季风气候区,海拔 23.4 m,年均温度 13.4 °C,年均降水量约 567 mm,其中 70%的降水集中在每年 6—9 月。土壤类型以潮土和盐化潮土为主,表土质地为轻、中壤土^[19]。

1.2 实验设计

实验设计增温为主处理,耕作措施为副处理,分别是翻耕增温(CTW)、翻耕不增温(CTN)、免耕增温(NTW)、免耕不增温(NTN),每个处理 4 次重复。其中副处理翻耕、免耕实验于 2003 年布置完成,每个小区面积 3.7 m×45 m=166.5 m²。增温实验开始于 2010 年 4 月,分别从翻耕、免耕处理各选取 4 小区,每个耕作小区随机设计增温、不增温处理各 4 个,共计 16 个小区^[19]。研究采用 MSR-2420 红外增温器(Kalglo Electronics Inc, Bethlehem, PA, USA)模拟气候变暖,设备尺寸 165 cm×15 cm,增温器悬挂在 3 m 高铁架上的防雨板内,增温功率 2000 W,其向下有效辐射面积 2 m×2 m=4 m²,全年增温幅度 0.8~2.2 °C。不增温小区安装相同高度的铁架和防雨板,使其对阳光和雨水的干扰与增温小区保持一致。同一耕作小区内的增温、不增温处理间隔 5 m,以避免相邻增温小区产生的辐射边缘效应。实验区种植作物为冬小麦、夏玉米,每年 10 月上旬收获玉米、中旬播种小麦,翌年 6 月上旬收获小麦,之后播种玉米。各处理小麦季施肥量 285 kg N·hm⁻²(10 月播种期施基肥 112.5 kg N·hm⁻², 3 月返青后追肥 172.5 kg N·hm⁻²),玉米季 207 kg N·hm⁻²(7 月追肥一次性施入)。小麦播种前,各处理前茬作物秸秆全部清除,之后翻耕处理撒施肥料,并人工翻耕 10~15 cm 土层,将肥料混入土壤;免耕处理不进行翻耕,其基肥在播种时单独开沟施入。玉米季各处理不进行翻耕。另外,免耕处理秸秆还田代替部分氮肥,其中小麦季还田量 48 kg·hm⁻²,玉米季 32 kg·hm⁻²,秸秆来源均为前茬作物。小麦和玉米季追肥后进行一次灌溉,其中小麦灌溉量在 70~80 mm,玉米季 40~50 mm。由于 2015 年夏季降水显著减小,在 2015 年 6 月 18 日增加一次灌溉。

1.3 CH₄ 采集与分析

研究使用静态密闭气室法采集 CH₄^[20],采集时间为 2013 年 10 月 15 日至 2015 年 10 月 7 日,其中施肥+灌溉后连续采集 7 d,其余时间每隔 5~7 d 采集一次,每次采气于北京时间 9:00—11:00 进行。采气装置分不锈钢基座和 PVC 罩两部分,其中基座内径 19 cm,外径

22 cm, 凹槽深 3 cm; PVC 气室罩直径 20 cm, 高 13.5 cm。其中基座安置在铁架正下方, 并处于两行作物之间; 另外, 基座只在播种期拔出, 其余时间固定不动。采气前 24 h, 将基座内杂草等植物齐地剪掉, 并去除一切活体动物, 此举是减小植物或动物活动对气体采集的干扰^[7]。采气时, 将上部 PVC 罩放入基座凹槽内, 并加水保持封闭(冬季使用无腐蚀防冻剂代替水), 使用 50 mL 注射器于 0、10、20、30 min 采集气体, 并使用气相色谱仪 GC7890A 于 24 h 内测定完毕。 CH_4 通量速率计算公式如下^[16,20]:

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

式中: F 为 CH_4 通量, $\mu\text{g CH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; K 为转化系数(0.001); T_a 为测定期静态气室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$; M 为摩尔质量(16); V 为标准大气条件下的摩尔体积, $22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$; H 为气室高度, m; dc/dt 为 CH_4 浓度变化率, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

作物生育期累积 CH_4 吸收使用相邻两次测定速率与采气间隔时间乘积后累加得出^[2]。

1.4 土壤温度、水分、微生物生物量碳(MBC)测定

各处理采气时, 使用便携式土壤温湿度速测仪同期测定 10 cm 土壤温度与土壤体积含水量; 同时, 每月取土 1~2 次, 测定 MBC 含量, 使用 K_2SO_4 提取, 氯仿熏蒸 24 h 后, 使用重铬酸钾-硫酸溶液测定^[21]。

