

施肥模式对雨养旱地温室气体排放的影响^①

邬刚¹, 潘根兴¹, 郑聚锋^{1*}, 郭耀东², 李恋卿¹, 褚清河³, 周通¹, 刘晓雨¹

(1 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2 山西省农业科学院玉米研究所, 山西忻州 034000;

3 山西省农业科学院农业资源综合考察研究所, 太原 030006)

摘要: 采用静态箱/气相色谱法对雨养旱作玉米生长季农田土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的排放通量进行观测, 研究了改变氮、磷配比(调控施肥)和传统施肥两种模式对山西雨养旱地温室气体排放的影响。结果表明, 施肥模式对土壤 CO₂、CH₄ 季节排放特征和排放总量影响不明显, 但显著影响 N₂O 的季节排放动态特征和排放总量。基肥施用是影响雨养旱地 N₂O 排放的主要因素。与传统施肥相比, 调控施肥 N₂O 季节排放总量减少 70.40%。CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应分析结果表明, 调控施肥方式下的全球增温潜势(GWP)与温室气体排放强度(GHGI)均显著低于传统施肥方式, 分别降低 73.08%和 74.00%, 本研究进一步表明雨养旱地采用调控施肥的方式是一种较好的温室气体减排措施。

关键词: 施肥模式; 雨养旱地; 温室气体减排; GWP; GHGI

中图分类号: X511

近年来, 以气候变暖为主要特征的气候变化及其对自然、经济和人类生活的影响已经成为各国政府、社会和科学界共同关注的全球性问题^[1]。气候变暖的主要原因是大气中温室气体浓度的不断增大, 其中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 被认为是最重要的温室气体。而农业是重要的温室气体来源, 据估计, 全球农业 CH₄ 排放约占整个人类活动 CH₄ 排放总量的 50%, N₂O 占 60%, 如果不实施额外的农业政策, 预计到 2030 年, 农业源 CH₄ 和 N₂O 排放量将比 2005 年分别增加 60% 和 35% ~ 60%, 因此减少农业源温室气体排放对减缓全球气候变化有重要作用^[2]。

农业土壤温室气体排放是农业源温室气体排放的一个重要方面^[3], 1994 年因施肥造成的农田 N₂O 排放量为 62.8 万 t, 占中国 N₂O 排放总量的 73.9%^[4]。农业生产中化学肥料的施用对农田土壤温室气体的影响已有较多的研究, 有研究显示, 化学氮肥的施用会抑制土壤对大气 CH₄ 的氧化吸收^[5-7], 并且随着氮肥施入量的增加而增加; N₂O 排放量随着施氮肥量的增加呈线性增加^[8]或呈曲线增加^[9]; 孟磊等^[10]报道长期施氮(尿素)处理比不施氮处理的农田年土壤呼吸量显著增加, 前者比后者高 50% 以上, 但是也有研究结果得出施加氮肥的免耕农田因为微生物活性减

少也会减缓土壤中 CO₂ 向大气中排放^[11], 这说明化学肥料施用对土壤呼吸的影响不能一概而论。目前农田温室气体排放研究多集中于稻田的研究^[12-13], 对于旱地土壤, 尤其雨养旱地温室气体排放的综合研究较少。而玉米的西北产区是我国四大产区之一, 这里种植的农作物 60% 是雨养旱作玉米^[14], 因此, 探讨合理的施肥措施来降低雨养旱地温室气体的排放是非常必要的。然而, 改变施肥方式对作物产量有较大影响, 有研究表明, 氮磷施用比例是影响玉米最大施氮量及其肥效的重要因素, 根据土壤养分平衡供应特征调整施肥养分比例(调控施肥)可能是作物高产施肥且提高肥料利用率的途径^[15], 而调节氮磷比例的施肥方式对温室气体排放的研究较少。基于此, 本研究选择四大玉米产区之一的西北产区作为研究基地, 采用静态箱-气相色谱法, 对雨养旱地不同施肥模式下 3 种温室气体的排放特征及产生的综合温室效应进行了研究, 旨在为雨养旱地温室气体减排提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于山西省忻州市豆罗镇高铺村 (112°72'E, 38°29'N)。气候为温带大陆性季风气候,

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903003)和国家科技支撑计划课题项目(2013AD11B01)资助。

