

灌溉对农田温室气体排放影响研究进展概述

段 鹏

(西藏自治区农牧科学院农业研究所,西藏 拉萨 850032)

摘 要:灌溉是中国旱作农业极其重要的管理措施,其变化定会对农田温室效应产生影响。本文结合当前国内外的研究进展,综述了灌溉对农田主要温室气体二氧化碳(CO₂)、氧化亚氮(N₂O)与甲烷(CH₄)排放的影响因子及作用特征,并根据研究结果,提出了今后研究的重点方向,以期更好地揭示灌溉对农田温室气体通量产生的影响、作用机制,为控制农田温室气体排放提供科学依据。

关键词:灌溉;农田生态系统;CO₂;CH₄;N₂O

中图分类号:S365 文献标志码:A

Research Progress on the Effects of Irrigation on Greenhouse Gas Emissions from Farmland

DUAN Peng

(Institute of Agriculture, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tibet Lhasa 850032, China)

Abstract: As an important management measure of dryland agriculture in China, irrigation is bound to have an important impact on the greenhouse effect of farmland. Based on the research progress at home and abroad, this paper summarizes the influencing factors and characteristics of irrigation on the emission of main greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂), nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄), and puts forward the key research directions in the future, in order to better reveal the effect mechanism of irrigation on the greenhouse gas flux and control the greenhouse gas emission from farmland.

Key Words: irrigation; farmland ecosystem; CO₂; CH₄; N₂O

气候的变化是当下国际和国内都非常关注的社会热点问题。据专家预测,相比100年前,2025年全球年均气温将升高2℃,而2100年平均气温将升高4℃^[1]。最新研究表明:CO₂、N₂O和CH₄等3种气体对温室效应影响最严重,它们可吸收热辐射,增加地球表面温度,也称之为温室气体^[2]。这3种气体对全球温室效应的贡献率能达到80%^[3]。人类活动的影响,造成“温室效应”气体浓度急剧增加,已成为全球气候变暖最重要的因素^[4]。农业生产可产生一定量的温室气体,温室气体的最主要来源是农田土壤,有机质经微生物在土壤中分解,产生CO₂;长期被水淹没的农田,经微生物发酵可产生CH₄;一半以上的N₂O气体来自于土壤的硝化与反硝化过程。长期被水淹没的稻田每年大约排放

5 000万~10 000万t的CH₄,占CH₄全球总排放量的10%~20%,为CH₄主要来源之一^[5]。李长生等^[2]通过DNDC(生物地球化学过程模型)对连续淹灌和定期晒田两种灌溉模式进行了模拟,得出1980—2000年,其他条件一样,仅灌溉模式的改变,中国稻田CH₄的年排放量大约可减少500万t。

灌溉农业是中国粮食产量的主要来源,约占粮食总产的70%,农田用水总量也达到全国用水总量的70%^[6]。土壤中的水分是碳循环过程的关键驱动因子,能够促进温室气体排放,在一定范围内,土壤中的水分与温室气体的通量有非常明显的正相关性^[7-9],因此,通过改变灌溉方式,改变土壤中水分分布的变化以及水分含量定能对土壤的吸附强度、温室气体排放以及土壤中的有机物质的矿化分解等产生非常重要的影响。灌溉作为旱作物农田管理非常重要的管理措施,不仅可以改善旱作农田的土壤水分情况,满足农作物日常生长的需求,还

收稿日期:2020-10-14

作者简介:段鹏(1983-),男,农艺师,研究方向为青稞示范推广和高产栽培,E-mail:13736877@qq.com。

能够通过改善农田中土壤的有机质的矿化分解率,改变其微生物的含量以及活性,还可以通过改变农作物根系气体扩散速率以及微生物含量等影响灌溉农田土的碳排放强度^[10]。

1 灌溉对农田 CO₂排放的影响的研究进展概况

1.1 CO₂的产生途径与排放概述

CO₂对全球气候变化的影响较其他的温室气体大,是非常重要的温室气体^[11]。从19世纪50年代末起,CO₂的含量以每年百万分之一的速率逐步上升,近10年,CO₂更是以每年百万分之二的速度上升^[12]。2013年,在美国莫纳罗亚天文台曾多次观测到大气中的CO₂浓度达到400 mg/kg以上。在我国,农业是CO₂的汇集区,并不是CO₂产生的源头,但是我国农业系统固碳率很低。初步估算,1990—2000年的10年间,我国农业系统固碳的比例约占总体比例的10%,剩余的90%则长期存于农产品与土壤中,再以不同的形式排放或直接排进大气中。CO₂是土壤中微生物代谢和生物化学分解等综合因素影响的产物^[13]。