1.5 数据处理

使用 Excel 和 SPSS 进行数据处理和分析, 最小显著差异法(LSD)分析不同处理间土壤温度、土壤水分、 CH_4 通量及累计 CH_4 吸收、MBC 含量差异, 并使

用 Origin 9.1 和 Excel 绘图。

2 结果分析

2.1 研究期水热条件变化

通过分析 2013—2015 年作物生育期气温和降水变化显示(图 1), 2013—2014、2014—2015 年小麦季气温分别是 10.3°C 和 11.1°C , 高于多年平均值(9.27°C); 但第 2 年小麦季降水为 138.0 mm, 低于第 1 年(171.0 mm)和多年平均值(170.1 mm)。玉米季, 2014 年和 2015 年气温分别是 23.0°C 和 24.1°C , 接近多年平均值(23.0°C); 但第 2 年玉米季降水(2014 年: 196.8 mm; 2015 年: 77.5 mm)显著低于多年平均值(394.0 mm)。

不同处理 10 cm 土壤温度具有相似的季节变化规律(图 2), 从小麦播种至翌年玉米生长, 温度呈现先降低后升高的凹型变化特征。小麦季, CTW、CTN、NTW 和 NTN 处理平均土壤温度分别是 7.8°C 、 6.4°C 、 9.0°C 、 7.6°C , 玉米季分别是 22.3°C 、 21.2°C 、 22.5°C 、 21.8°C 。分析发现, 不同时期增温提高土壤温度的幅度并不具有季节对称性, 由于小麦生长期间外界气温相对较低, 增温显著增加翻耕、免耕农田土壤温度 1.5°C 和 1.4°C ($P < 0.05$), 尤其是在冬季(12 月至翌年 2 月), 外界气温降至全年最低水平, 此时增温极显著提高翻耕、免耕农田土壤温度 1.8°C 和 1.5°C ($P < 0.01$); 但在玉米季, 增温提高土壤温度没有达到显著水平 ($P > 0.05$)。

