

张鑫磊, 杨 镇, 李 旻, 等. 夜间增温条件下免耕对土壤碳矿化的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(3): 540-545.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.03.009

夜间增温条件下免耕对土壤碳矿化的影响

张鑫磊¹, 杨 镇¹, 李 旻², 谢晓金¹, 张耀鸿¹

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 山西省气象服务中心, 山西 太原 030002)

摘要: 通过室内恒温培养试验研究了 CK(常温+翻耕)、W(夜间增温+翻耕)、NT(常温+免耕)和 WNT(夜间增温+免耕)4个处理土壤耕作层有机碳矿化速率及其对不同种类氮肥的响应特征。各处理土壤分别加入2种氮肥溶液[(NH₄)₂SO₄和KNO₃]和蒸馏水之后,在5℃、10℃、15℃、20℃、25℃和30℃条件下室内恒温培养,测定土壤有机碳矿化速率。结果表明,在5~25℃,土壤有机碳矿化速率随着培养温度的升高而显著增加。与CK相比,NT和WNT处理显著提高了土壤有机碳矿化速率,分别增加了14.6%~36.7%和18.3%~60.0%。与添加蒸馏水相比,施加(NH₄)₂SO₄溶液使土壤有机碳矿化速率均值增加了84.6%~93.3%,而施加KNO₃则无明显影响。而且,施加(NH₄)₂SO₄条件下4种处理土壤的Q₁₀值均增大。因此,本试验中夜间增温和免耕均提高了农田土壤有机碳的矿化速率,且两者叠加表现出正交互作用;施用KNO₃肥料可缓解土壤有机碳矿化。

关键词: 夜间增温; 免耕; 有机碳矿化

中图分类号: S152.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)03-0540-06

Effects of no-tillage on soil carbon mineralization under nighttime warming

ZHANG Xin-lei¹, YANG Zhen¹, LI Yang², XIE Xiao-jin¹, ZHANG Yao-hong¹

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Shanxi Meteorological Service Center, Taiyuan 030002, China)

Abstract: Incubation experiments were conducted to investigate the mineralization rates of organic carbon of four treated tillage layer soils and the response to different kinds of nitrogen fertilizer. Four treatments were: CK (normal temperature + tillage), W (nighttime warming + tillage), NT (normal temperature + no tillage) and WNT (nighttime warming + no tillage). The soils were incubated at 5℃, 10℃, 15℃, 20℃, 25℃ and 30℃ with the addition of (NH₄)₂SO₄ or KNO₃ or distilled water, respectively. At 5–25℃, the mineralization rates of soil organic carbon increased with the increasing of incubation temperature. Compared with CK, the mineralization rate of soil organic carbon significantly increased by 14.6%–36.7% and 18.3%–60.0% under NT and WNT treatments, respectively. Compared with the applica-

tion of distilled water, the application of (NH₄)₂SO₄ increased soil organic carbon mineralization rates by 84.6%–93.3%, while the application of KNO₃ had no significant effect. Furthermore, Q₁₀ values of the four soils treated with (NH₄)₂SO₄ were all increased. Thus, in the study, nighttime warming and no tillage could both evidently stimulate soil organic carbon mineralization, and both of them showed positive interaction; application of KNO₃ fertilizer could alleviate the process of soil organic

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671247); 江苏省自然科学基金项目(BK20171455); 江苏省大学生创新创业训练计划项目(201710300018Z); 大气科学类校外(野外)实习实践考察项目(YWKC2017A12)

作者简介: 张鑫磊(1992-), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事地气交换方面的研究。(E-mail) 550442249@qq.com

通讯作者: 张耀鸿, (E-mail) yhzhang@nuist.edu.cn

carbon mineralization.

