张传更,高 阳,王广帅,等.干湿交替和外源氮对农田土壤CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2079–2090. ZHANG Chuan-geng, GAO Yang, WANG Guang-shuai, et al. Effects of drying-wetting and additional nitrogen on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from farmland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 2079–2090.

# 干湿交替和外源氮对农田土壤CO2和 N2O 释放的影响

# 张传更,高阳\*,王广帅,李双

(中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453003)

摘 要:以黄淮海平原潮土区的砂壤土和黏壤土为研究对象,通过培养试验研究了干湿交替(干湿频率分别为0、2、6、12次)和外源 氮(2种土壤中添加氮累计量均为220 mg N·100g<sup>-1</sup>干土)下砂壤土和黏壤土的 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 释放模式的影响。结果表明,干湿交替和 外加氮源显著激发了砂壤土和黏壤土的 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 的释放速率:干燥期越长,外加 N 源对土壤 CO<sub>2</sub>释放速率的激发效应越强;干燥 期越短,外加 N 源对土壤 N<sub>2</sub>O 释放速率的激发效应越强。两种土壤的 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 的释放速率对干湿交替的响应模式一致,砂壤土的 碳氮矿化速率对干湿交替响应更为强烈,砂壤土的可溶性有机碳和无机氮(NO<sub>5</sub>和 NH<sup>2</sup>)含量及温室气体排放速率均高于黏壤土。 在外加氮源的条件下,干湿交替显著提高了砂壤土和黏壤土中可溶性有机碳和无机氮的含量,增大了实际生产中农田土壤无机氮 淋失和温室气体排放的可能性。

关键词:干湿交替;氮源;CO<sub>2</sub>释放;N<sub>2</sub>O释放;可溶性有机碳;无机氮

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)09-2079-12 doi:10.11654/jaes.2017-1608

#### Effects of drying-wetting and additional nitrogen on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from farmland soils

ZHANG Chuan-geng, GAO Yang\*, WANG Guang-shuai, LI Shuang

(Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

**Abstract :** Under laboratory controlled conditions, the effects of drying-wetting cycles (dry-wet frequency : 0, 2, 6 and 12 cycles) and nitrogen addition on soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O release patterns were investigated with soils of fluvo-aquic sandy loam and fluvo-aquic clay loam, which were typical soils in the Huang-Huai-Hai Plain. The results showed that the drying-wetting cycles and nitrogen addition significantly increased the release rate of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in the sandy and clay loam soil. The longer the drying period, the stronger the excitation effect of nitrogen addition on the soil CO<sub>2</sub> release rate, whereas the shorter the drying period, the stronger the excitation effect of nitrogen addition on the soil CO<sub>2</sub> release rate, whereas the shorter the drying period, the stronger the excitation effect of nitrogen addition on the soil CO<sub>2</sub> release rate. There were similar response patterns of soil greenhouse gas (CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O) release rates to the drying-wetting cycle between the two cropland soils. Compared with the clay loam soil, the sandy loam soil presented a more intense response of carbon and nitrogen mineralization to the drying-wetting cycle. The dissolved organic carbon and inorganic nitrogen content, and the greenhouse gas release rate in the sandy loam soil were significantly greater than that of the clay loam soil. Under the condition of nitrogen addition, the drying-wetting cycle significantly increased the dissolved organic carbon and inorganic nitrogen content in the sandy loam and clay loam soil, which increased the probability of inorganic nitrogen(NO<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub>) leaching loss and the green house gases(CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O) emission in agricultural production.

Keywords: drying-rewetting cycles; nitrogen addition; CO2 production; N2O release; dissolved organic carbon; inorganic nitrogen

收稿日期:2017-11-23 录用日期:2018-02-27

作者简介:张传更(1990—),男,河南濮阳人,硕士研究生,主要从事农田生态系统碳氮循环过程研究。E-mail:huainian1992zcg@163.com \*通信作者:高 阳 E-mail:gaoyang@caas.cn

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03);国家自然科学基金项目(51679242);水利部行业科研专项(201501017)

Project supported: China Agricultural Research System (CARS-03); The National Natural Science Foundation of China (51679242); The Special Fund for Scientific Research in the Public Interest, the Ministry of Water Resources (201501017)

农业环境科学学报 第37卷第9期

在全球气候变化背景下,干旱、极端降雨事件和人 类活动会导致土壤频繁的经历干旱和再湿润过程<sup>11</sup>。 干湿交替能够改变土壤生态系统的水分、养分状况和 土壤物理性质,进而影响土壤的碳氮循环过程和土壤 温室气体的排放<sup>12-31</sup>。人类活动造成的温室气体排放 中14%来源于农田生态系统,农田生态系统排放的 温室气体就全球升温潜势(GWP)标准下的贡献率达 到22%<sup>141</sup>。农业生产中的温室气体减排已成为当前国 内外全球变化领域关注的热点,是减缓气候变化的重 要途径之一<sup>15-61</sup>。近年来,水肥一体化节水灌溉作为 一种重要的农业生产措施得到了广泛的推广和应用, 而如何通过科学的水肥灌溉措施来降低农田温室气 体排放是一个研究热点。

水肥一体化会使农田土壤经历更为频繁的干湿 交替循环,尤其是在干旱/半干旱地区。而诸多研究 表明,干湿交替能加速土壤碳氮的释放,主要表现为 以温室气体(如 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O)排放和以矿化形态(如 NH4和NO3)从土壤中淋失[7-8]。贺云龙等[9]和Huygens 等四认为干旱土壤湿润后,土壤 CO2和 N2O 释放量会 激增,而随着湿润土壤再干旱,释放速率急速下 降<sup>[2,9]</sup>。欧阳扬等发现于旱土壤再湿润对CO<sub>2</sub>的释放 有相似的激发效应<sup>[10]</sup>。Fraser等在研究干湿交替对农 田土壤的影响试验中,也发现了干旱土壤再湿润可以 激发CO2的释放<sup>[11]</sup>。近几年,国内外对土壤遭受干湿 交替的研究逐步深入,涉及到中度、轻度和重度干旱 等因素,不同类型土壤酶活性对于湿交替的响应机 制等研究[12-13];然而,土壤中氮矿化机制对干湿交替 的响应机制仍不清晰[14],更少涉及到农田土壤氮循环 的研究。此外,已有的干湿交替研究更多地关注单一 因素的作用,而非多因子交互作用[15]。土壤中的碳氮 并不是孤立存在的,在各种外界环境改变的状态下, 干湿交替条件下碳的响应往往是伴随着其他元素的 变化而一起变化。因此,深入探讨干湿交替与其他因 子耦合对碳氮转化的影响是十分必要的。本文以潮 土为研究对象,通过进行干湿交替与外加氮源下农田 土壤的碳氮动态变化和温室气体(CO2和N2O)排放的 研究,为制定科学的水氮管理措施和农业生产温室气 体减排措施提供理论依据与数据支撑。