CO₂的排放来自于农田生态系统中土壤的呼吸,主要包括3个生物学过程和1个非生物学过程,即:土壤微生物的呼吸、土壤中动物的呼吸、植物根系的呼吸和土壤中含碳物质的氧化分解。决定土壤呼吸强度的因素主要是土壤中有机的含量、矿化速率、微生物种群的活性及数量、土壤中的动植物呼吸作用等。土壤中CO₂排放就是土壤中生物化学过程以及土壤中微生物的代谢等综合因素影响的产物^[14]。

1.2 灌溉对土壤 CO₂排放的影响机制

CO₂在土壤中形成以后,通过扩散的方式向大气中转移,它的排放量不仅受到土壤中CO₂气体浓度分布的影响,还受到环境因子的影响^[15]。研究表明,农作物根系及其周围微生物种群排出的CO₂约占土壤排放总量的20%~50%^[16]。Li等^[17]认为,漫灌的长时间间隔、土壤中水分的大量蒸发、土壤频繁的干湿交替,均可产生更大量的CO₂,CO₂的排放通量上,设施农业的膜下滴灌低于普通的无膜漫灌。土壤中CO₂的浓度,漫灌与滴灌相比,漫灌一次浇水量大,并且能够迅速淹没田块,造成土壤板结,土壤通气性变差,使得土壤中的CO₂很难快速地扩散出去,进而使得漫灌的土壤中CO₂的浓度比

滴灌的高7.4%~49.7%^[18]。但是Kallenbach等美国科学家对西红柿田的灌溉研究发现,沟灌和灌溉对西红柿田中的CO₂的浓度及其排放通量表现差异不显著^[19]。灌溉方式的不同对CO₂的排放的影响效应也不同,不同的灌溉方式下,土壤中生物的呼吸不同,CO₂的排放速率也不同,均是由于水分的变化引起的。同时,不同的灌溉方式必定会带来土壤中水分时间动态变化差异,由于滴灌较漫灌转换的频率更高,土壤的干湿交替现象更频繁,产生的CO₂也会出现不同。Borken等^[20]发现,干湿交替会加强土壤有机质的矿化,还能引起原先不易被利用的、容易分解的有机质重新矿化,增强土壤微生物活性,进而大幅增加CO₂的排放;但频繁的干湿交替又会导致土壤的矿化量降低,进而大幅减少CO₂的排放。此外,气候条件的变化与灌溉对CO₂排放有较大的影响^[21]。

灌溉会导致土壤中含水量的增加,进而促进了植物根系的呼吸作用,还能影响到微生物群落的活性,促使土壤的呼吸作用增强。而大水漫灌,会引起土壤板结,土壤中氧气浓度降低,厌氧环境能够抑制土壤中的微生物活性,可以明显降低土壤的呼吸作用。一般认为,在干旱条件下,土壤水分欠缺,灌溉之后土壤中的水分含量会迅速增加,进而促进植物根系的呼吸作用以及提高土壤中的微生物活性,土壤的呼吸作用显著增强^[22]。但是土壤呼吸作用与灌溉量并不呈简单的线性关系,漫灌时间长,当土壤空隙含水量大时,又会造成厌氧环境,抑制土壤的呼吸^[23]。

去除土壤的本身特性,灌溉也是一种释放CO₂的过程。Follett等^[24]科学家指出,灌溉用的水泵消耗产生的温室气体量达到200 kg C·hm⁻²·a⁻¹。Zou等^[25]从节能减排的方面分析,节水灌溉相比传统灌溉,3年可降低能源消耗共计15.23(9.59~20.85)t标准煤,大概可减少34.67 t CO₂排放。

2 灌溉对农田 CH₄排放的影响的研究进展概况

2.1 土壤 CH₄排放概述与产生途径

土壤中微生物活动过程是增加大气中CH₄的主要来源。在厌氧环境下,死亡的作物根系、作物残茬、根系分泌物、土壤有机物、土壤微生物、死亡的土壤动物、有机肥或农家肥等有机物在细菌的作用下被逐步降解为醇、有机酸和CO₂等小分子化合