* 通讯作者(zhengjufeng@njau.edu.cn)

作者简介: 邬刚(1987—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事农田温室气体排放的研究。E-mail: 2009103105@njau.edu.cn

地处东南季风的背风坡,降雨少,干旱严重,年平均气温 8.0 ~ 10.5,无霜期 145 ~ 165 天,年平均降水量 400 ~ 490 mm。种植制度为一年一熟,主要农作物是玉米。土壤类型为褐土性土,试验前土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 试验地土壤的基本性质

有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	pH (H ₂ O)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
7.51	0.38	8.39	35.00	11.46	159.81

1.2 试验设计

供试作物为春玉米(先玉 335),试验处理分为传统施肥和调控施肥,传统施肥方案来自当地农民的施肥量,调控施肥方案来自山西农科院农业综合调查所推荐施肥量。处理随机区组排列,设 3 次重复,小区面积为 28 m² (4 m × 7 m)。肥料施用时期与施用量见表 2,基肥均匀面施,之后翻耕耙匀;于玉米拔节期(6 月 28 日),传统施肥方式采用穴施覆盖追施氮肥,底座内追肥量相当于 1 穴施用量,所用氮肥为尿素(N 含量为 46.40%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 含量为 11.50%)。

表 2 不同处理下的施肥方案(kg/hm²)

处理	基肥 (5 月 11 日)		追肥 (6 月 28 日)
	N	P ₂ O ₅	N
传统施肥	293.00	69.00	139.20
调控施肥	217.00	145.50	-

注:“-”表示未施肥。

1.3 温室气体采集与测定

土壤 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放通量采用静态暗箱-气相色谱法测定。野外观测与气体样品采集于 2011 年 5 月 11 日至 9 月 25 日进行,基肥施用后在每一小区的中央选取地表相对平坦的区域安放底座,底座内无植株,并且距离底座边框 20 cm 的范围内不种植玉米。采样时将采样箱扣在底座上并用水密封,于扣箱后 0、10、20、30 min 时用 60 ml 注射器从采集箱中部的采气孔插入,来回抽动 3 次以便完全混匀气体,抽取气体 30 ml 转存于真空瓶中。采样时间在上午 9—11 点进行,采样当天为天气晴朗或多云天气的日子,每周采集一次^[16](其中施肥后均第二天采样,之后每周一次,若出现降雨,则在第二天采集一次,之后每周一次)。每次在采集气体样品时,同

步监测采样箱内温度、大气温度、5 cm 地温及 0 ~ 10 cm 土壤含水量。所采集的气体样品采用 Agilent 公司 GC-7890A 气相色谱仪同时测定 CO₂、CH₄ 和 N₂O。

1.4 GWP 和 GHGI 计算

全球增温潜势(GWP)是将各种温室气体的增温潜势换算为 CO₂ 当量。100 年时间尺度的综合温室效应计算公式^[17]为:

$$GWP = 25 \times E-CH_4 + 298 \times E-N_2O \quad (1)$$

式中, E-CH₄ 和 E-N₂O 分别为 CH₄ 和 N₂O 季节排放量(kg/hm²)。

以 CO₂ 为参照, CH₄ 和 N₂O 的相对 GWP 值在 100 年时间尺度上分别为 25 和 298;

$$GHGI = GWP/Y \quad (2)$$

式中, GWP 为 CH₄ 和 N₂O 综合增温潜势(CO₂ kg/hm²); GHGI 为该处理温室气体排放强度(CO₂ kg/t); Y 为单位面积平均产量(t/hm²)。

1.5 数据处理

为了使分析结果更符合客观实际,首先依据 Dixon 检验法对可疑值进行取舍,试验有效数据采用 Microsoft Excel 2003 进行处理,采用 SPSS 17.0 进行处理间显著性差异分析,显著性差异水平为 P < 0.05。