# 1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土样分别取自中国农业科学院七里营 综合试验基地(35°08′N,113°45′E,海拔81m)和河 南省沁阳市广利灌区(35°40′N,112°55′E,海拔150 m),两地都位于半干旱、半湿润的暖温带大陆性季风 气候区。七里营试验区的潮土起源于黄河冲积沉积 物,属于典型的碱性砂壤土;广利灌区的潮土属于典 型的碱性黏壤土,质地黏重,耕性差,通气透水性差。 使用直径4 cm的土钻采集上层0~40 cm 深度的土 样,随机取60钻后混合。一部分土样(约3 kg)装入自 封袋,然后立即放入装有冰块的保温箱中,带回实验 室在4℃下保存;剩余的土壤装入布袋带回实验室, 剔除植物残体和石块,用静电吸附去除细小的植物 须根,风干后过4 mm 筛备用。另一部分用于培养试 验和测定土壤基本理化性质。供试土壤的基本理化 性质见表1。

#### 1.2 试验设计

培养试验在中国农业科学院七里营试验基地的 人工气候室内进行。称取相当于100g烘干质量的风 干土分别按密度1.51、1.48g·cm<sup>-3</sup>填装于500mL塑料 瓶中,盖子上钻有一个小孔,利于注射器采集气体样 品;用去离子水调节土壤含水量至土壤持水量的 70%,置于25℃下培养7d(平衡培养)以恢复土壤生 化性质,之后开始干湿交替培养试验。本试验设置氮 浓度和干湿循环两个因素,其中干湿循环频率设4个 水平,分别为0(即恒湿,作为对照)、2、6、12。干旱是 指使土壤干燥到 35% 土壤持水量(WHC),湿润期指 的是土壤湿度维持在70%WHC,培养过程中丧失的 水分通过称量来补充。干湿循环和试验流程详见图1。

同一干湿频率中,一个处理不加氮,另一个处理 加氮(采用含氮量为46.67%的尿素)。砂壤土中对应 干湿频率添加的外源氮浓度分别为4、15、5、2.5g·L<sup>-1</sup> (N);黏壤土中对应干湿频率添加的外源氮浓度分别 为5、12、4、2g·L<sup>-1</sup>(N)。同一土壤培养试验共有8个

表1 土壤基本理化性质

Table <sup>*</sup>	$1 S_0$	il nh	vsical	and	chemical	properties
rabic .	1 50	п рп	ysicai	anu	cincinicai	properties

土壤质地	pН	总氮	土壤有机碳	密度	土壤持水量	粒径Part	icle size distr	ibution/%
Soil texture	(水土比2:1)	Total N/g·kg <sup>-1</sup>	Soil organic C/g·kg <sup>-1</sup>	Bulk density/g ${\scriptstyle \bullet} cm^{{\scriptscriptstyle -}3}$	Water hold capacity/%	黏粒Clay	砂粒Silt	砂粒Sand
砂壤土	8.32±0.10	1.36±0.02	16.63±0.37	1.51±0.03	20.54±1.35	8.79±0.25	47.94±3.23	43.27±1.52
黏壤土	8.09±0.07	1.52±0.11	18.24±0.69	1.48±0.15	26.02±0.87	39.82±2.62	41.13±3.06	19.05±0.95



Figure 1 Schematic of the drying-rewetting cycles and sampling times and testing flow

处理,每个处理3次重复。外加氮频率和溶液浓度见 表2。

#### 1.3 测定项目与方法

# 1.3.1 土壤理化性质测定

土壤 pH 值用酸度计测定,土壤全氮含量用凯氏 定氮法测定,土壤质量含水量采用烘干法测定,土壤 粒径分布采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)测定<sup>[16]</sup>; 土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法<sup>[17]</sup>测定;土壤持水 量(WHC)和土壤容重采用 Fierer 和 Schimel 的方法测 定<sup>[7]</sup>。

# 1.3.2 土壤 NH 和 NO 含量测定

第一次和最后一次循环湿润期结束时,采集土壤 样品,一部分用于测定NHi和NO3(新鲜土样置于4℃ 冰箱保存),一部分测定土壤可溶性有机碳。取10g 新鲜土壤样品放入50 ml三角瓶中,加入50 mL的浓 度为2 mol·L<sup>-1</sup>的KCl溶液(优级纯GR),室温下将混 合液振荡15 min(200 r·min<sup>-1</sup>),提取上清液用于NHi 和NO3含量分析,使用AA3-HR连续流动分析仪(德 国,Seal Analgtical)测定土壤中NHt和NO3含量。称取 10g(干土质量)新鲜土样,放入150mL的离心管中, 加入50mL去离子水,常温下以250r·min<sup>-1</sup>振荡60 min,之后,在3000r·min<sup>-1</sup>下离心10min,取上部悬浮 液过0.45 µm微孔滤膜,用Vario TOC-CUBE有机C分 析仪(德国,Elementar)测定浸提的上清液中的可溶性 有机碳含量,即为可溶性有机碳含量<sup>[18]</sup>。

# 1.3.3 CO2和N2O排放量测定

在每一次湿润开始和结束(湿润阶段培养瓶完全 密封)使用注射器(30 mL)抽取培养装置内的气体样 品,采用气相色谱仪器(GC-2010 plus,日本岛津)测定 土壤CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量,并参照Lang等的CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O 排放的数学模型<sup>[19]</sup>,通过公式(1)计算:

 $F=V\times(C_2-C_1)\times M/(W\times t)$  (1) 式中:F为温室气体排放速率:CO<sub>2</sub>(mg CO<sub>2</sub>-C·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>) 和 N<sub>2</sub>O(µg N<sub>2</sub>O-N·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>);V是培养瓶上部空间体 积,L; $C_1$ 和  $C_2$ 分别代表土样和空白培养瓶中温室气体 浓度,mg·kg<sup>-1</sup>;T是培养温度(25 °C);M代表温室气体

				1, 0	
处理 Treatment	添加次数 Add frequency(times) -	溶液浓度Solution concentration/g·L <sup>-1</sup>		氮累计量 Accumulation of nitrogen/mg•100g <sup>-1</sup> dry soil	
		砂壤土Loam	黏壤土Clay loam	砂壤土Loam	黏壤土Clay loam
0(恒湿)	12	4	5	220	220
2循环	2	15	12	220	220
6循环	6	5	4	220	220
12循环	12	2.5	2	220	220

