

陇东旱塬麦黑豆-冬小麦轮作条件下施氮水平对土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响

王 婷¹, 杨君林¹, 李利利², 曾小茹³, 吕晓东⁴

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 平凉市农业科学院, 甘肃平凉 744000; 3. 甘肃省农业技术推广总站, 甘肃 兰州 730020; 4. 兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为给我旱地低碳农业可持续发展提供科学依据, 2018—2020年在陇东黄土高原雨养区冬小麦田设置夏闲期种植绿肥和不同施氮量田间试验, 通过测定土壤 N₂O 和 CH₄ 排放通量, 计算 N₂O 和 CH₄ 累积排放量等指标, 分析不同处理对土壤 N₂O 和 CH₄ 排放通量和累积排放量的影响。结果表明, 在 2 个轮作周期内, 不同处理的 N₂O 排放峰主要出现在冬小麦播种施肥后, 峰值范围平均 11.24~31.85 μg N₂O-N/(m²·h)。土壤 CH₄ 排放无明显峰谷变化趋势, 而围绕着零值上下波动, 变化范围-46.8~24.5 μg CH₄-C/(m²·h)。与休闲-冬小麦处理相比, 麦黑豆-冬小麦轮作处理在绿肥填闲期和冬小麦生长期土壤 N₂O 累积排放分别显著增加了 26.8%~44.2%和 6.2%~52.3%, 土壤 CH₄ 累积吸收分别显著减少了 7.9%~76.3%和 4.0%~28.4%。可见, 豆科绿肥填闲种植可增加土壤 N₂O 排放, 减少土壤 CH₄ 的吸收。

关键词: 温室气体; 排放; 冬小麦; 绿肥; 陇东旱塬

中图分类号: X53; S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1463(2022)09-0036-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2022.09.009

Effects of Black Soybean-winter Wheat Rotation and Nitrogen Application on Soil N₂O and CH₄ Emission of Longdong Dryland in Gansu

WANG Ting¹, YANG Junlin¹, LI Lili², ZENG Xiaoru³, LÜ Xiaodong⁴

(1. Institute of Soil and Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Pingliang Academy of Agricultural Sciences, Pingliang Gansu 744000, China; 3. Gansu Agricultural Technology Extension Station, Lanzhou Gansu 730020, China; 4. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: In order to provide scientific basis for the sustainable development of low carbon agriculture in dryland area of China, a field experiment of green manure and different nitrogen rates in the winter wheat field in summer fallow period in the Longdong dryland of Gansu Province was conducted from 2018 to 2020. Soil N₂O and CH₄ emission fluxes and cumulative emissions were measured. Effects of different treatments on soil N₂O and CH₄ emission fluxes and cumulative emissions were analyzed. The results showed that during 2 rotation periods, the peaks of N₂O emission fluxes mainly occurred after sowing and fertilization of winter wheat, and ranged from 11.24 to 31.85 μg N₂O-N/(m²·h). Soil CH₄ emission fluxes didn't show a peak-valley variation trend but fluctuated around the zero value, and ranged from -46.8 to 24.5 μg CH₄-C/(m²·h). Compared with the fallow-winter wheat treatment, soil N₂O cumulative emissions in black soybean-winter wheat rotation were significantly increased by 26.8% to 44.2% and 6.2% to

收稿日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560584); 农业部行业(农业)科研专项(201103039-8); 甘肃省科技计划(1604WKC A005); 甘肃省科技计划项目(20CX9NA089)。

作者简介: 王 婷 (1982—), 女, 甘肃秦安人, 副研究员, 主要从事绿肥栽培及土壤养分循环研究工作。Email: wangting@gsagr.ac.cn。

- 水的引种表现及关键栽培技术[J]. 中国果树, 2020(6): 95-97.
- [3] 杨焕显, 杨映红. 天水市大樱桃产业现状及发展对策[J]. 甘肃农业科技, 2022, 53(1): 17-22.
- [4] 王家喜, 王少敏, 王江勇. 甜樱桃品种布鲁克斯引种试验[J]. 中国果树, 2008(2): 30-32; 79.
- [5] 杨晓华, 尹 蓉, 戴桂林, 等. 甜樱桃不同品种特性的聚类分析[J]. 中国农学通讯, 2015, 31(13): 113-117.
- [6] 赵 林, 杨 峰, 樊继德. 不同甜樱桃品种果实性状差异性比较[J]. 南方农业学报, 2012, 43(2): 209-212.
- [7] 魏国芹, 孙玉刚, 安 森, 等. 甜樱桃不同品种生长结果习性调查[J]. 北方园艺, 2012(6): 13-15.