2 结果分析与讨论

2.1 不同施肥模式下土壤温室气体排放通量季节变化特征

如图 1a 所示,传统施肥和调控施肥的 N₂O 排放通量分别为 0.001 5 ~ 0.31 mg/(m²·h) 和 0.002 4 ~ 0.16 mg/(m²·h),平均排放通量分别为 0.062 和 0.018 mg/(m²·h),前者是后者的 3.44 倍,这表明调控施肥能明显降低 N₂O 的排放速率。从季节动态来看,两种施肥模式下的土壤 N₂O 排放通量动态变化趋势不同,与调控施肥比,传统施肥方式下 N₂O 的排放通量多了一个明显的排放高峰,由于此排放峰是在追肥之后产生,由此可见,施肥可明显改变 N₂O 排放动态;此外在 7 月 31 日和 9 月 8 日,两种施肥模式均分别出现了两个比较弱的排放峰,则可能与 7 月 29 日的大雨和 9 月 4 日的中雨有关^[18];而且两种施肥模式首个 N₂O 排放峰出现的时间也有差异,调控施肥在施基肥后的第一周内达到排放高峰,并在第四周峰基本消失,而传统施肥在施肥后的第二周才达到排放高峰,并在第五周结束。从不同 N₂O 排放在整个玉米不同生育期内的分配来看,土壤 N₂O 排放主要集中在施基肥后一个月时间内。经统计,传统施肥和调控施肥在此期间 N₂O 排放总量占季节排放总

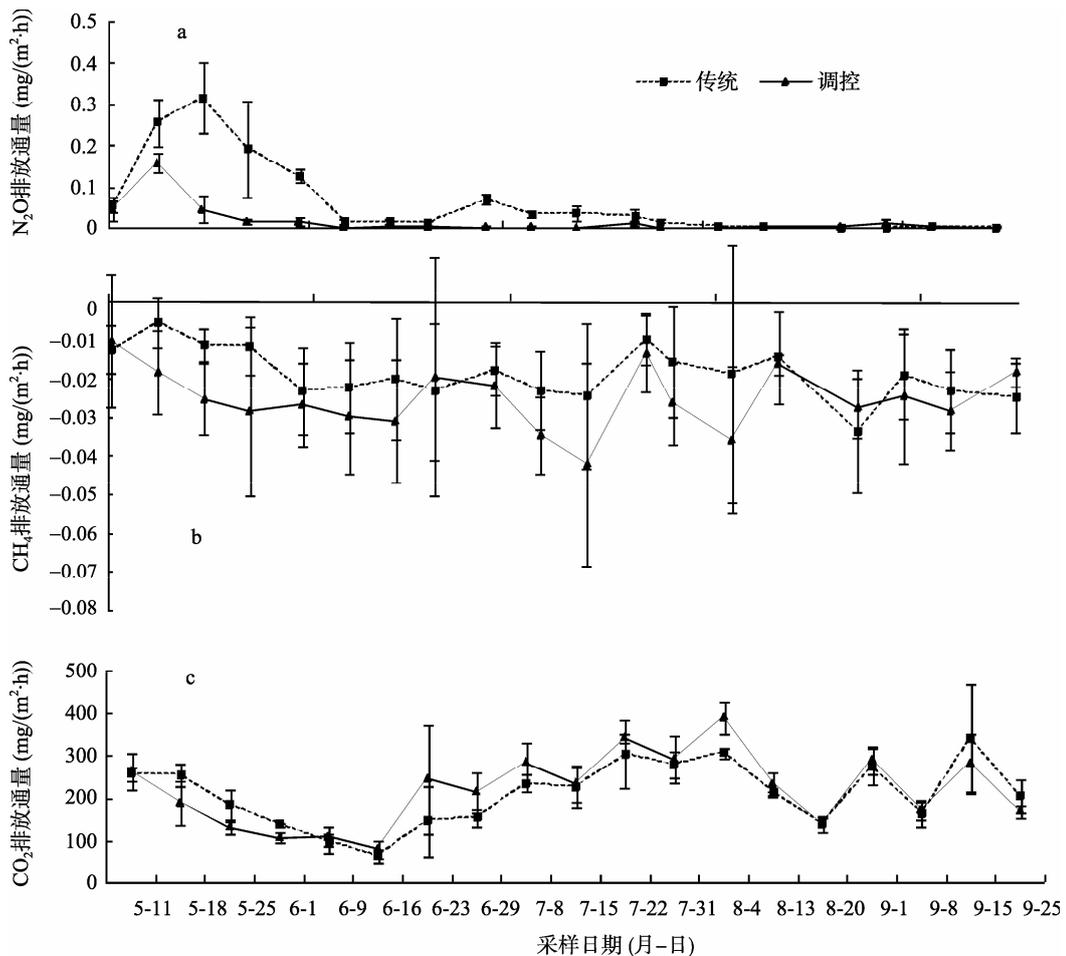


图 1 土壤温室气体排放通量的季节动态变化

Fig. 1 Seasonal variations of soil GHG flux under different fertilization treatments