物,甲烷菌再将这些小分子化合物转变成 CH_4 。土壤中 CH_4 的排放主要受土壤有机质含量、酸碱度以及土壤含水量等土壤生物理化特性影响。如稻田、湿地、废弃物的堆积场等均是土壤中 CH_4 排放源,其中稻田是农田生态系统中 CH_4 排放的主要来源,大约占全球 CH_4 总排放量的12%^[26]。

2.2 灌溉对 CH_4 排放的影响机制

影响土壤中 CH_4 吸收的主要因素是土壤中水分的含量^[27],灌溉对 CH_4 排放的影响表现极其显著。在一定条件下,土壤的含水率越高, CH_4 的氧化能力越低^[28]。目前国内外灌溉对 CH_4 排放的影响机制研究主要集中在湿地、水稻田以及有机物垃圾掩埋场等 CH_4 的主要排放源上,对旱作田的土壤 CH_4 的研究则很少。然而有研究表明,旱田的土壤环境更有利于 CH_4 氧化菌的繁殖,通过氧化作用,可消耗大气中的 CH_4 ,是陆地生态系统中,除大气光化学反应外,最大的消耗机理^[29]。因此,目前亟需解决的是加强旱作农田重要温室气体,尤其是 CH_4 的排放、吸收特征研究,也是准确评价灌溉方式与增强温室效应关联机理研究的一项重要科学基础。在厌氧环境下,产甲烷菌作用于产甲烷基质产生 CH_4 ,适宜的产甲烷菌生长环境和充足的产甲烷基质是产生 CH_4 的先决条件。 CH_4 排放通量主要是由土壤 CH_4 产生和氧化的差值决定^[30], CH_4 产生和氧化与甲烷氧化菌、产甲烷菌等微生物活性有正相关性,也与土壤中营养元素的输入和土壤温度有关,温度会通过影响土壤微生物活性,进而影响土壤甲烷的产生与氧化^[31],从而直接影响土壤中 CH_4 的排放量。

3 灌溉对农田 N_2O 排放的影响

3.1 土壤 N_2O 排放概述与产生途径

N_2O 是中国农田生态系统产生的最主要的温室气体之一,虽然它对大气的增温贡献只占4%,但其单位质量增温的潜能是 CH_4 的4~21倍,是 CO_2 的159~296倍,而且它能在大气中留存120年^[32],一旦它的浓度增加,短时间内很难降低。 N_2O 的排放主要源自于农田土壤,占大气中 N_2O 来源的80%~90%^[33],占比人类活动总排放量的92%。减少土壤 N_2O 的排放量不仅可以减少N素损失,还有利于提高氮肥利用率,在一定程度上还能够减弱温室效应。微生物的硝化和反硝化反应是土壤中 N_2O 的主要来源。影响土壤中微生物活性的因素都将有

可能直接或间接影响硝化和反硝化反应,进而影响 N_2O 的产生,比如土壤中碳、氮含量、土壤的温度等^[34]。除上述因素外,土壤中还存在化学反应,如硝化过程。 N_2O 的排放量还受到pH值和Fe、Cu等离子的影响^[35]。土壤中 N_2O 的产生取决于微生物的硝化和反硝化作用^[36]。所以,不同的灌溉方式对土壤 N_2O 的产生和排放量有着极其重要的影响。

3.2 灌溉对 N_2O 排放的影响机制

在现代化的农业灌溉生态系统中,水肥一体化模式对 N_2O 的排放有一定的影响,其中灌水和氮肥的管理对 N_2O 的排放是主要的影响因素^[37-38]。灌溉和增施氮肥能够形成有利的反硝化作用环境,在厌氧的条件下增加了土壤中 N_2O 的排放^[39]。在生态系统的试验中,80%~95%的 N_2O 的排放量来自于灌溉和施肥过程^[40]。Vallejo等^[41]和Meijide等^[42]对半干旱灌溉系统的研究中发现,对比施用氮肥,增施有机肥可有效减少NO和 N_2O 的排放。不同的灌溉方式可通过影响N元素的淋溶和矿化等来影响土壤中有效N元素的分布和量,进而对土壤中 N_2O 的排放产生影响。灌溉后立即施用氮肥的土壤产生的 N_2O 的量明显大于施用有机肥的,说明土壤中的无机氮对 N_2O 的产生有重要作用^[43]。研究发现,灌溉后,玉米植株的根可通过根际周围微环境,增加根向周围土壤分泌N、C等元素,可为硝化和反硝化菌提供物质基础,进而促进硝化和反硝化发生,增加土壤中 N_2O 产生量^[44]。