与土壤温度相反, 由于降水、灌溉的影响, 各处理土壤水分呈显著的波动变化(图 2): 小麦季 CTW、CTN、NTW 和 NTN 处理平均土壤体积含水量分别是

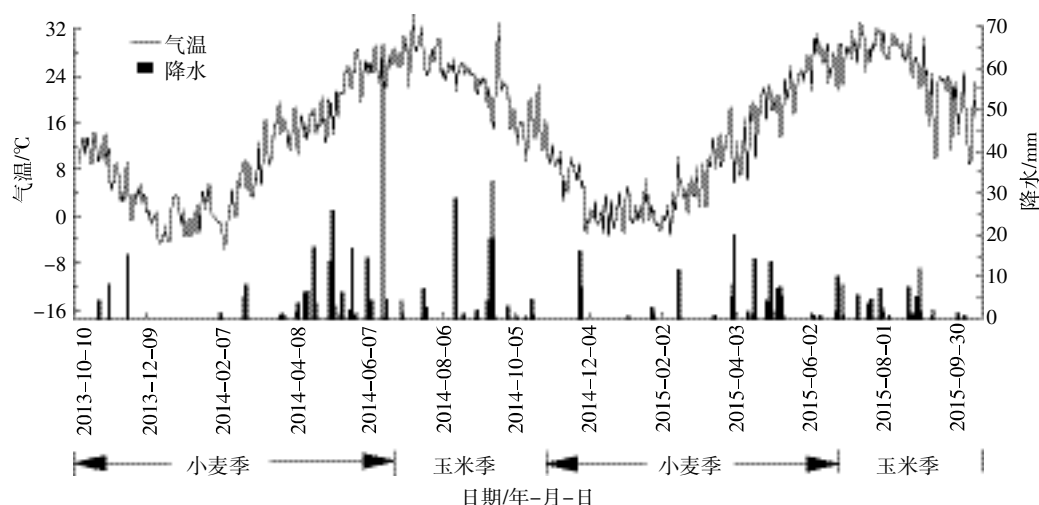


图 1 2013—2015 年气温、降水变化

Figure 1 Variations of air temperature and precipitation during 2013—2015

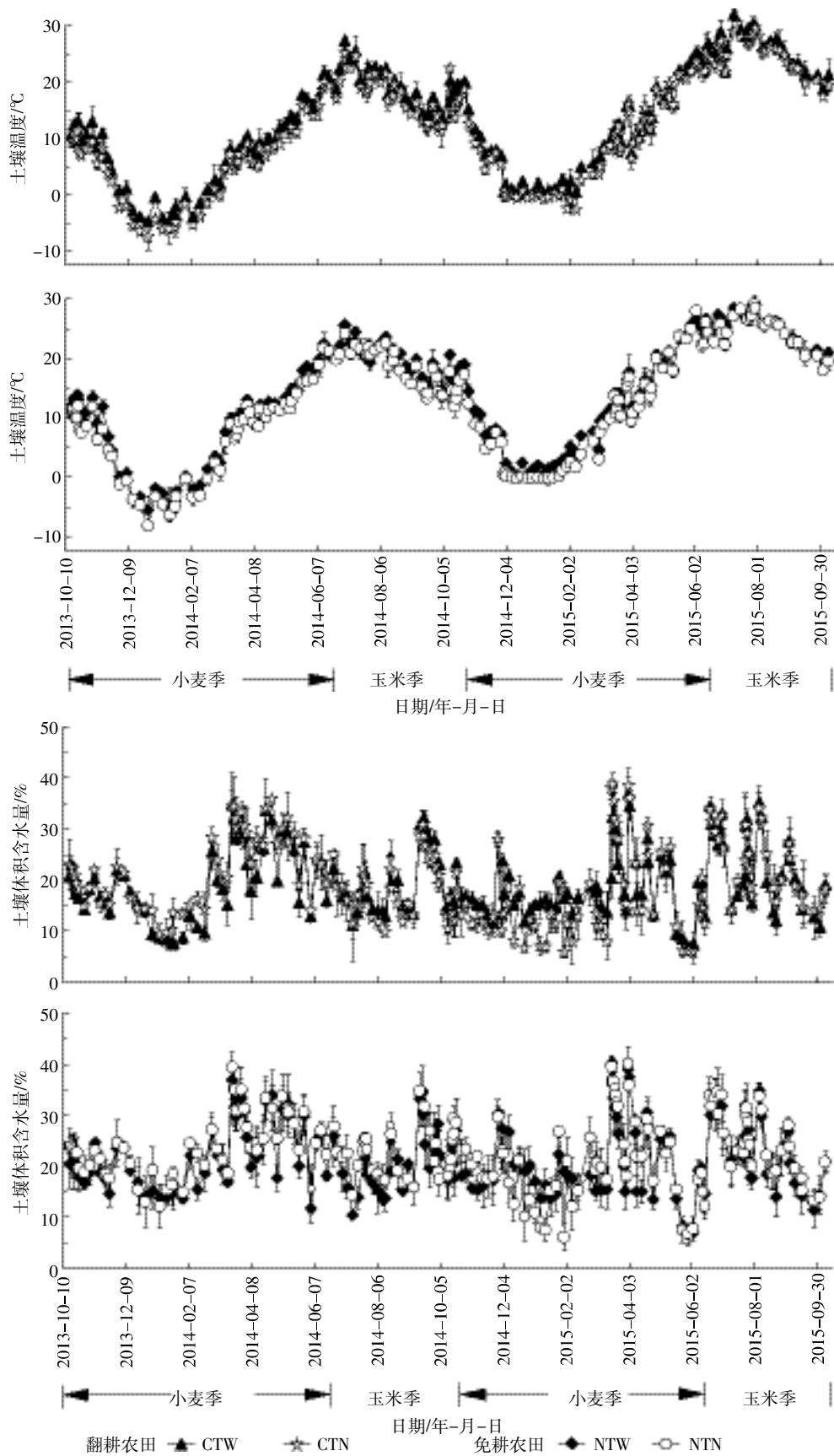


图 2 2013—2015 年不同处理 10 cm 土壤温度、土壤体积含水量变化

Figure 2 Variations of soil temperature and soil volumetric water at 10 cm in treatments during 2013–2015

17.8%、17.9%、20.3%和 21.1%，玉米季分别是 19.7%、20.0%、20.8%和 22.6%。尽管增温加速土壤水分蒸发，但由于灌溉的作用，增温对作物不同生长期土壤水分的影响并没有达到显著性水平($P>0.05$)。相反，冬季气温低于 0℃时，冻结的土壤因增温融化，增加了土壤水分含量，不过处理间水分含量无显著差异。不同耕作处理对比发现，免耕处理覆盖秸秆限制了土壤水分过快散失，因此，相比翻耕处理，全年免耕处理土壤水分含量显著提高 1.8%~2.9%($P<0.05$)。

2.2 不同处理土壤 CH₄ 通量变化

监测显示，各处理 CH₄ 通量无明显季节变化特征(图 3)，处理间土壤 CH₄ 通量在 -236.6~252.8 $\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 间变化，总体上两种耕作农田以 CH₄ 吸收占主导，表明华北农田主要作为 CH₄ 汇富集区。全年分析发现，增温对土壤 CH₄ 通量速率并无显著影响，但在冬季出现显著的年际变化差异，2013—2014 年冬季，各处理出现 CH₄ 释放，其值在 47.3~252.7 $\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 间变化，但在 2014—2015 年冬季，各处理以 CH₄ 吸收为主，其吸收速率在 -123.1~-2.3 $\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 间变化。小麦返青后(3月中旬)进行灌溉，各处理出现不同程度的 CH₄ 释放现象，CTW、CTN、NTW、NTN 处理 CH₄ 释放分别为 33.5、70.5、105.4、185.2 $\mu\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，表明增温可显著降低两种耕作农田 CH₄ 释放。但在玉米季(7月中旬)灌溉后，并没有发现 CH₄ 释放现象。