量的比例分别可达到 79.30% 和 76.48%。由两者对比综合分析可以得出,基肥施用是影响雨养旱地 N₂O 排放的主要因素。

对 CH₄ 排放特征而言,在整个生长季节内,两种施肥模式下土壤 CH₄ 排放都表现出了吸收的共同特征(图 1b),从图中可以看出,调控施肥方式有促进土壤吸收 CH₄ 的趋势,也就是说施氮肥量增加抑制了土壤对 CH₄ 的吸收。Hutsch 等^[7]研究也得出在农田生态系统中当无机氮施用量由 48 kg/hm² 增加至每年 144 kg/hm² 时,土壤的 CH₄ 氧化速率明显降低;并且美国北部温带森林增施氮肥后,CH₄ 氧化能力降低了 30%~60%^[19]。有研究表明,无机氮肥对 CH₄ 氧化的抑制作用主要是因为:①土壤中 CH₄ 含量低,不能激活 CH₄ 单氧酶的活性;② NH₄⁺ 抑制 CH₄ 氧化;③ NH₄⁺-N 肥料抑制了 CH₄ 氧化菌的活性;④施肥破坏了 CH₄ 菌要求的稳定土壤结构^[20]。

从图 1c 可以看出传统施肥和调控施肥的 CO₂ 季节平均排放通量分别为 62.48 ~ 340.67 mg/(m²·h)和 80.10 ~ 389.23 mg/(m²·h),平均排放通量分别为

208.19 和 218.40 mg/(m²·h),两者无显著性差异。从季节排放动态来看,整个生育期两种施肥模式的 CO₂ 排放动态变化趋势一致。6 月 16 日之前 CO₂ 排放通量逐渐降低,6 月 23 日迅速上升,此后到玉米收获期,各处理的 CO₂ 排放通量均处较高水平,排放高峰交替出现。观测前期土壤的翻耕使得土壤通气性变好,有助于 CO₂ 的产生和排放^[21],因此前期土壤呼吸较高,随后 CO₂ 逐渐降低。到六月中下旬,气温升高,降雨增多^[12](图 2),导致排放高峰交替出现。

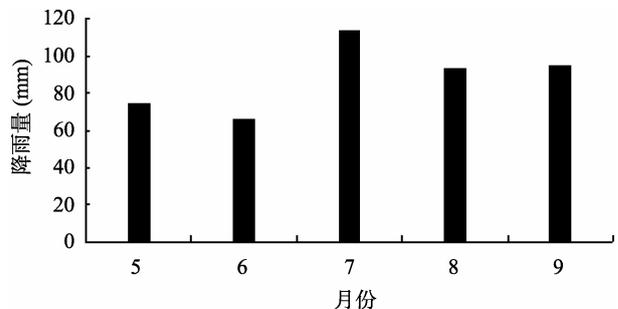


图 2 玉米生长季降雨量的时间分布

Fig. 2 Temporal distribution of precipitation during growing season

2.2 不同施肥模式下温室气体排放量与温室效应强度

由表 3 可知, 两种施肥处理下农田 N_2O 季节排放总量分别为 2.06 和 0.61 kg/hm^2 。与传统施肥相比, 调控施肥的 N_2O 排放量显著降低了 70.40% (t 检验, $P < 0.05$)。这与刘运通等^[22]的通过优化施肥明显降低 N_2O 排放的研究结果相一致, 分析其结果可能有两个方面原因: 传统施肥和调控施肥相比, 前者氮肥的用量高, 进而增加了其硝化过程中微生物的有效氮源, 从而促进其 N_2O 的排放^[23]; 传统施肥和调控施肥相比, 后者磷肥的用量较高, 可能会增加其土壤磷酸酶的活性^[24], 由于磷酸酶活性越强, 速效态磷水平越高, 则土壤中的有效态氮能很好地被生物利用, N_2O 排放少^[25], 因此可以初步推测是氮、磷的交互作用提高了氮的利用效率, 从而减少了 N_2O 的排放, 但关于氮磷交互作用对 N_2O 排放的影响的机理研究较少, 还有待进一步的研究。然而, 对两个施肥处理的 CH_4 和 CO_2 排放总量统计检验得出, 施肥模式对土壤 CH_4 和 CO_2 排放总量的影响均不显著(表 3), 表明雨养旱地采用调控施肥对两者的排放无显著作用。