Key words: nighttime warming; no-tillage; soil organic carbon mineralization

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,其任何细微的变化将显著影响到陆地生态系统的碳固持功能和碳汇效应,对全球气候变化和人类生存环境有着重要的影响^[1-2]。土壤有机碳矿化作为陆地生态系统碳循环重要的生物化学过程,直接关系到土壤中养分元素的释放、温室气体的形成以及土壤质量的保持^[3]。因此,研究全球变暖背景下土壤有机碳的矿化过程具有十分重要的意义。

由于地理要素的复杂性和气候因子的相互作用,使得全球变暖存在明显的不对称性,即夜间气温的增幅比白天最高气温的增幅高出1~2倍^[4-5];大量研究结果表明,日最低气温升幅是日最高气温升幅的2~3倍^[5],即全球变暖表现为夜间气温升高^[6],日较差减小的趋势^[7]。因此,在大田条件下开展夜间增温可以更准确地模拟出全球变暖对农田生态系统有机碳矿化速率的影响。

另一方面,随着人们对传统农田年产量低、人力耗费高等缺点的认识,免耕方式逐渐受到推广与应用^[8]。与传统耕作相比,免耕可有效地控制土壤水分蒸发,增加土壤含水量,提高土壤水分的有效性^[9-12]。同时,免耕可有效避免扰乱表层土壤,促进土壤大团聚体形成和增加土壤的热容量,使免耕土壤对气温变化具有很大的缓冲性^[13]。而且,免耕方式能够提高土壤微生物多样性,改变微生物群落结构^[14],增强土壤酶活性^[15]。因此,研究免耕对农田生态系统有机碳矿化的影响同样具有十分重要的意义。

目前,关于全球变暖对生态系统的研究多侧重于全天平均温度的升高效应,关于夜间增温的影响报道较少,且多集中在地上作物部分,对于地下土壤部分的研究甚少。本试验采用田间开放式增温系统进行定位试验,设置夜间增温及免耕2个试验因素组合的4个处理,以试验处理6年后的耕作层土壤为研究对象,通过室内恒温培养试验研究4个处理耕作层土壤的有机碳矿化速率变化规律,探索2种氮肥 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{KNO}_3]$ 对各处理耕作层土壤有机碳矿化的影响特征,为揭示气候变化背景下耕作方式和合理施肥对中国农田生态系统的影响效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验在南京信息工程大学农业气象试验站(32.16°N,118.86°E)进行。试验田属于亚热带湿润气候,年平均降水量1 100 mm,年均气温15.6℃,季风明显,温暖湿润,日照资源丰富。试验田土壤类型为黄棕壤,肥力中等。试验布置前农田耕作层土壤的理化性质为:pH 7.8,有机质15.2 g/kg,全氮1.26 g/kg,速效磷18.3 g/kg,速效钾78.1 g/kg。

1.2 试验设计

本试验包括4个处理,分别为:CK(常温+翻耕)、W(夜间增温+翻耕)、NT(常温+免耕)以及WNT(夜间增温+免耕)。每个处理重复3次,共12个小区。试验小区面积为3 m×4 m,其中有效增温区域为2 m×3 m,采用随机区组设计进行布置。本试验处理于2010年开始,2015年结束,为期6年。

参照陈金等^[16]的田间开放式增温系统进行夜间增温。增温系统由温度记录仪、支架和反光膜等组成。其原理是由地面发射的长波辐射经过反光膜反射回地表以减少热量损失。反光膜采用铝铂玻纤布,反射率可达到97%。每天19:00将夜间增温小区中的反光膜展开进行增温,翌日早晨7:00卷起。在雨雪及大风天气不进行盖膜处理以使每个处理之间的水分条件保持一致,同时也可以避免因为恶劣天气而造成的增温装置的损坏。为了保持各处理小区光照条件的一致性,常温对照试验小区也架设没有反光膜的增温装置。

用温度传感器精度为 ± 0.1 ℃的温度记录仪(泽大仪器有限公司生产)每15 min记录1次0~5 cm地表土壤的温度。夜间均温为每晚19:00到次日7:00的平均温度,增温小区与不增温小区的夜间均温之间的差值,代表了本试验的夜间增温幅度,其6年的均值为1.1℃,说明本试验开放式增温系统的夜间增温效果明显。