	表2	氮溶液	浓度和添加	I频率	
Table 2	Concentra	ation and	frequency	of nitrogen	addition

2082

分子量(CO<sub>2</sub>-C为12, N<sub>2</sub>O-N为28); W代表土样质量(干),g;t代表培养瓶密封时间,d。

#### 1.4 数据分析

采用 Excel 2007 及 Origin 8.5 做图;利用 DPS12.50软件不同处理间的差异进行方差分析,差 异显著性水平(P<0.05)通过最小显著差数法(LSD) 进行检验。

# 2 结果与分析

#### 2.1 CO2释放规律

2.1.1 每个再湿润阶段 CO2释放速率的动态变化

砂壤土和黏壤土干湿循环各处理的CO<sub>2</sub>释放速 率都高于与之对应的恒湿组(图2)。在砂壤土和黏 壤土处理中,12循环处理的CO<sub>2</sub>释放速率的变化趋势 与恒湿处理相似,都是在培养的前30d有明显的下降 趋势,然后趋于平稳。而在砂壤土加氮处理中,12循 环-N与恒湿-N处理的CO<sub>2</sub>释放速率在整个培养周期 呈现逐渐下降的趋势;在砂壤土加氮处理中,12循 环-N与恒湿-N处理的CO<sub>2</sub>释放速率在整个培养末期 趋于平稳。 从总体分析,干湿循环中干旱期越长,再湿润阶段 CO<sub>2</sub>的释放速率越大。通过对同一种土壤第一次和最后一次 CO<sub>2</sub>的释放速率进行差异性分析(表3), 外源 N 的恒湿和干湿组处理的 CO<sub>2</sub>释放速率都高于 与之对应未加氮的恒湿和干湿组处理(图2)。相同 处理下,第一次循环砂壤土和黏壤土的 CO<sub>2</sub>释放速率 之间差异显著,并且第一次循环砂壤土的 CO<sub>2</sub>释放速率 之间差异显著,并且第一次循环砂壤土的 CO<sub>2</sub>释放速率 应率同样高于黏壤土(表3);最后一次砂壤土的 CO<sub>2</sub>释放速率 应率同样高于黏壤土。两种农田土壤中砂壤土的 CO<sub>2</sub>释放速率显著高于黏壤土,说明砂壤土 CO<sub>2</sub>释放 变化对干湿交替的响应更为强烈(图2)。总之,2种 不同农田土壤 CO<sub>2</sub>释放速率的变化模式一致。

两种农田土壤,虽然添加氮都促进了CO<sub>2</sub>的释放,但添加氮对砂壤土CO<sub>2</sub>的释放激发效应要比黏壤 土强烈。在黏壤土中,12循环-N、6循环-N、2循环-N 和恒湿-N的CO<sub>2</sub>平均释放速率分别比未加氮源处理 的CO<sub>2</sub>平均释放速率提高了37.14%、41.12%、48.33% 和23.29%;在砂壤土中,12循环-N、6循环-N、2循环-N和恒湿-N的CO<sub>2</sub>平均释放速率分别比未加氮源处 理的CO<sub>2</sub>的平均释放速率提高了45.62%、47.66%、





Figure 2 Dynamics of soil CO<sub>2</sub> release rate during each re-wetting phrase of drying-wetting cycles

#### 农业环境科学学报 第37卷第9期

73.36%和49.30%。在两种农田土壤处理中,干燥期 越长(2循环组),外加N源对土壤CO<sub>2</sub>释放速率的激 发效应越强。

2.1.2 干湿交替对土壤可溶性有机碳(DOC)的影响

本试验条件下,砂壤土和黏壤土各处理在最后一次循环时的 DOC 含量相比于初始和第一次循环显著 增加,并且从表4看出,砂壤土各处理的 DOC 含量在 整体上都略高于黏壤土,表明砂壤土中难溶性有机质 转化为 DOC 速率更高些,砂壤土对干湿交替响应的 更为强烈。砂壤土和黏壤土中的各 12 循环-N、6 循 环-N、2 循环-N和恒湿-N等处理 DOC 含量都低于对 应的 12 循环、6 循环、2 循环和恒湿等处理,说明外加 N源能加速 DOC 的消耗。在最后一次循环时,砂壤土 和黏壤土的2循环处理的 DOC 含量最高,2循环-N处 理的 DOC 含量次之;最后一次循环时,砂壤土6循环 处理和恒湿处理之间差异不显著,砂壤土6循环-N 处理和恒湿-N处理之间同样差异不显著,两处理组 中的 DOC 含量非常接近;最后一次循环时,黏壤土6 循环处理与恒湿处理之间差异不显著,6循环-N处理 DOC 含量显著高于恒湿-N处理。

# 2.2 N<sub>2</sub>O的释放

2.2.1 每个再湿润阶段 N<sub>2</sub>O 释放速率的动态变化

砂壤土和黏壤土在首次和最后一次循环时各处 理的 N<sub>2</sub>O 释放速率之间的差异显著,并且加氮各处理

表3 各处理土壤CO2释放速率的变化(mg C-	$-CO_2 \cdot g^{-1} \operatorname{soil} \cdot d^{-1})$	
--------------------------	--	--

Table 3 Variations of CO<sub>2</sub> release rate from the two soils in different treatments (mg C-CO<sub>2</sub>  $\cdot$  g<sup>-1</sup> soil  $\cdot$  d<sup>-1</sup>)

处理	第1次循环CO <sub>2</sub> 释放速率C	O2 release rate in the first cycle	最后1次循环CO2释放速率CO2 release rate in the last cycle		
Treatment	砂壤土Sandy loam	黏壤土 Clay loam	砂壤土 Sandy loam	黏壤土 Clay loam	
恒湿	14.78±0.35g**	11.25±0.24f**	5.10±0.84f	4.93±0.41f	
恒湿-N	19.18±0.51f**	14.68±0.27e**	6.87±0.56e*	5.49±0.54f*	
2循环	24.52±0.57d**	20.52±0.77c**	$20.57 \pm 0.39 b^*$	19.17±0.57b*	
2循环-N	41.89±0.50a**	30.89±1.32a**	36.28±0.48a**	28.28±0.45a**	
6循环	22.32±1.25e*	19.32±0.31cd*	8.62±0.67d	8.25±0.32d	
6循环-N	36.27±1.19b**	28.06±0.83b**	14.49±0.55c*	12.25±0.34c*	
12循环	22.52±1.05e**	18.35±0.36d**	6.45±0.46e*	7.05±0.39e*	
12循环-N	33.97±1.08c**	27.32±0.42d**	8.95±0.65d	8.79±0.42d	

注:同列数据后不同字母表示同列处理之间差异达显著水平(P<0.05);星号表示同一处理下同一循环下砂壤土和黏壤土的CO<sub>2</sub>释放速率的差异性,\*表示在 P<0.05 水平上显著相关,\*\*表示在 P<0.01 水平上显著相关。下同。

Note: Different letters in the same column meant significant difference among treatments of the same column at 0.05 level; asterisk represent the difference of  $CO_2$  release rate in the same cycle of sandy loam and clay loam under the same treatment; \* represent significant difference among treatments at 0.05 level, \*\* represent significant difference among treatments at 0.01 level. The same below.