52.3% for the green manure planting period and the winter wheat growing season, respectively, and soil CH₄ cumulative absorption were significantly decreased by 7.9% to 76.3% and 4.0% to 8.4% for those two periods above, respectively. It showed that planting leguminous green manure in summer fallow period could increase soil N₂O emission and reduce soil CH₄ absorption.

Key words: Greenhouse gas; Emission; Winter wheat; Green manure; Longdong dryland

二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是大气中的3种最重要的长寿命温室气体,其在大气中的含量显著影响地球辐射平衡,由此引起的全球气候变暖已成为世界性的环境问题^[1]。人类农业活动对全球CO₂、CH₄和N₂O的排放具有重要意义^[2],采取适宜农业减排策略,降低CO₂、CH₄和N₂O温室气体排放,对减缓全球气候变化,保证农业可持续发展具有重要意义。

陇东旱塬是我国西北地区典型的雨养农业区^[3-4],农业生产实行一年一季且伴随7—9月夏休闲的种植制度。然而,夏季休闲期间正值雨热同期,如果一直保持裸地休闲状态,不仅使此期间的阳光热等自然资源没有得到合理利用,并且会因为地表缺乏植被覆盖进一步加剧水土流失和耕地质量退化的程度^[5]。事实上,当地有多年种植豆科绿肥的历史,种植并翻压绿肥不仅可在时间和空间上有效提高对夏闲期自然资源的利用,还可有效改善土壤微环境,培肥地力和提升轮作系统生产力^[6-9]。夏闲期种植并翻压绿肥和施氮水平对土壤温室气体排放的影响在该地区尚少见报道。我们通过2年的田间定位试验,探索了冬小麦夏闲期连续种植并翻压豆科绿肥和不同施氮水平对旱地土壤N₂O和CH₄排放的影响,以期为我国旱地“低碳农业”的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省平凉市泾川县高平镇的平凉市农业科学院高平试验场(107° 30' E, 35° 17' N, 海拔1340 m),属于半湿润偏旱区,春冬寒冷干燥,夏季多雨。多年平均年降水量526 mm,且多集中于7—9月份。年均气温8.6℃,年均蒸发量1384 mm。无霜期172 d,≥10℃的活动积温2800℃。光热资源丰富,水热同季,适宜冬小麦、玉米、杂粮杂豆、果蔬等的生长。土壤为黑垆土,0~20 cm土层土壤含有机质15.5 g/kg、全氮1.01 g/kg、全磷0.74 g/kg、全钾22.40 g/kg、速

效氮73.9 mg/kg、速效磷13.0 mg/kg、速效钾139.0 mg/kg, pH 8.4。

1.2 供试材料

供试冬小麦品种为普冰151(由平凉农业科学院提供),麦黑豆由平凉农业科学院提供。供试氮肥为尿素(含N 46%),甘肃刘化有限责任公司生产;磷肥为普通过磷酸钙(含P₂O₅ 16%),云南三环公司生产。

1.3 试验设计

试验采用裂区设计,主区为麦黑豆-冬小麦(M)和休闲-冬小麦(CK),副区为施氮量:N₀(0 kg/hm²)、N₁(147 kg/hm²)、N₂(270 kg/hm²),小区面积45.6 m²(4.8 m×9.5 m),重复3次,共18个小区。2018年7月13日种植麦黑豆,播量120 kg/hm²,人工条播,不施肥。2018年9月10日麦黑豆刈割收获,将其铡碎全量还田,翻压深度20 cm。2018年9月29日种植冬小麦,播种量187.5 kg/hm²,行距20 cm,人工条播。氮肥在冬小麦播前一次性施入,同时施P₂O₅ 120 kg/hm²。2019年7月1日冬小麦收获并计产。第2轮作周期分别于2019年7月4日播种麦黑豆、2019年8月30日翻压麦黑豆、2019年10月12日播种冬小麦和2020年7月1日收获冬小麦,其余施肥和田间管理措施均与2018—2019年相同。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 气体采样箱的安置 气样采集采用静态暗箱法。采样箱用不锈钢材料制成,顶箱体积大小为50 cm×60 cm×50 cm,箱外层加包泡沫以隔热,并配备温度探头,以同时测定箱内气温。采样箱底座大小为50 cm×60 cm×20 cm,插入土壤10 cm处,整个试验期不再移动。观测时将采样箱放在底座外缘四周的凹槽中,并加水密封。