本试验种植制度为冬小麦-大豆轮作。传统翻耕处理方式为每年2次20 cm深度的旋耕机翻耕,人工整平后播种。免耕处理方式为在整个轮作周期

内不进行任何翻耕措施,农作物采用直接条播(小麦)或点播(大豆)。

1.3 分析与测定

在 2015 年 5 月末冬小麦收获后,采用随机多点采样法分别在每个小区采集 0~10 cm 土样,自然风干后过 1 mm 土筛,储存待用。

采用碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量。在 150 ml 三角瓶中加入 10 g 风干土,再加入蒸馏水使之达到田间持水量(WHC)的 40%后密封。然后放入 25 ℃ 的恒温培养箱中进行 7 d 预培养,目的是激活土壤中的微生物。预培养结束后,分别对各土壤样品添加 3 种不同溶液后正式培养,即加入蒸馏水、硝态氮(硝酸钾)和铵态氮(硫酸铵)溶液 3 种。调节培养瓶至田间持水量的 65%,然后用装有 10 ml 0.1 mol/L NaOH 溶液的离心管小心置于三角瓶后封膜密封,分别在 5 ℃、10 ℃、15 ℃、20 ℃、25 ℃ 和 30 ℃ 温度梯度下培养 14 d。培养结束后将离心管中的溶液完全洗入三角瓶,并加入 1 mol/L BaCl₂ 溶液 2 ml 和酚酞指示剂 2 滴,用 0.05 mol/L 的盐酸滴定至微红色,土壤有机碳矿化量根据培养期内二氧化碳的释放量进行计算。

本试验采用 Q_{10} 表征土壤有机碳矿化的温度敏感性, $Q_{10} = e^{10b}$, 即为土壤有机碳矿化速率在温度升高 10 ℃ 时所增加的倍数。其中 b 可由指数方程 $R = a \times e^{bT}$ 求得。该方程用来反应温度对土壤有机碳矿化的影响,其中 R 为土壤有机碳矿化速率, T 为培养温度, a 为基质质量指标, b 为温度反应系数。

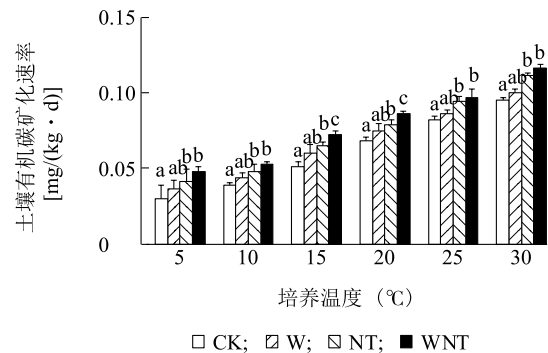
1.4 统计与分析

采用 Excel 表格对数据进行处理并制图,采用 SPSS 20.0 进行统计分析,差异显著性检验采用最小显著差异法(LSD 检验法)。

2 结果与分析

2.1 无氮添加下土壤有机碳矿化速率

在 5~30 ℃, 4 个处理土壤的有机碳矿化速率随着温度的升高而呈现增加趋势(图 1), 且不同处理间有机碳矿化速率表现为 CK<W<NT<WNT。相对于 CK 而言, W 和 NT 处理均提高了不同温度培养下的土壤有机碳矿化速率, 分别增加了 4.9%~20.0% 和 14.6%~36.7%。WNT 处理下, 有机碳矿化速率明显高于 W 和 NT 处理, 且显著高于对照处理, 增幅达到 18.3%~60.0%。



CK: 常温+翻耕; W: 夜间增温+翻耕; NT: 常温+免耕; WNT: 夜间增温+免耕。相同培养温度下不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 无氮添加下 4 个处理土壤的有机碳矿化速率

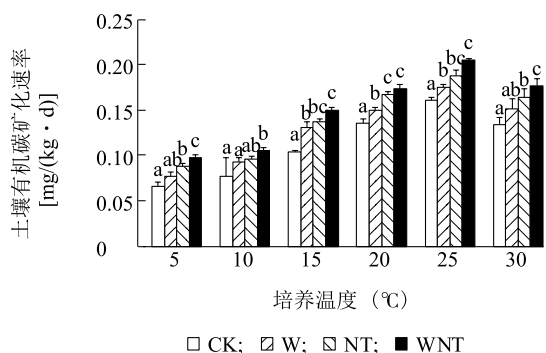
Fig.1 Soil organic carbon mineralization rates in four treatments without N addition