#### 表4 各处理土壤可溶性有机碳的变化(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Variations of dissolved organic carbon in the two soils in different treatments (mg·kg<sup>-1</sup>)

处理	砂壤土落 Dissolved organic c	新性有机碳 arbon in the sandy loam	黏壤土溶解性有机碳 Dissolved organic carbon in the clay loam		
Treatment	第1次循环The first cycle	最后1次循环The last cycle	第1次循环The first cycle	最后1次循环The last cycle	
平衡阶段	69.45±1.20g		47.35±2.12g		
恒湿	74.28±2.23e	$119.10 \pm 1.76 d$	45.65±1.61h	87.44±1.32d	
恒湿-N	71.97±0.59f	98.56±2.09f	41.28±1.10i	74.86±1.43f	
2循环	108.98±1.09a	142.47±1.28a	83.34±1.82a	116.61±1.75a	
2循环-N	88.22±0.89c	$128.48 \pm 1.69 b$	$72.59 \pm 1.13$ b	102.62±1.86b	
6循环	95.56±1.12b	121.01±2.34d	65.86±0.87c	<b>89.14±2.14</b> d	
6循环-N	83.48±2.03d	97.37±1.39f	60.85±1.53d	79.51±0.95e	
12循环	82.27±1.36d	125.55±1.53c	54.76±1.46e	93.69±1.92c	
12循环-N	$75.96 \pm 1.95 e$	101.31±2.58e	51.64±0.73f	80.21±1.09e	

注:"平衡阶段"处理指的是在试验开始前平衡培养阶段取的土样。

Note: Initial treatment refers to obtaining soil samples during the equilibrium culture phase before the experiment.

#### 农业环境科学学报 第37卷第9期

的N<sub>2</sub>O释放速率显著高于未加氮处理(图3,表5);在 砂壤土和黏壤土中,外加N源提高了恒湿和干湿组处 理的N<sub>2</sub>O释放速率。砂壤土和黏壤土的干湿交替处 理N<sub>2</sub>O释放速率都高于与之对应的恒湿组(图3)。在 砂壤土和黏壤土中,对比各恒湿组和干湿组处理,发 现除了2循环-N和2循环处理外,其他处理的N<sub>2</sub>O释 放速率均呈现逐渐较少的趋势。在砂壤土和黏壤土 中,12循环处理的N<sub>2</sub>O释放速率在培养的前30d有明 显的下降趋势,然后趋于平稳,并在培养后期,12循 环处理的N<sub>2</sub>O释放速率的变化趋势与恒湿处理一致。 在砂壤土和黏壤土中,12循环-N处理的N<sub>2</sub>O释放速 率则与6循环处理的变化趋势较相似。

在培养前期,砂壤土和黏壤土中干湿循环中干旱 期越短,再湿润阶段 N<sub>2</sub>O 的释放速率越大;在培养后 期,砂壤土和黏壤土中各处理的 N<sub>2</sub>O 释放速率变化与 对应各处理的 CO<sub>2</sub>释放规律一致,释放速率都是随着 干旱期增长而增加。相同处理下,第一次循环时砂壤 土和黏壤土中除了 2 循环-N 外各处理的 N<sub>2</sub>O 释放速



└└ 恒湿 ◆ 2循环 △ 6循环 ● 12循环

#### 图3 干湿交替下每个湿润阶段 N<sub>2</sub>O 释放速率

Figure 3 Dynamics of soil N2O release rate during each re-wetting phrase of drying-wetting cycles

#### 表5 各处理土壤 N<sub>2</sub>O 释放速率的变化(mg N-N<sub>2</sub>O·kg<sup>-1</sup> soil·d<sup>-1</sup>)

Table 5 Variations of  $N_2O$  release rate from the two soils in different treatments (mg N-N<sub>2</sub>O·kg<sup>-1</sup> soil·d<sup>-1</sup>)

处理Treatment	第1次循环N <sub>2</sub> O释放速率N	20 release rate in the first cycle	最后1次循环N2O释放速率N2O release rate in the last cycle		
	砂壤土 Sandy loam	黏壤土 Clay loam	砂壤土 Sandy loam	黏壤土 Clay loam	
恒湿	0.44±0.01f**	0.32±0.01h**	0.14±0.01h*	0.10±0.007f*	
恒湿-N	0.57±0.02c**	$0.44 \pm 0.02 e^{**}$	0.24±0.01f**	0.18±0.01e**	
2循环	$0.32 \pm 0.02 g^*$	$0.36 \pm 0.01 g^*$	$0.34 \pm 0.01 d^*$	$0.39 \pm 0.01 b^*$	
2循环-N	0.53±0.01d	0.55±0.01c	0.61±0.02a*	0.57±0.02a*	
6循环	0.47±0.02e**	0.40±0.01f**	$0.27 \pm 0.01 e^*$	0.22±0.01d*	
6循环-N	0.72±0.03b**	0.61±0.02b**	$0.45 \pm 0.02 b^*$	$0.40 \pm 0.01 b^*$	
12循环	0.59±0.01c**	0.46±0.01d**	0.19±0.01g	0.17±0.01e	
12循环-N	0.84±0.02a**	0.64±0.02a**	0.39±0.01c**	0.29±0.01c**	

率之间差异显著(表3),最后一次循环时砂壤土和黏 壤土中除了12循环外各处理的N<sub>2</sub>O释放速率之间的 差异显著(表3)。总体来看,黏壤土的N<sub>2</sub>O释放速率 低于与之相同处理的砂壤土N<sub>2</sub>O释放速率。

两种农田土壤中,相比于黏壤土,在砂壤土中添加氮源更能促进N<sub>2</sub>O的释放。在黏壤土壤中,12循环-N、6循环-N、2循环-N和恒湿-N的N<sub>2</sub>O平均释放速率提高了46.96%、51.48%、60.42%和58.07%;在砂壤土壤中,12循环-N、6循环-N、2循环-N和恒湿-N的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率分别比未加氮源处理的N<sub>2</sub>O平均释放速率投高,400平均和农田土壤处理中,干燥频率越高,400平均和N源对土壤N<sub>2</sub>O释放速率的激发效应越强。