1.4.2 气样采集 在作物生长期和休闲季,采气1次/6 d,施肥后1次/d,连续6 d。下大雨后(>20 mm)1次/d,连续3 d。当冬季气温很低时,根据测定结果调整采气时间间隔。气体样品的采集于每天9:00时至11:00时进行。取气前1 min 盖上箱

体并用水密封，打开风扇电源，运行风扇使箱内气体混合均匀。用50 mL医用注射器每15 min 间隔采集4针气样，用于分析不同处理的CO₂、CH₄和N₂O排放通量。

1.4.3 气样排放通量和累积排放量计算

$$F = \rho V \frac{dc}{dt} \times 1/A = M \times PIR (273+T) \times 60 \times 10^3 \times H \times dc/dt$$

式中，F为气体排放通量，M为气体分子的摩尔质量，P为采样点大气压力，通常视为标准大气压，R为普适气体常数，T为箱内温度，H为采样箱高度，c为气体浓度，t为关箱时间，dc/dt为采样箱内气体浓度随时间的变化率。

气体累积排放量采用直接插值法计算^[10]。

1.4.4 其他项目测定 每次采气时同步观测箱内温度。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 进行数据处理，使用SPSS (SPSS Statistics 17.0)进行不同处理间温室气体累积排放显著性分析 (LSD_{0.05})，作图软件为Sigma Plot 14.0。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤N₂O排放通量的影响

如图1所示，在2个轮作周期内，不同处理N₂O排放的动态变化趋势较一致，排放峰主要出现在冬小麦播种施肥后。2018年种植绿肥至冬小麦播种前，M处理平均土壤N₂O日排放为7.37 μg N₂O-N/(m²·h)，而CK处理平均土壤N₂O日排放为4.11 μg N₂O-N/(m²·h)。2018年冬小麦播种施肥后3~5 d各处理均出现排放峰，M-N₀、M-N₁、M-N₂、CK-N₀、CK-N₁、CK-N₂平均土壤N₂O日排放分别为11.24、22.38、32.58、13.39、20.33、31.85 μg N₂O-N/(m²·h)，之后各处理N₂O排放逐渐下降，