通过计算作物生育期累积 CH₄ 吸收发现(表 1)，在 2013—2014 年小麦季，增温处理 CTW、NTW 相比不增温处理 CTN、NTN 分别显著增加 35.8%和 108.8%的 CH₄ 吸收($P<0.01$)；但在 2014—2015 年，CTW 处理相比 CTN 处理显著降低 CH₄ 吸收 17.7%($P<0.05$)，而免耕增温与不增温处理间差异不显著($P>0.05$)。两年玉米季，各处理平均累积 CH₄ 吸收在 707.6~958.8 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 间变化，增温对累积 CH₄ 吸收无显著影响。另外，耕作处理对比发现，CTN 处理累积 CH₄ 吸收只在 2013—2014 年小麦季显著大于 NTN 处理 54.9%($P<0.01$)，其余生育期处理间并无显著差异。

2.3 不同处理土壤 MBC 含量变化

土壤 MBC 表征了农田土壤微生物的活性。从图 4 可以看出，MBC 含量呈现明显的季节波动，3 月份之后，MBC 逐渐升高，至夏季(6月至 8月)达到最高值，之后下降至冬季最低。通过分析两年的数据发现，增温对翻耕农田 MBC 含量的影响具有显著的年际差异，2013—2014 年小麦季，CTW 和 NTW 处理平均

表 1 不同处理冬小麦-夏玉米季土壤 CH₄ 累积吸收量

Table 1 Cumulative soil CH₄ uptake in different treatments from winter wheat-summer maize season

处理	小麦季/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$		玉米季/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	
	2013—2014 年	2014—2015 年	2014 年	2015 年
CTW	1 776.3±242.2a	1 857.2±331.2b	766.2±43.2a	958.8±131.2a
CTN	1 308.3±171.3b	2 255.7±251.7a	838.5±76.6a	894.8±81.7a
NTW	1 763.9±231.2a	2 414.5±136.5a	897.5±98.2a	881.2±111.3a
NTN	844.8±91.2c	2 557.2±281.1a	707.6±56.3a	874.4±129.3a