如图4所示,砂壤土和黏壤土各处理第一次循环 和最后一次循环再湿润阶段土壤无机氮(NO3和NH4) 含量变化。总体来看,砂壤土各处理的第一次循环和 最后一次循环无机氮(NO3和NH4)含量高于黏壤土, 说明干湿交替更能加速砂壤土有机氮的矿化速率,添 加的有机氮在砂壤土中更易被转化;砂壤土和黏壤土 中的各12循环-N、6循环-N、2循环-N和恒湿-N等 处理无机氮(NO3和NH4)含量都高于对应的12循环、 6循环、2循环和恒湿等处理。对比第一次循环和最 后一次循环再湿润阶段土壤的NO3和NH4含量,可以 发现通过持续的恒湿处理和多次的干湿循环处理后, 土壤的无机氮含量都有所增加,12循环组处理无机 氮含量(NO<sub>3</sub>和NH<sup>2</sup>)增加最为显著。在12循环、6循 环和2循环等处理中,砂壤土和黏壤土的无机氮(NO<sub>3</sub> 和NH<sup>2</sup>)含量随着干湿频率的递增而增加,表明干湿 循环能显著增加土壤中氮的矿化速率,并且干湿频率 越高效应越显著;而在12循环-N、6循环-N和2-循 环-N处理中,砂壤土和黏壤土的无机氮(NO<sub>3</sub>和NH<sup>2</sup>) 含量高于与之对应的未加氮处理,表明外加氮源显著 增加了各处理土壤中无机氮的含量。

2.3 土壤可溶性有机碳、无机氮(NO₃和NH₄)及CO₂、N₂O释放速率的相关关系

选取砂壤土和黏壤土整个试验周期内每次复水 后各处理的土壤可溶性有机碳、无机氮(NO3和NH4) 及 CO2、N2O 释放速率进行相关性分析,结果见表6。 砂壤土的 CO2释放速率与 N2O 释放速率、NH4呈极显 著正相关,而与可溶性有机碳和 NO3呈显著相关 性;黏壤土的 CO2释放速率与 N2O 释放速率、NH4呈 极显著正相关,与可溶性有机碳呈显著相关性。砂 壤土和黏壤土的 N2O 释放速率都与 NH4、NO3显著正 相关。

# 2.4 CO2和N2O释放积累总量

图 5 为干湿循环和恒湿对照处理在整个试验培养 周期内的土壤 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 释放的积累量。砂壤土和黏 壤土的加氮各处理的 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 释放的积累量都高于 未加氮处理,总体呈现恒湿-N 处理>12 循环-N>恒 湿>6循环-N>12 循环>6循环>2 循环-N>2 循环,而且



不同大写字母表示第1次循环各处理无机氮差异达显著水平(P<0.05),不同小写字母表示最后1次循环各处理无机氮差异达显著水平(P<0.05) Different capital letters represent significant difference among treatments at 0.05 level in the first cycle. Different lowercase represent significant difference among treatments at 0.05 level in the last cycle

#### 图4 干湿交替对土壤无机氮(NO3和NH4)的影响

Figure 4 Effects of drying-wetting treatments on soil inorganic nitrogen(NO3 and NH4) content

砂壤土的 $CO_2$ 和 $N_2O$ 释放积累量增加最为显著。在砂 壤土中,恒湿对照的土壤 $CO_2$ 释放的积累量492.54  $\mu$ g C-CO<sub>2</sub>·g<sup>-1</sup>土与之对应的12-循环的积累量为 376.10  $\mu$ g C-CO<sub>2</sub>·g<sup>-1</sup>土,增加了 30.96%;恒湿-N对照 的土壤CO<sub>2</sub>释放的积累量为706.56  $\mu$ g C-CO<sub>2</sub>·g<sup>-1</sup>土与 之对应的12循环-N的积累量为532.23 μg C-CO<sub>2</sub>·g 土,增加了32.75%。砂壤土中,恒湿-N的土壤CO<sub>2</sub>释 放的积累量比与之对应的恒湿处理的积累量增加了 43.45%;12循环-N的土壤CO<sub>2</sub>释放的积累量比与之 对应的12循环的积累量增加了41.51%。在黏壤土

表6 土壤可溶性有机碳、无机氮(NO3和NH4)及CO2、N2O释放速率的相关关系

Table 6 Correlation of soil dissolved organic carbon and inorganic nitrogen (NO3/NH4) and soil CO2 and N2O release rate

		CO₂释放速率 CO₂ release rate	N <sub>2</sub> O释放速率 N <sub>2</sub> O release rate	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon	NO3含量	NH:含量
砂壤土	CO <sub>2</sub> 释放速率	1	0.796**	0.568*	0.619*	0.748**
	N <sub>2</sub> O释放速率		1	0.599*	0.578*	0.589*
	可溶性有机碳 DOC			1	0.407	0.308
	NO3含量				1	0.729**
	NH‡含量					1
黏壤土	CO <sub>2</sub> 释放速率	1	0.928**	0.605*	0.496	0.628**
	N <sub>2</sub> O释放速率		1	0.316	0.601*	0.586*
	可溶性有机碳 DOC			1	0.415	0.461
	NO3含量				1	0.748**
	NH <sub>4</sub> 含量					1

注:\*表示在P<0.05水平上显著相关,\*\*表示在P<0.01水平上显著相关。

Note: \* represent significant correlation among treatments at 0.05 level, \*\* represent significant correlation among treatments at 0.01 level.



Figure 5 Cumulative CO2 and N2O emissions from the two soils in the different drying-wetting treatments