4 小结与讨论

近10年来,国内外对不同的灌溉技术和灌溉方式对土壤中温室效应的贡献以及对土壤中有机碳的含量变化等的影响的研究取得了一定的成果,这方面的研究也已逐步受到国内外学者的普遍关注,但与我国在土地利用、耕作制度和养分投入等农作物的管理方法比,在农作物灌溉的定量、定性及评价分析等方面的研究仍旧十分匮乏,导致在农业土壤的温室气体排放、温室气体效应等方面的研究有很多不确定性因素,将直接影响到灌溉对温室气体效应的精确评价,直接导致无法精准提出科学减排措施。基于现代灌溉与温室气体排放等方面存在的问题,今后应着重从以下几个方面加强研究。

4.1 不同的灌溉方式之间的对比

国内外相关方面的研究仅停留在不同的灌溉

方式和不同的灌溉农田等方面的对比试验研究,在不同的灌溉方式之间方面,尤其是在传统的灌溉方式和节水灌溉方面的对比研究还是很欠缺。尤其是在研究中还欠缺在灌溉方式变化后,土壤温室气体排放的空间性差异变化。节水灌溉属于土壤的局部灌溉,与传统的大水漫灌相比,对土壤造成的湿润度不同,所以,应该考虑到不同灌溉方式对土壤中温室气体产生的变化差异,进而能够更加准确地计算出不同的灌溉方式对农田土壤的温室气体吸收与总量的相关性,进而能够更加准确地为农田温室气体排放与吸收提供科学理论依据。

4.2 开展农田温室效应的系统研究

目前灌溉方式的变化对土壤温室气体的产生以及对农田温室效应的研究,仅停留在碳排放量等方面的研究,对农作物的碳固化量等方面的研究依然不足,导致实验结果很难精准评价不同的灌溉方式,对整个农业生态系统的碳固化以及碳汇总等方面存在很大不确定性。同时,现在对温室气体的研究多停留在CO₂、CH₄和N₂O这3种气体中的一种或者两种气体的研究,3种温室气体的共同期监测研究还是很少。不同的灌溉管理方式,定会影响温室气体的排放及产生,甚至还可能出现温室气体之间此消彼长的情况。因此,在探讨研究不同的温室气体与增温效应的同时还应充分考虑到不同的灌溉方式对温室效应的贡献率等方面的问题。

4.3 加强灌溉对温室效应的长期与短期影响的共同研究

农田中水分含量的变化与温室气体的排放量,通常是时效性很短的,且有一定的激发性。而这些情况对植物以及农田土壤等的固碳能力的影响却是不断积累的、长期的过程,因此,不同的灌溉方式对农作物系统、土壤以及土壤中微生物的系统影响,都会影响到农田温室气体的排放量以及排放方式,且是一个长期的过程。我们应该将不同时间段与试验示范的研究结果充分地结合起来,才能有效地研究不同的灌溉方式对温室气体的排放影响。

4.4 进一步深化相应的机理研究

不同的灌溉方式对温室效应的贡献率的研究还处于初期。现阶段的研究仅处于灌溉农田与农田温室气体变化通量等方面的研究,而它对农田周围环境的驱动机制研究,尤其是灌溉农田地下生态系统研究、生态驱动机制研究以及植物周边的微生物学研究等,仍然十分缺乏。

参考文献:

- [1] 曹志洪. 施肥与大气环境质量—论施肥对环境的影响[J]. 土壤, 2003, 35(4): 265-270.
- [2] 李长生, 肖向明. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493-503.
- [3] IPCC. Special report on emissions scenarios, working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Britain: Cambridge University Press, 2000.
- [4] 沈仕洲, 王 风, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015, 1(6): 1-8.
- [5] EHHALT D, PRATHER M, DENTENER F, et al. Atmospheric chemistry and greenhouse gases [M]//Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 127.
- [6] 韩洪云, 赵连阁. 中国灌溉农业发展——问题与挑战[J]. 水利经济, 2004, 22(4): 54-58.
- [7] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. Global Change Biology, 1998, 4: 217-227.
- [8] FLANAGAN L B, JOHNSON B G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130: 237-253.
- [9] NORTON U, MOSIER A R, MORGAN J A, et al. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40: 1421-1431.
- [10] 张前兵, 杨 玲, 王 进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2420-2430.
- [11] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47-52.
- [12] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. Geoderma, 2004, 123: 1-22.
- [13] 王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌. 土地利用和覆被变化对土壤碳库和碳循环的影响[J]. 亚热带农业研究, 2005, 1(3): 44-51.
- [14] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. Botanical Review, 1997, 43: 449-528.
- [15] 梁福源, 宋林华, 王 静. 土壤CO₂浓度昼夜变化及其对土壤CO₂排放量的影响[J]. 地理科学进展, 2003, 22(2): 170-176.
- [16] Edgar R Lemon. CO₂ and plants [Z]. 1983: 67-79.
- [17] LI Z, ZHANG R, WANG X, et al. Carbon dioxide fluxes and concentrations in a cotton field in Northwestern China: Effects of plastic mulching and drip irrigation [J]. Pedosphere, 2011, 21(2): 178-185.
- [18] 陶丽佳, 王凤新, 顾小小. 膜下滴灌对土壤CO₂与CH₄浓度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 2(3): 330-336.
- [19] KALLENBACH C M, ROLSTON D E, HORWATH W R. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depend-