2.2 氮添加条件下土壤有机碳矿化速率

施加硫酸铵条件下 4 个处理土壤有机碳矿化速率随着温度的升高而逐渐增加, 与无氮添加下土壤有机碳矿化速率变化趋势相一致(图 2)。且在 25 ℃ 时 4 个处理的土壤有机碳矿化速率均达到最大值, 而在 30 ℃ 时都下降, 说明与无氮添加不同, 在施加硫酸铵条件下土壤有机碳矿化速率对培养温度的响应特征发生了变化。相比于 CK 而言, W 处理使土壤有机碳矿化速率增加了 14.8%, NT 处理下增幅高于 W 处理, 使土壤有机碳矿化速率增加 25.7%, WNT 使得土壤有机碳矿化速率达到最大值。可以看出, 夜间增温和免耕处理均可以提高土壤有机碳矿化速率, 并且免耕处理的效应高于夜间增温处理。4 个处理的土壤有机碳矿化速率整体表现为 WNT>NT>W>CK。

添加硝酸钾条件下土壤矿化速率与无氮添加处理的变化规律相同, 均随着温度的升高土壤有机碳矿化速率随之增大(图 3)。4 个处理中各个培养温度下的矿化速率均以 WNT 处理为最大, 且显著高于对照处理。

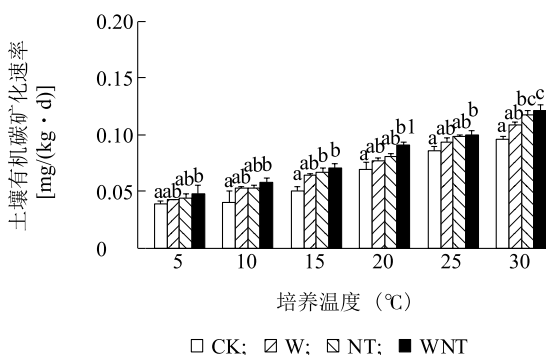
将各处理土壤在 6 个培养温度下的有机碳矿化速率取平均, 得到该土壤的有机碳矿化速率均值。进一步比较发现, 添加铵态氮肥显著提高了土壤有机碳的矿化速率均值, 与无氮添加相比, 4 个处理土壤有机碳的矿化速率分别增加了 84.6%、93.3%、91.9% 和 92.4% (图 4)。而添加硝态氮肥对 4 个处理土壤有机碳矿化速率则无明显



CK: 常温+翻耕; W: 夜间增温+翻耕; NT: 常温+免耕; WNT: 夜间增温+免耕。相同培养温度下不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 添加硫酸铵条件下4种处理的土壤有机碳矿化速率

Fig.2 Soil organic carbon mineralization rates in four treatments under the condition of adding $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$



CK: 常温+翻耕; W: 夜间增温+翻耕; NT: 常温+免耕; WNT: 夜间增温+免耕。相同培养温度下不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 添加硝酸钾条件下4种处理的土壤有机碳矿化速率

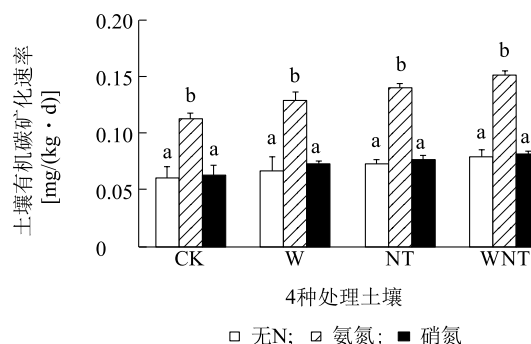
Fig.3 Soil organic carbon mineralization rates in four treatments under the condition of adding KNO_3

显影响,可见有机碳矿化过程对不同添加物具有不同的响应特征。

2.3 不同土壤有机碳矿化速率的温度敏感性

土壤有机碳分解的温度敏感性 (Q_{10}) 是一项重要参数,可以用来预测土壤有机碳动态变化。 Q_{10} 值的大小与温度范围、土壤有机质质量、水分等因素有关。本研究用 Q_{10} 来反映土壤有机碳平均矿化速率随温度的变化情况, Q_{10} 值越小,说明温度敏感性也就越小。