注：同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

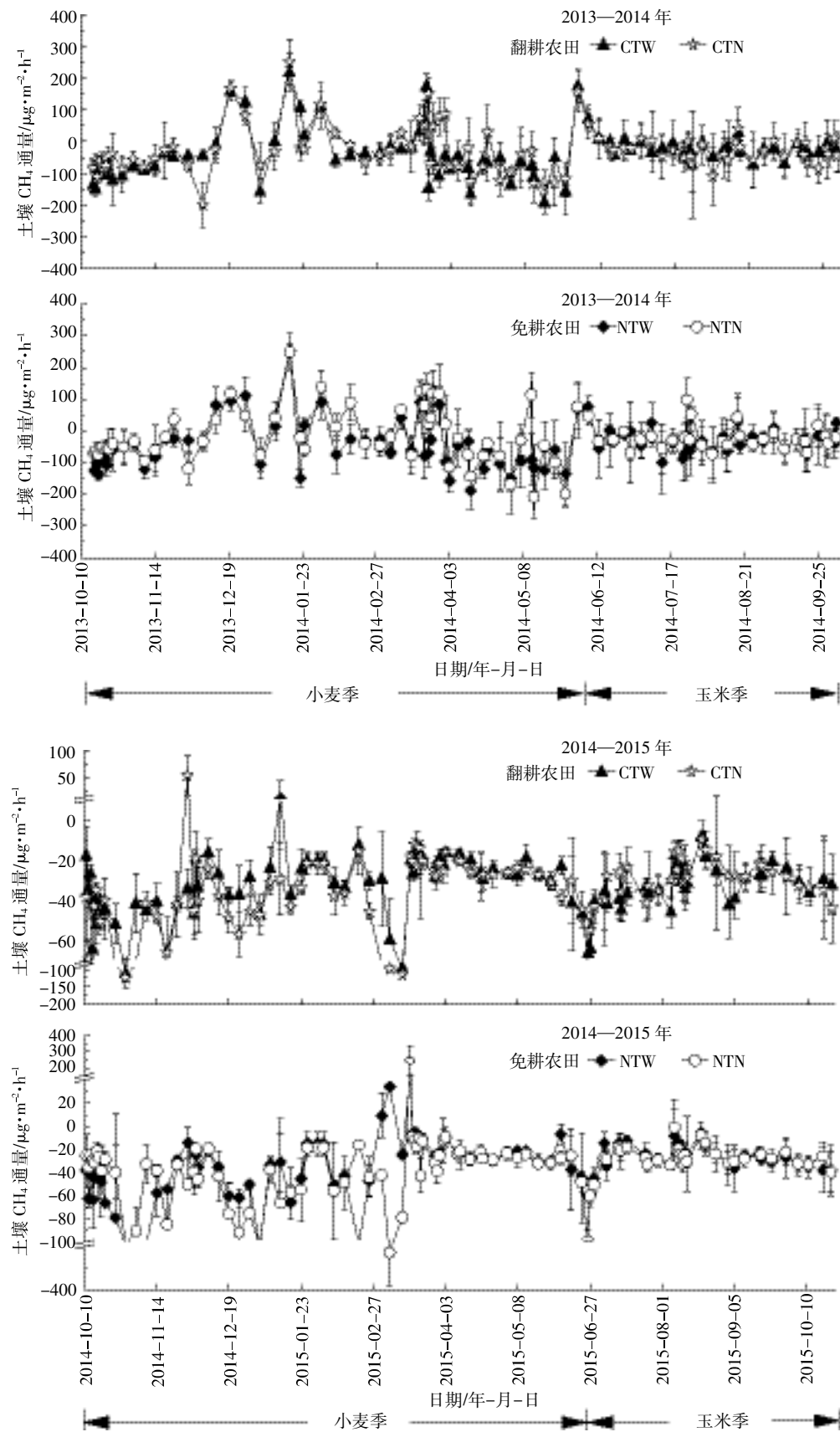
MBC 含量分别显著高于 CTN 和 NTN 处理 12.9%和 16.9%($P<0.05$)，但在 2014—2015 年小麦季，CTW 处理相比 CTN 处理 MBC 含量显著降低 30.9%($P<0.01$)，而免耕增温对 MBC 含量无显著影响。另外，由于免耕覆盖秸秆增加了土壤碳输入，NTW 和 NTN 处理全年 MBC 含量相比 CTW 和 CTN 处理分别显著增加 19.9%和 9.9%($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 增温对翻耕、免耕农田土壤 CH₄ 通量的影响

干旱-半干旱地区土壤 CH₄ 通量主要表现为吸收现象，之前在森林^[6]、草地^[9,11]生态系统的研究发现，增温造成的土壤干旱胁迫，会限制土壤甲烷氧化菌的活性，进一步抑制其对大气 CH₄ 的氧化吸收。农田翻耕产生的土壤扰动虽然增加土壤孔隙度，促进土壤-大气 CH₄ 通量交换，但是在增温时易导致土壤水分过快散失形成干旱胁迫，不利于上述微生物利用 CH₄ 作为能量来源。Liu 等^[12]在旱作农田的研究认为，增温形成的干旱机制限制了甲烷氧化菌的数量及其活性，使得 CH₄ 吸收速率显著降低。然而，本研究发现模拟增温并没有显著改变翻耕农田土壤 CH₄ 吸收速率，但小麦季累积 CH₄ 吸收发生显著的年际差异，其中 2013—2014 年小麦季增温显著增加累积 CH₄ 吸收，而 2014—2015 年相反。

研究发现，2013—2014 年小麦季，降水量与多年均值持平，各处理土壤水分含量维持在较高水平(18.4%~22.7%)。因此，增温将进一步促进甲烷氧化菌活性并氧化 CH₄。有研究认为^[11]，在水分不受限制条件下，增温可刺激到甲烷氧化菌活动，增大 CH₄ 氧化速率，本研究发现温度与 CH₄ 通量显著相关(Pearson 相关系数为 0.41, $P<0.01$)，证实了水分不受限制时温度对 CH₄ 吸收产生的正效应。2014—2015 年，降水显著减小，虽然灌溉能维持小麦正常生长，但各处

图 3 2013—2015 年处理间土壤 CH_4 通量变化Figure 3 Variations of soil CH_4 fluxes in treatments during 2013—2015

理土壤含水量(15.4%~19.8%)相比前一生育期减小,则将相对限制到甲烷氧化菌对 CH_4 的消耗,降低 CH_4 吸收。而玉米季增温对累积 CH_4 吸收无显著影响,可能是由于玉米季气温相对较高,增温的促进作用并不明显,而降水及灌溉又削弱了水分的限制作用,因此增温对微生物氧化 CH_4 无显著影响。