表 3 不同施肥模式对 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 排放量的影响(kg/hm^2)

Table 3 Effects of different fertilization modes on seasonal amount of N_2O , CH_4 and CO_2 emission

处理	N_2O 排放总量	CH_4 排放总量	CO_2 排放总量
传统施肥	2.06 ± 0.40 a	-0.62 ± 0.31 a	6945.70 ± 271.87 a
调控施肥	0.61 ± 0.07 b	-0.84 ± 0.42 a	7245.81 ± 571.71 a

注: 表中同列数据字母不同表示差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 下同。

全球增温潜势(GWP)表示土壤产生温室气体的综合效应, 通过对 CH_4 和 N_2O 全球增温潜势的计算得出, 与传统施肥相比, 在 100 年尺度下调控施肥的 GWP 显著降低 73.08%(表 4), 由于调控施肥对土壤 CH_4 和 CO_2 的排放无显著影响, 因此, 调控施肥对 GWP 的降低主要由 N_2O 排放量降低所引起。

表 4 不同施肥模式对 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响
Table 4 Effects of different fertilization modes on integrated GWP of N_2O , CH_4

处理	产量 (t/hm^2)	GWP(CH_4+N_2O) (CO_2 , kg/hm^2)	GHGI (CO_2 , kg/t)
传统施肥	8.71 ± 0.55 a	599.12 ± 113.09 a	68.45 ± 8.50 a
调控施肥	9.06 ± 0.58 a	161.27 ± 10.34 b	17.86 ± 1.77 b

农业生产的基本目标是作物产量, 在分析温室气体减排的同时应将产量因素考虑在内, Herzog 等^[26]提出了温室效应强度(GHGI, greenhouse gas intensity)

的指标, 即单位经济产出温室气体排放量, 由表 4 可知, 调控施肥下并没有降低玉米产量, 反而有增加产量的趋势, 从“量比线性极点养分平衡理论”^[27]可知, 由于调控施肥通过降低肥料的 N/P, 提高了土壤有效磷的供应量, 使土壤的养分配比更符合作物的生长需求, 因而, 尽管氮肥施用量降低, 但作物的产量并没有下降。从计算的 GHGI 可以看出, 调控施肥方式的 GHGI 较传统施肥方式减少了 74.00%。由此可见, 调控施肥方式在雨养农业中是一种较好的进行温室气体减排的有效施肥措施。

3 结论

(1) 雨养旱地温室气体排放明显受施肥方式的影响, 与传统施肥相比, 改变氮、磷配比(调控施肥)明显改变 N_2O 排放动态, 且显著降低其排放, 而对旱地土壤 CO_2 和 CH_4 的排放特征和总量均无显著影响。

(2) CH_4 和 N_2O 的综合温室效应分析结果表明, 调控施肥方式下的 GWP 与 GHGI 均显著低于传统施肥方式, 这表明雨养旱地采用调控施肥的方式, 在综合降低温室气体排放的同时仍可实现农业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 潘根兴, 高民, 胡国华, 魏钦平, 杨晓光, 张文忠, 周广胜, 邹建文. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1 698-1 706
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007: 63-67
- [3] 李迎春, 林而达, 甄晓林. 农业温室气体清单方法研究最新进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1 076-1 080
- [4] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 彭小培, 李娜, 朱志平. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273
- [5] Mosier A, Schimel D, Valentine D, Bronson K, Parton W. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands[J]. Nature, 1991, 350(6316): 330-332
- [6] Steinkamp R, Butterbach-Bahl K, Papen H. Methane oxidation by soils of an N limited and N fertilized spruce forest in the Black Forest, Germany[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 145-153
- [7] Hutsch BW, Webster CP, Powlson DS. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the broadbalk wheat experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25: 1 307-1 315
- [8] Gregorich EG, Rochette P, VandenBygaart AJ, Angers DA. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and