不同试验处理下, WNT 的 Q_{10} 值均高于其他 3 个处理,而 W 和 NT 处理的 Q_{10} 均高于对照处理,说



CK: 常温+翻耕; W: 夜间增温+翻耕; NT: 常温+免耕; WNT: 夜间增温+免耕。相同培养温度下不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 不同添加物对4种处理土壤有机碳矿化速率的影响

Fig.4 Effects of several additives on soil organic carbon mineralization rates in four treatments

明夜间增温和免耕措施均提高了农田土壤有机碳矿化的温度敏感性(表1)。与不添加氮相比,各处理土壤添加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 使得 Q_{10} 值明显变大,而添加 KNO_3 后的 Q_{10} 值没有明显变化,可以推测本试验田施加铵态氮肥时土壤有机碳矿化过程会被显著激发。在 5~15 °C 温度下的 Q_{10} 值比在 20~30 °C 温度下的 Q_{10} 值大。说明在温度较低时土壤矿化过程对温度变化更为敏感。

3 讨论

温度是土壤有机碳分解和矿化的重要影响因素。一般来说,温度通过影响土壤中的酶活性来影响土壤有机碳矿化速率,并且在一定的温度范围内有机碳矿化速率随着温度的升高而增加。白洁冰等^[17] 研究发现高寒草甸和高寒湿地土壤有机碳矿化速率随着温度的升高而增加,与本研究结果一致。杨继松等^[18] 认为,湿地土壤有机碳矿化速率 25 °C 较 15 °C 相比有明显的提高,水分对于有机碳矿化则无明显影响。本研究结果表明,夜间增温显著提高了农田土壤的有机碳矿化过程。一般而言,夜间温度相对白天温度较低,而低温环境下温度的增加会强烈地影响土壤有机碳矿化过程。黄耀等^[19] 发现与高温环境下升高温度相比,低温环境下升高温度对土壤有机碳矿化的促进作用明显。可能因为低温环境下温度的限制导致酶活性很低,易分解碳组分没有被完全分解,所以在低温环境下升高温度使易分解有机碳很容易分解。

表 1 不同处理土壤有机碳矿化速率的 Q_{10} 值Table 1 Q_{10} values of soil organic carbon mineralization rates under different treatments

试验处理	添加物	5~15 °C	20~30 °C	5~30 °C
常温+翻耕(CK)	H ₂ O	1.53	1.39	1.46
	(NH ₄) ₂ SO ₄	1.59	1.44	1.52
	KNO ₃	1.53	1.40	1.47
增温+翻耕(W)	H ₂ O	1.57	1.40	1.50
	(NH ₄) ₂ SO ₄	1.61	1.48	1.57
	KNO ₃	1.57	1.40	1.49
常温+免耕(NT)	H ₂ O	1.59	1.50	1.53
	(NH ₄) ₂ SO ₄	1.64	1.49	1.59
	KNO ₃	1.59	1.50	1.53
增温+免耕(WNT)	H ₂ O	1.60	1.52	1.54
	(NH ₄) ₂ SO ₄	1.77	1.51	1.61
	KNO ₃	1.59	1.51	1.54

WNT、NT、W、CK 见图 1。

国内外有关施加氮肥对农田土壤有机碳矿化影响的研究报道十分丰富,但是在模拟未来温度升高情景下,有关如何合理施肥以缓解土壤有机碳矿化,减少农田 CO₂ 排放的研究鲜有报道。一般来说,化学氮肥的施用能增加植物氮素的吸收,同时增加了土壤矿质养分,改善土壤碳氮比,提高土壤微生物活性,从而促进土壤有机碳矿化作用。然而,在温度升高条件下,氮肥的这种肥效可能发生改变,因为施加氮肥使得植物获取氮素相对容易,植物向地下分配光合产物的比例相应减小,直接限制了微生物进行矿化作用的基质来源。而且,受光合产物分配比例的影响,根系的伸长活动受到一定程度的抑制,对土壤团聚体的机械破坏相应减小,从而影响矿化过程。珊丹等^[20]采用野外控制增温试验发现,施加氮肥并未促进草地土壤有机碳矿化速率。王珍等^[21]认为,降雨量多少是制约施氮对草地土壤呼吸影响程度的重要因素。不仅如此,氮肥类型也会深刻影响土壤有机碳矿化过程。一般认为,土壤微生物对于不同形态的氮素喜好不同,大多数偏好于铵态氮。孟延等^[22]研究发现,不同氮肥对壤土有机碳矿化速率增加的程度明显不同,增加幅度依次为 (NH₄)₂SO₄ > NH₄NO₃ > KNO₃。王峰等^[23]研究发现柑橘果园土壤有机碳矿化受高施氮量影响较大,随着施氮量的增加土壤有机碳矿化的温度敏感性增加。本研究发现,与无氮添加相比,硫酸铵的添加显著提高了 4 个处理土壤有机碳矿化速率,而硝酸钾的添加对土壤