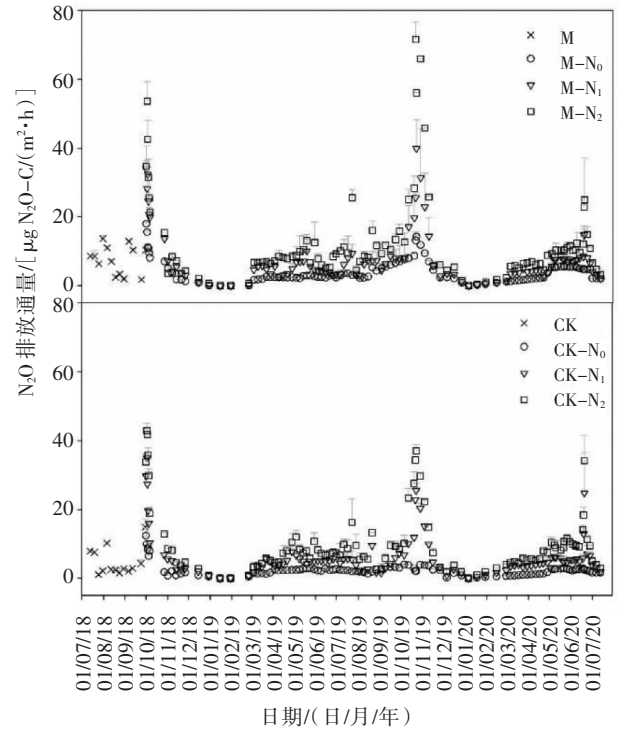


图1 2018—2020年不同处理N₂O排放动态

至冬小麦收获上述各处理平均土壤N₂O日排放分别为1.95、3.76、6.16、1.87、3.75、5.63 μg N₂O-N/(m²·h)。2019年不同处理N₂O排放的动态变化趋势与2018年一致，但N₂O日排放量相对较高。如2019年种植绿肥至冬小麦播种前，M-N₀、M-N₁、M-N₂、CK-N₀、CK-N₁、CK-N₂平均土壤N₂O日排放量分别为4.94、8.76、14.57、3.63、5.22、11.12 μg N₂O-N/(m²·h)。从上述结果看出，与休闲相比，绿肥休闲翻压促进了土壤N₂O排放增加。与不施氮相比，施氮也促进了土壤N₂O排放增加。

2.2 不同处理对土壤N₂O累积排放的影响

如表1所示，2018年和2019年绿肥休闲期的N₂O累积排放均显著高于休闲地。2019年冬小麦生长期，M和CK处理不同施氮水平间N₂O累积

表1 2018—2020年不同处理N₂O累积排放量

g N₂O-N/hm²

处理	2018年 绿肥休闲期	2019年 冬小麦生长期	2019年 绿肥休闲期	2020年 冬小麦生长期
M-N ₀		151.5±12.6 cA	141.8±11.9 cA	207.6±23.7 cA
M-N ₁	139.7±3.3 A	249.1±1.3 bA	190.4±23.8 bA	378.2±34.2 bA
M-N ₂		369.8±7.8 aA	326.8±44.8 aA	680.6±11.3 aA
CK-N ₀		152.9±9.3 cA	78.4±1.3 cB	136.3±5.0 cB
CK-N ₁	78.0±0.9 B	234.5±4.3 bA	116.0±7.9 bB	311.3±5.8 bB
CK-N ₂		344.4±9.7 aA	239.3±18.3 aB	519.9±27.6 aB

排放量均随着施氮量的增加而增加，差异显著，而相同施氮水平下 M 和 CK 处理 N₂O 累积排放量无显著差异。2020 年冬小麦生长期，M 和 CK 处理不同施氮水平间和相同施氮水平下的 N₂O 累积排放量均差异显著。总的来看，与 M-N₀ 处理相比，M-N₁ 和 M-N₂ 处理 N₂O 平均累积排放量分别显著增加了 74.7% 和 192.5%。与 CK-N₀ 处理相比，CK-N₁ 和 CK-N₂ 处理平均 N₂O 累积排放量分别显著增加了 88.7% 和 198.9%。与 CK 处理相比，M 处理在绿肥填闲期和冬小麦生长期土壤 N₂O 累积排放分别显著增加了 26.8% ~ 44.2%、6.2% ~ 52.3%。

