

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0051

张亚捷,牛海山.农田土壤氧化亚氮产生机制和相关模型研究进展[J].生态与农村环境学报,2019,35(5):554-562.

ZHANG Ya-jie, NIU Hai-shan. Research Development on Generation Mechanism and Related Models of N<sub>2</sub>O Emissions From Agricultural Soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 554-562.

## 农田土壤氧化亚氮产生机制和相关模型研究进展

张亚捷, 牛海山<sup>①</sup> (中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)作为一种重要的温室气体,在大气中浓度不断上升,对环境的潜在破坏性也逐渐加强。农田土壤是N<sub>2</sub>O的重要产生源,其排放量约占全球N<sub>2</sub>O排放总量的70%。土壤中硝化、反硝化、硝化微生物反硝化和硝态氮异化还原成铵等作用作用是N<sub>2</sub>O生成的主要过程。在阐述土壤N<sub>2</sub>O产生机制的基础上,详述了预测农田土壤N<sub>2</sub>O排放模型如DNDC、WNMM、DAYCENT和Ecosys等机制过程模型模拟农田土壤N<sub>2</sub>O排放的机制及在相关研究中所取得的最新成果;并就农田土壤N<sub>2</sub>O排放模型的未来研究重点和方向进行探讨和展望,认为当前模型在机制和参数选择等方面仍有待改进并应更广泛地用于区域模拟。研究农田N<sub>2</sub>O产生机制并发展相应模型,对于预测、减少农田N<sub>2</sub>O排放,维护生态平衡等都具有十分重要的科学意义。

**关键词:** 氧化亚氮; 农田土壤; 产生机制; 机制过程模型

**中图分类号:** S153; X16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2019)05-0554-09

**Research Development on Generation Mechanism and Related Models of N<sub>2</sub>O Emissions From Agricultural Soil.**

ZHANG Ya-jie, NIU Hai-shan<sup>①</sup> (College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is one of the major greenhouse gasses. In atmosphere, the concentration of N<sub>2</sub>O is increasing sharply. Agricultural soil is a major source of N<sub>2</sub>O emissions, accounted for approximately 70% of total global anthropogenic emissions. Nitrification, denitrification, nitrifier denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium are the main N<sub>2</sub>O generation processes. Based on clarifying of the N<sub>2</sub>O generation mechanisms, the development and research status of the process-based mechanism models [including denitrification-decomposition (DNDC), water and nitrogen management model (WNMM), DAYCENT and ecosystem model (Ecosys)] for N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soil were reviewed and summarized. Some key issues that should be paid more attention in the future studies on the N<sub>2</sub>O emission simulation for agricultural soils, including the model mechanism improvement, parameter adjustment and enhancement of the regional simulation ability. Research on the cropland N<sub>2</sub>O generation mechanism and related models is meaningful to predict and mitigate the N<sub>2</sub>O emissions and maintain the ecological balance.

**Key words:** nitrous oxide; agricultural soil; generation mechanism; mechanism process model

氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)作为重要的大气温室效应气体之一,其在大气中浓度的不断增加将会导致气候变暖等全球性的环境问题<sup>[1-2]</sup>。与二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和甲烷(CH<sub>4</sub>)等温室气体相比,N<sub>2</sub>O在大气中存留时间长,达110~150 a,且具有较强的增温潜势,1分子N<sub>2</sub>O的潜在增温效应是1分子CO<sub>2</sub>的298倍<sup>[1-3]</sup>。N<sub>2</sub>O在大气中虽以痕量存在,但在过去100 a中,其对温室效应的贡献已达5%~10%。政府间气候变化专门委员会(IPCC)在最新报告中指出,2011年人类活动造成的辐射强迫已达2.29 W·m<sup>-2</sup>,其中N<sub>2</sub>O排放造成的辐射强迫为0.17 W·m<sup>-2</sup>;大气中N<sub>2</sub>O体积分数也已升至0.324 μL·L<sup>-1</sup>,为80万年以来最高值,且以

每年近0.3%的速率增长,预计到2050年将达到0.35~0.40 μL·L<sup>-1</sup><sup>[3-4]</sup>。由于N<sub>2</sub>O较强的增温效应在大气中所起的重要作用,N<sub>2</sub>O浓度变化必将对全球生态环境产生极大影响。在造成N<sub>2</sub>O浓度增加的众多来源中,农田土壤是全球最主要的N<sub>2</sub>O排放源。当前全球农田土壤N<sub>2</sub>O的年均排放量(以氮计)高达6.4×10<sup>12</sup> g,约占全球N<sub>2</sub>O排放总量的25%<sup>[5-6]</sup>。因此,在当今气候变化背景下,研究农田土壤田土壤

收稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501803)