有机碳矿化则无明显影响。考虑到 WNT 处理的土壤有机碳矿化速率均显著高于 CK,可以推测在未来温度升高情境下采用免耕方式进行农业生产时,选用硝态氮肥可能会有效缓解农田土壤有机碳矿化速率,减小土壤 CO₂ 的排放。

免耕农田系统能够提高土壤微生物的丰富度,增加土壤微生物含量^[14],增强土壤酶活性^[15]。姜勇等^[24]发现免耕条件下土壤温度变化小,湿度增大,一般有益于土壤微生物和一些土壤动物的活动。本研究发现,免耕显著提高了土壤有机碳矿化速率,其作用效应明显高于夜间增温。

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] 马小婷,隋玉柱,朱振林,等. 秸秆还田对农田土壤碳库和温室气体排放的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 14-20.
- [3] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feed backs to the climate system [J]. Science, 2002, 298(5601): 2173.
- [4] 谭凯炎,房世波,任三学,等. 非对称性增温对农业生态系统影响研究进展 [J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 634-641.
- [5] EASTERLING D R, PETERSON T C, KARL T R. Maximum and minimum temperature trends for the globe [J]. Science, 1997, 277(18): 364-367.
- [6] 任国玉,徐铭志,初子莹,等. 近 54 年中国地面气温变化 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 717-727.

- [7] 杜 军,李 春,拉 巴,等. 西藏近 35 年地表湿润指数变化特征及其影响因素 [J]. 气象学报, 2009, 67(1): 158-164.
- [8] 刘世平,张洪程,戴其根,等. 免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 393-396.
- [9] 江晓东,李增嘉,侯连涛,等. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 20-24.
- [10] 刘世平,聂新涛,张洪程,等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48-51.
- [11] 陈 强, YURIY S K, 陈 渊, 等. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果 [J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 11-21.
- [12] MEDEIROS J C, SERRANO R E, MARTOS J L H, et al. Effect of various soil tillage systems on structure development in a Haploxeralf of central Spain [J]. Soil Technology, 1997, 11(2): 197-204.
- [13] 张晓平,方华军,杨学明,等. 免耕对黑土春夏季节温度和水分的的影响 [J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 313-316.
- [14] 董立国,袁汉民,李生宝,等. 玉米免耕秸秆覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 444-446.
- [15] 王润莲,张志栋,刘景辉,等. 免耕不同处理对土壤养分、土壤酶活性及燕麦产量的影响 [J]. 作物杂志, 2016(3): 134-138.
- [16] 陈 金,杨 飞,张 彬,等. 被动式夜间增温设施设计及其增温效果 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2288-2294.
- [17] 白洁冰,徐兴良,宋明华,等. 温度和氮素输入对青藏高原三种高寒草地土壤碳矿化的影响 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 855-859.
- [18] 杨继松,刘景双,孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 38-42.
- [19] 黄 耀,刘世梁,沈其荣,等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 709-714.
- [20] 珊 丹,韩国栋,赵萌莉,等. 控制性增温和施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 106-112.
- [21] 王 珍,赵萌莉,韩国栋,等. 模拟增温及施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2012(9): 98-103.
- [22] 孟 延,李雪松,郝平琦,等. 施用不同种类氮肥对陕西关中地区壤土碳释放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1901-1907.
- [23] 王 峰,王义祥,江福英,等. 氮肥施用对柑橘果园土壤有机碳矿化的影响 [J]. 农业科学与技术, 2012, 28(8): 1702-1707.
- [24] 姜 勇,梁文举,闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响 [J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 347-351.

(责任编辑:陈海霞)