相比翻耕农田,实施免耕增加了表层土壤紧实度,阻碍大气中 CH_4 和 O_2 进入土壤,而且免耕农田易形成厌氧环境,有利于 CH_4 释放。Rafique 等^[22]通过模型模拟研究,发现增温 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 显著提高免耕农田 CH_4 释放 10%。与之相反,本研究发现华北免耕农田主要以 CH_4 吸收为主导,而且在 2013—2014 年小麦季,增温显著促进了累积 CH_4 吸收。这表明,在水分不受限制的情况下,增温可能促进土壤甲烷氧化菌活动和繁殖,加强对大气 CH_4 的吸收。

3.2 增温条件下 MBC 变化对 CH_4 通量的影响

MBC 作为土壤中的活性碳组分,能快速反应土壤碳过程变化,是土壤 CH_4 吸收重要的生物指示因子^[23]。研究发现,2013—2014 年小麦季,增温显著增加翻耕农田 MBC 含量,但在 2014—2015 年相反,与张明乾

等^[23]的研究并不一致。土壤水分充足条件下,溶解性有机碳含量增加,利于微生物在温度上升时提高其活性^[8],相反,水分亏缺,微生物活性将受到抑制。本研究期间,灌溉维持了相对稳定的土壤水分,但在 2015 年降水显著降低的情况下,增温导致的土壤相对干旱,可能限制到翻耕增温处理微生物的数量及其活性。另外,有研究发现^[19,23-24],长期增温后,微生物群落结构产生适应性选择,导致微生物多样性下降并影响土壤微生物含量。本研究持续了 6 年增温实验,这种长期增温可能影响微生物多样性,尤其在低温阶段,微生物对增温的选择性生长可能更明显,并最终影响 MBC 含量。相比翻耕处理,免耕处理长期覆盖秸秆提供稳定的碳输入,而且秸秆覆盖能减小土壤水分耗散,保持水分稳定,可能为微生物的活动繁殖创造良好的环境,在此条件下,增温将显著提高免耕农田 MBC 含量。

另外,各处理土壤 CH_4 吸收与 MBC 含量存在显著相关性(图 5),与赵江红等^[21]的研究一致,表明土壤微生物活性更好地指示了 CH_4 吸收情况。增温对 MBC 的影响也说明,长期增温及水分的年际波动,可