2.3 不同处理对土壤 CH₄ 排放通量的影响

如图 2 所示，2 个轮作周期内，各处理土壤 CH₄ 排放没有呈现出明显峰谷变化规律，而围绕

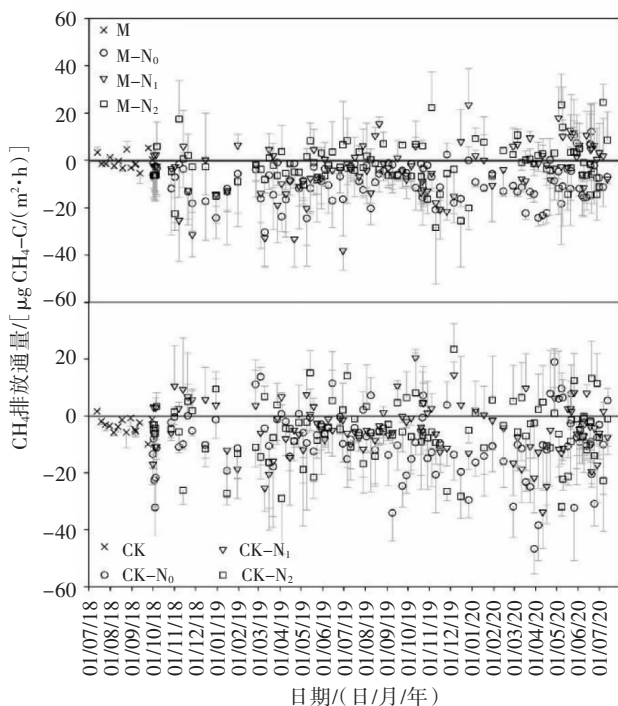


图 2 2018—2020 年不同处理 CH₄ 排放动态

着零值上下波动，变化范围在 -46.8 ~ 24.5 µg CH₄-C/(m²·h)。

2018 年绿肥填闲至冬小麦播种前，M 处理土壤 CH₄ 累积吸收量约为 -65.0 g CH₄-C/hm²，而 CK 处理土壤 CH₄ 累积吸收量约为 -273.9 g CH₄-C/hm² (表 2)，说明夏闲期种植绿肥可显著抑制土壤 CH₄ 吸收累积。2019 年绿肥填闲至冬小麦播种前，M-N₂ 和 CK-N₂ 处理土壤 CH₄ 累积吸收量无显著差异，分别约为 -88.5、-91.6 g CH₄-C/hm²。总的来看，与 M-N₀ 和 M-N₁ 处理相比，M-N₂ 处理土壤 CH₄ 累积吸收量分别显著降低了 58.9% 和 62.8%；与 CK-N₀ 和 CK-N₁ 处理相比，CK-N₂ 处理土壤 CH₄ 累积吸收量分别显著降低了 59.1% 和 32.9%。说明过量施氮会显著抑制土壤 CH₄ 吸收。在冬小麦生长期，M 和 CK 处理土壤 CH₄ 吸收量随施氮量增加而减小，且处理间差异显著。与休闲 - 冬小麦处理相比，麦黑豆 - 冬小麦轮作处理在绿肥填闲期和冬小麦生长期土壤 CH₄ 累积吸收分别显著减少了 7.9% ~ 76.3% 和 4.0% ~ 28.4%。

3 讨论与结论

绿肥作为一种优质的有机肥源，能够为土壤和后季作物提供养分。在工业合成氨以前，人们主要依靠绿肥、农家肥、厩肥等有机肥来补充农田土壤中的养分，特别是豆科绿肥自身能够固定大气中的氮素 [11]。然而，与裸地休闲相比，填闲作物种植后改变了土壤水热条件与碳氮库特征，从而影响了土壤温室气体的排放过程。已有的研究表明，与休闲地对照相比，种植填闲作物能降低土壤 CH₄ 的吸收能力，刺激土壤 CO₂ 的排放 [12]，而对土壤 NO₂ 的排放影响较为复杂。如 Mitchell 等 [13] 认为，填闲作物可以通过降低土壤硝态氮含量和淋溶损失来暂时减少 N₂O 排放；张祺 [14] 对黄土高原旱作冬小麦田填闲种植和施氮对温室气体的研究

表 2 2018—2020 年不同处理 CH₄ 累积排放量

处理	g CH ₄ -C/hm ²				平均 冬小麦生长期
	2018 年 绿肥填闲期	2019 年 冬小麦生长期	2019 年 绿肥填闲期	2020 年 冬小麦生长期	
M-N ₀		-577.8±51.9 cA	-215.5±11.9 bA	-406.1±23.7 bA	-491.9±33.6 bA
M-N ₁	-65.0±41.7A	-484.2±38.8 bA	-237.8±23.8 bA	-439.3±34.2 bA	-461.8±30.5 bA
M-N ₂		-309.1±46.5 aA	-88.5±44.8 aA	-376.2±11.3 aA	-342.7±19.3 aA
CK-N ₀		-773.5±52.2 cB	-223.7±1.3 bA	-503.7±24.9 cB	-638.6±40.9 aB
CK-N ₁	-273.9±73.5B	-536.7±29.7 bB	-136.5±7.9 bB	-457.7±35.8 bA	-497.2±25.7 bA
CK-N ₂		-431.8±23.6 aB	-91.6±18.3 aA	-408.6±27.6 aB	-420.2±23.6 cA

表明, 填闲种植会减少土壤 N_2O 排放强度, 对土壤 CH_4 的吸收强度无影响; 而 Snyder 等^[15]认为当施氮量小于 $175 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时 N_2O 排放通量很小, 当超过这个范围时 N_2O 排放通量迅速上升。