中,恒湿对照的土壤CO2释放的积累量410.36 μg C-CO2·g<sup>-1</sup> 土与之对应的12-循环的积累量为320.84 µg C-CO2·g<sup>-1</sup>土,增加了27.90%;恒湿-N对照的土壤 CO2释放的积累量为508.39 µg C-CO2·g<sup>-1</sup>土,与之对 应的12循环-N的积累量为444.24 µg C-CO<sub>2</sub>·g<sup>-1</sup>土, 增加了14.45%;黏壤土中,恒湿-N的土壤CO2释放的 积累量比与之对应的恒湿处理的积累量 410.36 μg C-CO2·g<sup>-1</sup>土,增加了23.89%;12循环-N的土壤CO2 释放的积累量比与之对应的12循环的积累量增加了 38.46%。由图5可以看出,外加氮处理能够增加土壤 中N2O的释放总量,其中砂壤土表现得最为显著,如 恒湿-N的土壤 N<sub>2</sub>O释放的积累量为 23.33 µg N-N<sub>2</sub>O· g<sup>-1</sup>土,与之对应的恒湿处理的积累量为14.13 μg N-NO2·g<sup>-1</sup>土, 增加了65.51%; 12循环-N的土壤 N2O释 放的积累量为17.50 μg N-N<sub>2</sub>O·g<sup>-1</sup>土,与之对应的12 循环的积累量为 9.95 µg N-NO2 · g<sup>-1</sup> 土, 增加了 75.84%。在黏壤土中,恒湿-N的土壤 N<sub>2</sub>O 释放的积 累量 18.36  $\mu$ g N-NO<sub>2</sub>·g<sup>-1</sup>土,与之对应的恒湿处理的 积累量为12.81 µg N-NO2·g<sup>-1</sup>土,增加了43.33%;12 循环-N的土壤 N<sub>2</sub>O 释放的积累量为 15.10 µg N-NO<sub>2</sub>· g<sup>-1</sup>土,与之对应的12循环的积累量为10.09 μg N-NO2·g<sup>-1</sup>土,增加了49.53%。在砂壤土中,恒湿对照的 土壤 N<sub>2</sub>O 释放的积累量比与之对应的 12-循环的积累 量增加了42.01%;恒湿-N对照的土壤N<sub>2</sub>O释放的积 累量比与之对应的12循环-N的积累量增加了 33.31%。在黏壤土中,恒湿对照的土壤 N<sub>2</sub>O 释放的积 累量比与之对应的12-循环的积累量增加了26.96%; 恒湿-N对照的土壤 N-O释放的积累量比与之对应的 12循环-N的积累量增加了21.59%。图中还可以看 出,在黏壤土和砂壤土中,6循环-N的N2O释放的积 累量与12循环的释放积累量非常接近。

# 3 讨论

# 3.1 干湿交替对土壤CO2释放和有机碳矿化的影响

干湿交替能够显著激发土壤CO<sub>2</sub>释放(图2)。有 研究表明,干旱土壤再湿润后,土壤CO2释放量能够 激增至原来的2~10倍[20];随着湿润土壤再干旱,土壤 CO2释放速率急速降低[21]。本研究中,砂壤土和黏壤 土等农田土壤中CO2的释放对干湿交替的响应都表 现出类似的激发现象,并且砂壤土CO2的释放变化对 干湿交替的响应更为强烈。

砂壤土CO2的释放速率高于黏壤土,可能是由于 砂壤土性质则介于砂土与黏土之间,土粒之间孔隙较

大,通气透水性好。有研究表明,当黏土颗粒间水分 的排出,颗粒之间相互靠拢以及颗粒间距缩短而引起 的体积收缩,黏土颗粒集聚[22],这种结果增加了难溶 性有机质转化被微生物直接利用的难度。干燥土壤 再次复水时,添加的水会导致土块的快速崩溃,把以 前形成的干燥裂缝快速闭合[23],最终导致在土壤湿润 阶段土壤孔隙封闭,抑制了温室气体的排放。因此, 本试验条件下同一处理下的砂壤土CO2和N2O释放 积累量增加得最为显著。但是在整个培养周期内,本 研究中砂壤土和黏壤土的CO2和N2O的释放累积量 呈现恒湿-N>12循环-N>恒湿>6循环-N>12循环>6 循环>2循环-N>2循环(图5)。水分是影响土壤CO2 和N2O释放速率的主要因素之一,随着湿润土壤再干 旱,土壤CO2释放速率急速降低124,因而在整个试验培 养周期内,恒湿处理的CO2和N2O释放速率维持在一 个稳定且较高的水平。在本文中,砂壤土恒湿-N的 土壤CO<sub>2</sub>释放的积累量比对应的恒湿处理的积累量 增加了43.45%,12循环-N的CO2积累量比对应的12 循环增加了41.51%;黏壤土恒湿-N的CO2积累量比 对应的恒湿处理增加了23.89%,12循环-N的积累量 比对应的12循环的积累量增加了38.46%。这些研究 结果均说明外加氮源促进了土壤CO2的释放。

可溶性有机碳(DOC)虽仅占土壤有机碳库的一 小部分,但作为微生物的重要能量来源,其含量直接 影响微生物数量及其活性,并且与温室气体排放密切 相关[25-26]。砂壤土和黏壤土的CO2释放速率都与DOC 呈显著相关(表3),即DOC含量越高,CO2释放速率越 高。有研究表明,干旱后土壤再湿润会使得微生物调 节渗透压以排出含碳化合物,同时土壤再湿润后土壤 颗粒裂解,裸露出更多的有机质被微生物得以利用, 最终导致 DOC 浓度在短期内迅速升高[27]。本试验研 究中,砂壤土和黏壤土的12循环-N、6循环-N和2循 环-N等处理在第一次循环和最后一次循环时的DOC 含量整体上高于恒湿对照的,表明12循环-N、6循 环-N和2循环-N等处理土壤中难溶性有机质转化 为 DOC 速率更高些,说明干湿交替提高了土壤中碳 的矿化速率,并且砂壤土中碳的矿化速率对干湿交替 响应的更为显著。本试验条件下,外加氮源促进了 CO<sub>2</sub>的释放,并且在两种农田土壤处理中,干燥期越 长,外加N源对土壤CO2释放速率的激发效应越强。 有研究表明,在实际的生产中,施用化肥氮也可以促 进农田土壤CO2的排放,如李晓密等研究不同施肥下 冬小麦-夏玉米轮作农田温室气体排放时发现施氮增

#### 农业环境科学学报 第37卷第9期

加 CO<sub>2</sub>的排放,并且尿素区>硝态氮肥区<sup>[28]</sup>; 王永生等 研究发现施氮能显著增加宁夏引黄灌区稻田 CO<sub>2</sub>的 排放<sup>[29]</sup>。添加氮源能够促进土壤 CO<sub>2</sub>排放的原因在 于:N源的添加降低了外源性物质的 C/N,增加了可矿 化态碳的潜力,加快了微生物量的周转速度,促进了 有机质的矿化过程<sup>[30]</sup>。从本试验的结果来看,干湿交 替能够显著激发砂壤土和黏壤土中 CO<sub>2</sub>释放,并且是 干湿频率越高,土壤有机碳矿化率越高。Borken 和王 苑等的研究也得出了相似的规律<sup>[31-32]</sup>。在两种农田 土壤处理中,干燥期越长,外加 N 源对土壤 CO<sub>2</sub>释放 速率的激发效应越强。