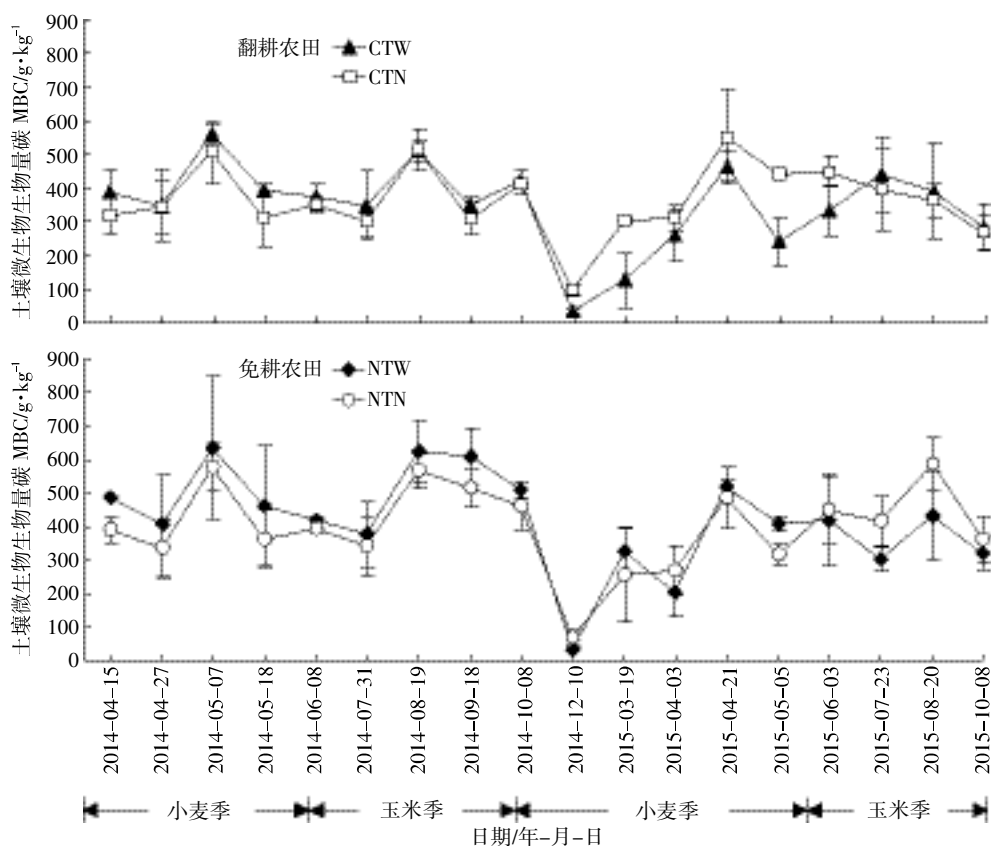
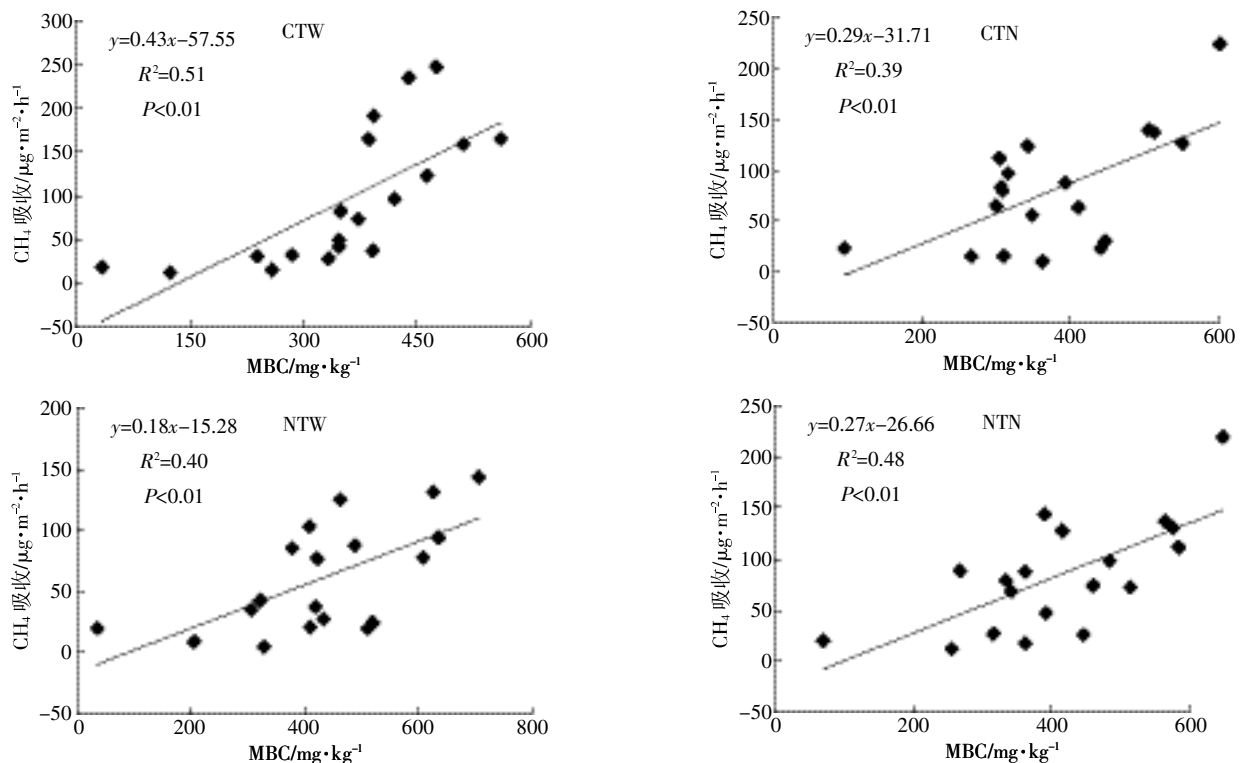


图4 不同处理土壤微生物生物量碳(MBC)变化

Figure 4 Variations of soil microbial carbon(MBC) content in treatments

图5 不同处理土壤 CH₄ 吸收与 MBC 关系Figure 5 Relationship between soil CH₄ uptake and MBC in treatments

能影响甲烷氧化菌的数量及活性,进一步制约土壤 CH₄ 吸收,尤其是长期增温后翻耕农田土壤微生物形成适应性生长,可能降低微生物多样性及其群落结构,削弱农田 CH₄ 汇功能。因此,后期应加强模拟增温条件下 MBC 含量与 CH₄ 吸收关系的长期监测研究。

4 结论

野外模拟增温实验表明,两年作物生育期,增温对华北翻耕、免耕农田 CH₄ 通量速率无显著影响,但具有显著的年际差异,2013—2014 小麦季,增温显著促进两种耕作农田累积 CH₄ 吸收;但在 2014—2015 年相反。玉米季,增温对累积 CH₄ 吸收影响不显著。微生物生物量碳含量的变化是导致各处理累积 CH₄ 吸收产生差异的主要原因,在第 1 年小麦生育期,增温提高了微生物含量,并促进 CH₄ 吸收,但长期增温导致翻耕农田微生物量显著减小,将削弱土壤对 CH₄ 氧化吸收能力。未来气候变暖条件下,农田土壤微生物多样性及其含量降低,将可能进一步影响华北农田碳汇功能。

参考文献:

[1] IPCC. Summary for Policymakers[M]//Climate Change 2013: The Physi-

cal Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 2013:27.