- ing on type of irrigation [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3): 251-260.
- [20] BORKEN W, MATZNER E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 808-824.
- [21] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 [J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5246-5256.
- [22] 汤 亿, 严俊霞, 孙 明, 等. 灌溉和翻耕对土壤呼吸速率的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(6): 2625-2627, 2671.
- [23] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1764-1773.
- [24] FOLLETT R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61: 77-92.
- [25] ZOU X X, LI Y E, GAO Q Z, et al. How water saving irrigation contributes to climate change resilience—a case study of practices in China [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2012, 17: 111-132.
- [26] SASS R L, FISHER F M, WANG Y B, et al. Methane emission from rice fields: the effect of floodwater management [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6: 249-262.
- [27] 吴得峰. 黄土旱塬区减氮条件下氮素利用及温室气体排放特征 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [28] WHALEN S C, REEBURGH W S, KIZER K S. Methane consumption and emission by Taiga [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(3): 261-273.
- [29] 李玉娥, 林而达. 土壤甲烷吸收汇研究进展 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(6): 613-618.
- [30] SUNDH I, MIKKELA C, NILSSON M, et al. Potential aerobic methane oxidation in a sphagnum-dominated peat land controlling factors and relation to methane emission [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 829-837.
- [31] NYK H, VASANDER H, HUTTUNEN J T, et al. Effect of experimental nitrogen load on methane and nitrous oxide fluxes on ombrotrophic boreal peatland [J]. *Plant and Soil*, 2002, 242(1): 147-155.
- [32] ZHU Z H. Research progresses on the fate of soil N supply and applied fertilizer N in China [J]. *Soils*, 1985, 17(1): 2-9.
- [33] MELILLO J M, STEUDLER P A, BER J D. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, 298: 2173-2176.
- [34] LI Y C, SONG C C, LIU D Y. Advances in studies of N₂O emission in wetland soils [J]. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 124-129.
- [35] ZHU X, SILVA L C R, DOANE T A. Iron: The forgotten driver of nitrous oxide production in agricultural soil [J]. *Plos One*, 2013, 8(3): e60146.
- [36] HOUGHTON J T, DING Y, GRIGGS D J. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 38-41.
- [37] Vallejo A, García-Torres L, Díez J A, et al. Comparison of N losses (NO₃⁻, N₂O, NO) from surface applied, injected or amended (DCD) pig slurry of an irrigated soil in a Mediterranean climate [J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1/2): 313-325.
- [38] SCHEER C, WASSMANN R, KIENZLER K, et al. Methane and nitrous oxide fluxes in annual and perennial land-use systems of the irrigated areas in the Aral Sea Basin [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2454-2468.
- [39] CALDERON F J, JACKSON L E. Rototillage, disking, and subsequent irrigation: effects on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, and carbon dioxide efflux [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(3): 752-758.
- [40] SCHEER C, WASSMANN R, KIENZLER K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: influence of nitrogen applications and irrigation practices [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 290-301.
- [41] Vallejo A, Skiba U M, García-Torres L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2782-2793.
- [42] Meijide A, Díez J A, Sánchez-Martín L, et al. Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a Mediterranean climate [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 121(4): 383-394.
- [43] KENNEDY T L, SUDDICK E C, SIX J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 170: 16-27.
- [44] 黄国宏, 陈冠雄, 张志明, 等. 玉米田 N₂O 排放及减排措施研究 [J]. *环境科学学报*, 1998, 18(4): 344-349.