# 3.2 干湿交替对土壤 N<sub>2</sub>O 的释放和有机氮矿化的影响

干湿交替使得土壤频繁的经历干旱和湿润过程, 也使得硝化作用和反硝化作用交替进行,从而促进了 N2O的产生和氮的矿化[33-34]。在本试验条件下,干湿 交替能够显著激发土壤 N<sub>2</sub>O 的释放。这与刘学华和 Beare 等的研究结果相似<sup>[34-35]</sup>。研究表明干湿交替增 加了微生物的死亡量并破坏了土壤环境和有机物间 的相互作用,使得土壤中氮的矿化量增加,而且土壤 的硝化和反硝化量显著高于长期湿润的土壤":也有 研究表明,稻田土壤落干阶段的N<sub>2</sub>O的排放远大于田 间淹水时期的N<sub>2</sub>O排放量。其原因可能是稻田中土 壤含水量较高时(淹水)N<sub>2</sub>O的排放主要来自于反硝 化作用,在落干阶段 N<sub>2</sub>O 的排放要来自于硝化和反硝 化,同时落干阶段微生物更活跃[36]。本文中砂壤土和 黏壤土2种农田土壤的N2O释放变化对干湿交替的 响应都表现出类似的激发现象,并且砂壤土中N2O的 释放对干湿交替的响应更为强烈。培养前期,砂壤土 和黏壤土处理的干湿频率越高其土壤 N<sub>2</sub>O 的释放速 率也越高,与欧阳扬在农田生态系统进行的的试验结 果相似<sup>[10]</sup>。有研究表明,氮肥的施用对农田土壤 N<sub>2</sub>O 的排放有明显的促进作用[37-38]。在本试验条件下,砂 壤土和黏壤土中的12循环-N、6循环-N、2循环-N和 恒湿-N处理N<sub>2</sub>O的释放速率都高于对应的12循环、6 循环、2循环和恒湿处理。在砂壤土中,恒湿-N的 N<sub>2</sub>O释放的积累比对应的恒湿处理增加了65.51%,12 循环-N的N<sub>2</sub>O积累量比对应的12循环增加了 75.84%;在黏壤土中,恒湿-N的N2O释放积累量比对 应的恒湿处理增加了43.33%。这12循环-N的积累 量比对应的12循环增加了49.53%。这说明外加N源 能提高 N<sub>2</sub>O 的释放速率,并且砂壤土增加的最为显 著;并且是干燥期越短、外加N源对土壤N<sub>2</sub>O释放速 率的激增效应越显著,分析其原因认为:(1)是因为经 过多次的干湿交替后土壤团粒结构遭到破坏,暴露给 微生物的有机质会进一步增加,从而增加了土壤养分 的生物可利用性<sup>[31,39]</sup>;(2)是12循环处理的干旱期最 短并不会导致微生物的大量死亡也不会抑制微生物 的活性<sup>[40-41]</sup>,也可能和本试验条件下设置的干燥程度 较弱,使得微生物能保持活性且能高效利用土壤中裸 露出的有机质和复水时所加的N源有关。

相关研究表明,土壤中的无机氮(NO<sub>3</sub>和NH<sub>4</sub>)对 不同的水分状况有强烈的响应,当干燥的土壤复水后 无机氮含量显著增加,并且无机氮含量随着干湿频率 的增加而升高<sup>[8-9]</sup>。砂壤土和黏壤土的N<sub>2</sub>O释放速率 都与NO<sub>5</sub>、NH<sup>4</sup>显著正相关(表3),各处理土壤中的底 物无机氮(NO<sub>3</sub>和NH<sup>4</sup>)保证了N<sub>2</sub>O释放量。在本试验 条件下,干湿交替可以显著提高土壤中氮的矿化速 率、增加土壤的无机氮含量,外加氮源在高频次干湿 交替下能更高效地转化为无机氮;但是在农田实际生 产中,高浓度的无机氮(NO<sub>3</sub>和NH<sup>4</sup>)淋失和N<sub>2</sub>O排放的 可能性。

# 4 结论

(1)干湿交替激发了砂壤土和黏壤土的CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O 的释放速率;两种农田土壤中CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O的释放速率 对干湿交替频率的响应模式相类似;在相同处理下, 砂壤土的碳氮矿化速率对干湿频率的响应更为强烈。

(2)外加氮源都促进了2种农田土壤的CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O释放量:干燥期越长,外加N源对土壤CO<sub>2</sub>释放速 率的激发效应越强;干燥期越短,外加N源对土壤 N<sub>2</sub>O释放速率的激发效应越强。

(3)干湿交替增加了砂壤土和黏壤土中可溶性有 机碳和无机氮(NO<sub>3</sub>和NH<sup>4</sup>)的含量。在农田实际生产 中,高频干湿循环导致土壤中可溶性有机碳和无机氮 (NO<sub>3</sub>和NH<sup>4</sup>)的含量增多,增大了无机氮(NO<sub>3</sub>和NH<sup>4</sup>) 淋失和温室气体(CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O)排放的可能性。

#### 参考文献:

- Seneviratne SI, Luthi D, Litschi M, et al. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe[J]. Nature, 2006, 443(7108):205–209.
- [2] Huygens D, Schouppe J, Roobroeck D, et al. Drying-rewetting effects on N cycling in grassland soils of varying microbial community composition and management intensity in south central Chile[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 48(3):270–279.
- [3] Graaff M De, Six J, Harris D, et al. Decomposition of soil and plant carbon from pasture systems after 9 years of exposure to elevated CO<sub>2</sub>: Im-

pact on C cycling and modeling[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10 (11):1922-1935.

- [4] IPCC. Climate Change 2014: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [5] Vermeulen S J, Campbell B M, Ingram J S. Climate change and food systems[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2012, 37: 195-222.
- [6] 李建政, 王迎春, 王立刚, 等. 农田生态系统温室气体减排技术评价 指标[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):297-303.
  LI Jian-zheng, WANG Ying-chun, WANG Li-gang, et al. Evaluation indices of greenhouse gas mitigation technologies in cropland ecosystem

[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1):297–303.

- [7] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(6):777-787.
- [8] Leitner S, Homyak P M, Blankinship J C, et al. Linking NO and N<sub>2</sub>O emission pulses with the mobilization of mineral and organic N upon rewetting dry soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 461– 466.
- [9] 贺云龙,齐玉春,董云社,等.干湿交替下草地生态系统土壤呼吸变 化的微生物响应机制研究进展[J].应用生态学报,2014,25(11): 3373-3380.

HE Yun-long, QI Yu-chun, DONG Yun-she, et al. Microbial response mechanism for drying and re-wetting effect on soil respiration in grassland ecosystem: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11):3373-3380.