本文研究表明, 在 2 个轮作周期内, 不同处理 N_2O 排放峰主要出现在冬小麦播种施肥后, 峰值范围平均为 $11.24 \sim 31.85 \mu\text{g N}_2\text{O-N}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 。土壤 CH_4 排放无明显峰谷变化趋势, 而围绕着零值上下波动, 变化范围 $-46.8 \sim 24.5 \mu\text{g CH}_4\text{-C}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 。与休闲-冬小麦处理相比, 麦黑豆-冬小麦轮作处理在绿肥填闲期和冬小麦生长季土壤 N_2O 累积排放分别显著增加了 $26.8\% \sim 44.2\%$ 和 $6.2\% \sim 52.3\%$, 土壤 CH_4 累积吸收分别显著减少了 $7.9\% \sim 76.3\%$ 和 $4.0\% \sim 28.4\%$ 。可能的原因存在于试验条件、气候和土壤环境等因素的不同, 导致影响 N_2O 和 CH_4 排放控制因子的贡献程度不同, 最终影响了土壤微生物的活性、氧气含量、底物的供应和产生以及土壤剖面内气体排放运输等过程, 进而导致排放结果具有一定差异性^[16-17]。

综上所述, 豆科绿肥填闲种植会增加土壤 N_2O 排放, 减少土壤 CH_4 的吸收。土壤 N_2O 和 CH_4 排放与土壤养分、温度和水分等非生物因素之间的关系以及温室气体产生的机理有待进一步研究。

参考文献:

- [1] HOUGHTON J T, JENKINS G J, EPHRAUMS J J. Climate change: the IPCC Scientific Assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [2] ROBERTSON G P, PAUL E A, HARWOOD R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. Science, 2000, 289(5486): 1922.
- [3] 赵智慧, 郑琪, 贺春贵, 等. 10 个玉米品种在陇东旱塬区的适应性评价[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(5): 77-82.
- [4] 续创业, 张锐鹏, 朱晓惠. 适宜陇东旱塬区双垄沟播的耐密玉米品种筛选试验[J]. 甘肃农业科技, 2019(2): 53-58.
- [5] 李婧, 张达斌, 王峥, 等. 施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 136-142.
- [6] 邓建强, 梁志婷, 刘渊博, 等. 陇东旱塬冬小麦复种饲草轮作系统产量和水分利用特征[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 161-170.
- [7] 张达斌, 李婧, 姚鹏伟, 等. 夏闲期连续两年种植并翻压豆科绿肥对旱地冬小麦生长和养分吸收的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1): 59-65.
- [8] 张达斌, 姚鹏伟, 李婧, 等. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2272-2281.
- [9] 赵娜, 赵护兵, 曹群虎, 等. 渭北旱区夏闲期豆科绿肥对土壤肥力性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 124-128; 146.
- [10] MOSIER A R, HALVORSON A D, REULE C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado[J]. J Environ Qual, 2006, 35(4): 1584-98.
- [11] SNYDER C S, BRUULSEMA T W, JENSEN T L, et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 133(3-4): 247-266.
- [12] GRESSHOFF P M, LOHAR D, CHAN P-K, et al. Genetic analysis of ethylene regulation of legume nodulation[J]. Plant Signaling & Behavior, 2009, 4(9): 818-823.
- [13] CHEN L, KOST D, TONG X, et al. Tillage, crop rotation, nitrogen fertilizer and cover crop impacts on greenhouse gas fluxes from an ohio soil[A]. International annual meeting american society of agronomy[C]. Soil Science Society of America, 2013.
- [14] MITCHELL D C, CASTELLANO M J, SAWYER J E, et al. Cover crop effects on nitrous oxide emissions: role of mineralizable carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5): 1765-1773.
- [15] 张祺. 填闲种植对冬小麦田夏闲期土壤水分、温室气体排放及碳氮收支的影响[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [16] LIU R, HAYDEN H L, SUTER H, et al. The effect of temperature and moisture on the source of N_2O and contributions from ammonia oxidizers in an agricultural soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(1): 141-152.
- [17] HU H-W, MACDONALD C A, TRIVEDI P, et al. Water addition regulates the metabolic activity of ammonia oxidizers responding to environmental perturbations in dry subhumid ecosystems[J]. Environmental Microbiology, 2015, 17(2): 444-461.