- potential mitigation practices in eastern Canada[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 83(1): 53–72
- [9] Mcswiney CP, Robertson GP. Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system[J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1 712–1 719
- [10] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687–692
- [11] De JE, Schappert HJV, MacDonald KB. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate[J]. Soil Science, 1974, 54: 299–307
- [12] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 李恋卿. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1 783–1 790
- [13] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 王跃忠, Sass RL. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003(4): 7–12
- [14] 阿里巴巴农业频道. 玉米四大主产区管理技术[OL]. [2011-11-23]. <http://info.china.alibaba.com/news/detail/v0-d1021712666.html>
- [15] 褚清河, 潘根兴, 李典有, 史海平, 张旭辉. 氮磷等比与以磷定氮条件下玉米的最大施肥量研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1 083–1 089
- [16] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 李恋卿. 水稻土基底呼吸与 CO₂ 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 485–494
- [17] Zhang AF, Liu YM, Pan GX, Hussain Q, Li LQ, Zheng JW, Zhang XH. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. Plant Soil, 2011, 351(1/2): 263–275
- [18] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. 土壤学进展, 1995, 23(6): 35–42
- [19] Ojima DS, Valentine DW, Mosier AR, Parton WJ, Schimel DS. Effect of land use change on methane oxidation in temperate forest and grassland soils[J]. Chemosphere, 1993, 26(1/4): 675–685
- [20] Goulding KWT, Willison TW, Webster CP, Powlson DS. Methane fluxes in aerobic soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1996, 42(1/2): 175–187
- [21] 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(3): 8–10
- [22] 刘运通, 万运帆, 林而达, 李玉娥, 陈德立, 秦晓波, 高竹清, 金琳, 武艳娟. 施肥与灌溉对春玉米土壤 N₂O 排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 997–1 002
- [23] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 周权锁, Sass RL. 氮肥水平对不同土壤 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2 094–2 098
- [24] Spiers GA, McGill WB. Effects of phosphorus addition and energy supply on acid phosphatase production and activity in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1979, 11(1): 3–8
- [25] 李春越, 白红英, 党廷辉, 王万忠. 农田土壤磷酸酶活性与土壤 N₂O 排放通量的相关性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2): 231–234
- [26] Herzog T, Baumert KA, Pershing J. Target: Intensity—An Analysis of Greenhouse Gas Intensity Targets[M]. Washington DC: World Resources Institute, 2006: 3–4
- [27] 褚清河, 李健英, 王海存, 师颖, 杨玉画. 土壤养分类型与量比线性极点养分平衡规律[J]. 山西农业科学, 2002, 30(3): 25–28

Effect of Different Fertilization Mode on Greenhouse Gas Emissions from Rain-fed Dry Land

WU Gang¹, PAN Gen-xing¹, ZHENG Ju-feng^{1*}, GUO Yao-dong², LI Lian-qing¹, CHU Qing-he³, ZHOU Tong¹, LIU Xiao-yu¹

(1 Institute of Resource Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Institute of Maize, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Xinzhou, Shanxi 034000, China; 3 Institute of Integrative Survey of Agro Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Based on the measurement of CO₂, N₂O and CH₄ emissions from corn farmland by the static-chamber/gas chromatography technique, this paper studied the effects of two kinds of fertilization modes including traditional fertilization and controlling fertilization on greenhouse gas emissions in rain-fed dry land. The results showed that the seasonal characteristics and total amount of emissions of CO₂ and CH₄ were not significantly different under various fertilization modes, whereas those of N₂O were significantly different between two kinds of fertilization modes. Compared to traditional fertilization, N₂O emission from cropland under controlling fertilization decreased by 70.40%, indicating that base fertilizer application was an important factor affecting N₂O emission. Integrated evaluation of greenhouse effect showed that, the global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) of controlling fertilization were significantly lower than those of traditional fertilization, which decreased by 73.08% and 74.00%, respectively. The study further suggested that amendment of N : P ration (controlling fertilization) is an effective approach to reduce greenhouse gases in rain-fed dry land.

Key words: Fertilization mode, Rain-fed dry land, Green house gas mitigation, GWP, GHGI