- [10] 欧阳扬, 李叙勇. 干湿交替频率对不同土壤 CO2和 N2O 释放的影响
  [J]. 生态学报, 2013, 33(4):1251-1259.
  OUYANG Yang, LI Xu- yong. Impacts of drying-wetting cycles on CO2 and N2O emissions from soils in different ecosystems[J]. Acta Eco-
- logica Sinica, 2013, 33(4):1251-1259.
  [11] Fraser F C, Corstanje R, Deeks L K, et al. On the origin of carbon dioxide released from rewetted soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101:1-5.
- [12] Leitner S, Minixhofer P, Inselsbacher E, et al. Short-term soil mineral and organic nitrogen fluxes during moderate and severe drying-rewetting events[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114:28–33.
- [13] Daou L, Perissol C, Luglia M, et al. Effects of drying-rewetting or freezing-thawing cycles on enzymatic activities of different Mediterranean soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2016, 93:142-149.
- [14] Gao J, Feng J, Zhang X, et al. Drying-rewetting cycles alter carbon and nitrogen mineralization in litter-amended alpine wetland soil[J]. *Catena*, 2016, 145:285-290.
- [15] 张梦瑶, 高永恒, 谢青琰. 干湿交替对土壤有机碳矿化影响的研究 进展[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(1):17-23.
  ZHANG Meng-yao, GAO Yong-heng, XIE Qing-yan. Effects of alternate drying and wetting on soil organic carbon mineralization: A review
  [J]. World Sci Tech R&D, 2017, 39(1):17-23.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.

LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Bei-

jing: China Agricultural Science Press, 2000.

[17] 李振高, 骆永明, 滕 应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京:科学出版社, 2008.
 LI Zhen-gao, LUO Yong-ming, TENG Ying. Biological indicator of

soil quality: A review[M]. Beijing: Science Press, 2008.

- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005 BAO Shi-dan. Analysis of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [19] Lang M, Zucong C, Chang S X, et al. Effects of land use type and incubation temperature on greenhouse gas emissions from Chinese and Canadian soils[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2011, 11(1):15–24.
- [20] Leitner S, Saronjic N, Kobler J, et al. Impact of repeated dry-wet cycles on soil greenhouse gas emissions, extracellular enzyme activity and nutrient cycling in a temperate forest[J]. *Geophysical Research Ab*stracts, 2014, 16:12753.
- [21] 田亚男,张水清,林 杉,等.外加碳氮对不同有机碳土壤 N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>排放的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(12):2410-2417.
  TIAN Ya-nan, ZHANG Shui-qing, LIN Shan, et al. Effects of different carbon nitrogen on soil organic carbon N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2410-2417.
- [22] Chen R, Ng CWW. Impact of wetting-drying cycles on hydro-mechanical behavior of an unsaturated compacted clay[J]. Applied Clay Science, 2013, 86(8):38-46.
- [23] Tang C S, Cui Y J, Shi B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1):111-118.
- [24] Fraser F C, Corstanje R, Deeks L K, et al. On the origin of carbon dioxide released from rewetted soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101:1–5.
- [25] 李彬彬, 马军花, 武兰芳. 土壤溶解性有机物对 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的 影响[J]. 生态学报, 2014, 34(16):4690-4697.
  LI Bin-bin, MA Jun-hua, WU Lan-fang. Effects of dissolved organic matter in soil on the emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16):4690-4697.
- [26] 秦纪洪, 黄雪菊, 陈 蓓, 等. 干湿交替格局对川西南干热河谷土 壤碳氮释放的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3):250-254. QIN Ji-hong, HUANG Xue-ju, CHEN Bei, et al. Impacts of drying and rewetting patterns on release of soil organic carbon and nitrogen of the dry-hot valley in the southwest of Sichuan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3):250-254.
- [27] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(2):302-311.
- [28] 李晓密, 伦小秀, 陈 琪, 等. 不同施肥处理下冬小麦-夏玉米轮作农田温室气体的排放[J]. 环境化学, 2014(4):591-596.
  LI Xiao-mi, LUN Xiao-xiu, CHEN Qi, et al. Greenhouse gas emission from a winter wheat-summer maize crop rotation farmland under different fertilization treatments[J]. *Environment Chemistry*, 2014(4): 591-596.
- [29] 王永生, 张爱平, 刘汝亮, 等. 优化施氮对宁夏引黄灌区稻田 CO<sub>2</sub>、 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1218-

2090

1224.

WANG Yong-sheng, ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, et al. Effects of optimized N fertilization on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes in paddy fields in Yellow River water irrigation region of Ningxia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1218-1224.

- [30] Li Y F, Jiang P K, Liu J, et al. Effect of fertilization on water-soluble organic C, N and emission of greenhouse gases in the soil of phyllostachys edulis stands[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(12):165– 170.
- [31] 王 苑, 宋新山, 王 君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2014(2):342-350.
  WANG Yuan, SONG Xin-shan, WANG Jun, et al. Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014(2):342-350.
- [32] 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.
- [33] Yemadje P L, Chevallier T, Guibert H, et al. Wetting-drying cycles do not increase organic carbon and nitrogen mineralization in soils with straw amendment[J]. *Geoderma*, 2016, 15(10):68-75.
- [34] Beare M H, Gregorich E G, St-Georges P, et al. Compaction effects on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production during drying and rewetting of soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(3):611-621.
- [35] 刘学华. 干湿交替下土壤 C、N 养分流失机理研究[D]. 上海:东华大学, 2015.

LIU Xue-hua. Mechanism of soil C, N nutrient losses during wetting

and drying processes[D]. Shanghai : Donghua University, 2015.

- [36] 王 明. 干湿交替驱动下土壤微生物量及 N<sub>2</sub>O 变化规律[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
  WANG Ming. Microbial biomass and N<sub>2</sub>O emission as affected by the soil drying and re-wetting events[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [37]朱 霞,韩晓增,乔云发,等.外加可溶性碳氮对不同热量带土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2637-2644.
  ZHU Xia, HAN Xiao-zeng, QIAO Yun-fa, et al. Influence of soluble carbon and nitrogen on N<sub>2</sub>O emission from different thermal zones soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12):2637-2644.
- [38] 李 鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化 亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1):99-104.
  LI Xin, JU Xiao-tang, ZHANG Li-juan, et al. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1):99-104.
- [39] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D, et al. Drying and re-wetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40:302–311.
- [40] 唐玉姝, 魏朝富, 颜廷梅, 等. 土壤质量生物学指标研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(2):157-163.

TANG Yu-shu, WEI Chao-fu, YAN Ting-mei, et al. Biological indicator of soil quality: A review[J]. *Soils*, 2007, 39(2):157-163.

[41] Schimel J, Balser T C, Wallenstein M, et al. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function[J]. *Ecology*, 2007, 88(6):1386-1394.