- [2] Tellez-Rio A, Garcia-Marco S, Navas M, et al. N₂O and CH₄ 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(1): 85-94.
- [3] 李 俊,同小娟,于 强. 不饱和土壤 CH₄ 的吸收与氧化[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 141-147.
LI Jun, TONG Xiao-juan, YU Qiang. Methane uptake and oxidation by unsaturated soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 141-147.
- [4] Rustad L E, Fernandez I J. Experimental soil warming effects on CO₂ and CH₄ flux from a low elevation spruce-fir forest soil in Maine, USA[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(6): 597-605.
- [5] Yan J, Zhang W, Wang K, et al. Responses of CO₂, N₂O and CH₄ fluxes between atmosphere and forest soil to changes in multiple environmental conditions[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 300-312.
- [6] McHale P J, Mitchell M J, Bowles F P. Soil warming in a northern hardwood forest trace gas fluxes and leaf litter decomposition[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28(6): 1365-1372.
- [7] Hu Y, Wang Q, Wang S, et al. Asymmetric responses of methane uptake to climate warming and cooling of a Tibetan alpine meadow assessed through a reciprocal translocation along an elevation gradient[J]. *Plant and Soil*, 2016, 30(2): 1-13.
- [8] Ward S E, Ostle N J, Oakley S, et al. Warming effects on greenhouse gas fluxes in peatlands are modulated by vegetation composition[J]. *Ecology*

- Letters*, 2013, 16(5):1285–1293.
- [9] 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 and the Environment*, 2012, 10(3):520–527.
- [10] Unteregelsbacher S, Gasche R, Lipp L, et al. Increased methane uptake but unchanged nitrous oxide flux in montane grasslands under simulated climate change conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(8):586–596.
- [11] Dijkstra F A, Morgan J A, Follett R F, et al. Climate change reduces the net sink of CH₄ and N₂O in a semiarid grassland[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4):1816–1826.
- [12] Liu L, Hu C, Yang P, et al. Effects of experimental warming and nitrogen addition on soil respiration and CH₄ fluxes from crop rotations of winter wheat–soybean/fallow[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 207(5):38–47.
- [13] Gaihre Y K, Wassmann R, Tirol-Padre A, et al. Seasonal assessment of greenhouse gas emissions from irrigated lowland rice fields under infrared warming[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 184(7):88–100.
- [14] 张雪松, 申双和, 李俊, 等. 华北平原冬麦田土壤 CH₄ 的吸收特征研究[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 12(2):181–188.
ZHANG Xue-song, SHENG Shuang-he, LI Jun, et al. Soil CH₄ uptake in winter wheat field in the North China plain[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 12(2):181–188.
- [15] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3):297–307.
SONG Li-na, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3):297–307.
- [16] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH₄ 和 CO₂ 排放通量的影响初探[J]. *中国农业气象*, 2004, 25(6):8–10.
WAN Yun-fan, LIN Er-da. The influence of tillage on CH₄ and CO₂ emission flux in winter fallow cropland[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(6):8–10.
- [17] 田慎重, 宁堂原, 李增嘉, 等. 不同耕作措施对华北地区麦田 CH₄ 吸收通量的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(2):541–548.
TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, LI Zeng-jia, et al. Effect of CH₄ uptake flux under different tillage systems in wheat field in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):541–548.
- [18] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6):203–209.
ZHANG Ming-yuan, WEI Yan-hua, KONG Fan-lei, et al. Effects of tillage practices on soil carbon storage and greenhouse gas emission of farmland in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6):203–209.
- [19] 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.
- [20] Cai Y J, Ding W X, Luo J F. Nitrous oxide emissions from Chinese maize wheat rotation systems: A 3-year field measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65(2):112–122.
- [21] 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.
- [22] Rafique R, Kumar S, Luo Y, et al. Estimation of greenhouse gases (N₂O, CH₄ and CO₂) from no-till cropland under increased temperature and altered precipitation regime: A DAYCENT model approach[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 118(6):106–114.
- [23] 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):1464–1470.
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):1464–1470.
- [24] Fu G, Shen Z, Zhang X, et al. Response of soil microbial biomass to short-term experimental warming in alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 61(61):158–160.