① 通信作者E-mail: niuhs@ucas.ac.cn

$N_2O$  排放已成为环境科学领域重要课题,引起学者广泛关注。近年来国内外已有大量关于农田土壤  $N_2O$  排放和相应模型发展的研究报道,笔者将以此为基础综合评述农田土壤  $N_2O$  产生机制及相关模型的发展,以期深入了解农田土壤  $N_2O$  排放机制,并为发展相关模型提供理论依据。

## 1 农田土壤 $N_2O$ 主要产生机制

农田土壤是  $N_2O$  的主要产生源。硝化作用(包括自养硝化和异养硝化)、反硝化作用(包括微生物自养反硝化、微生物异养反硝化和化学反硝化)、硝

化细菌反硝化和硝态氮异化还原成铵作用等都能产生  $N_2O$ 。其中,土壤微生物主导的以铵态氮( $NH_4^+-N$ )为反应底物的硝化作用(主要指自养硝化)、以硝态氮( $NO_3^- - N$ )为反应底物的反硝化作用(主要指微生物异养反硝化)和硝化细菌反硝化作用是土壤  $N_2O$  产生的最基本途径(图1)。

作为硝化作用的副产物和反硝化作用的中间产物,  $N_2O$  在此过程中的产生量约占生物圈释放到大气中  $N_2O$  总量的 70%~90%<sup>[7-9]</sup>。硝酸盐异化还原成铵作用也伴有  $N_2O$  的释放;但在自然条件下,此过程中  $N_2O$  产生量基本可以忽略<sup>[10-11]</sup>。

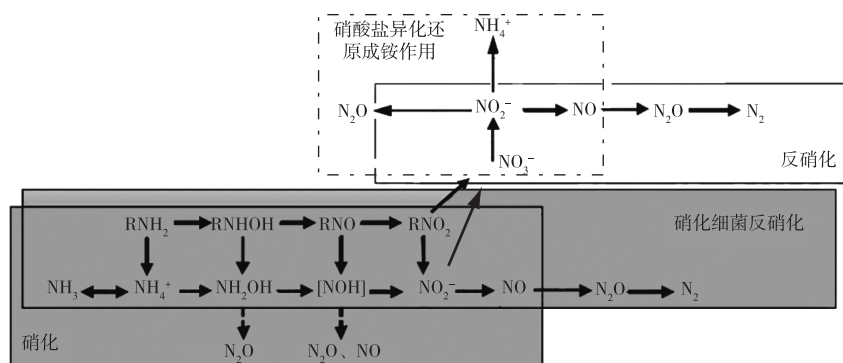


图1  $N_2O$  在土壤中的生成与转化<sup>[10-11]</sup>

Fig. 1 Formation of  $N_2O$  in soil as part of the soil nitrogen cycle

硝化作用指在好气条件下,土壤中硝化微生物将  $NH_4^+-N$ 、 $NH_3$  或含氮有机化合物( $RNH_2$ )等氧化为硝酸盐的过程,包括自养硝化作用和异养硝化作用,自养硝化作用下微生物以  $CO_2$  为碳源、以  $NH_4^+$  (或  $NH_3$ ) 氧化释放的化学能为能源,而异养硝化作用下微生物以有机碳为碳源和能源<sup>[11]</sup>。且与自养硝化作用不同,异养硝化作用的底物既可以是无机氮也可以是有机氮。其中,自养硝化过程为  $NH_4^+ \rightarrow NH_2OH \rightarrow [NOH] \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ 。而异养硝化过程包括:(1)以无机氮为反应底物:  $NH_4^+ \rightarrow NH_2OH \rightarrow [NOH] \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ ; (2)以有机氮为反应底物:  $RNH_2 \rightarrow RNHOH \rightarrow RNO \rightarrow RNO_2 \rightarrow NO_3^-$ <sup>[11-13]</sup>。通常条件下,异养硝化过程产生  $N_2O$  仅占土壤  $N_2O$  总排放量的很小部分,仅在特定环境条件下(如低 pH 值、高氧气含量和高有机碳含量等),异养硝化过程会产生大量  $N_2O$ <sup>[11]</sup>。硝化过程主要产物为  $NO_2^-$  和  $NO_3^-$ , 同时伴有微量  $N_2O$ 、 $NO$  等含氮气体。

反硝化作用指在厌氧条件下,  $NO_3^-$  或  $NO_2^-$  被还原为气态氮( $N_2$ 、 $NO$  和  $N_2O$ )的过程:  $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ , 可分为生物反硝化和化学反硝化

2类。在微生物作用下的生物反硝化作用又可根据反应所需能源的不同分为异养反硝化和自养反硝化2类<sup>[11]</sup>。其中,异养反硝化是微生物利用  $NO_3^-$  作为电子受体氧化有机化合物获得能量的过程;而自养反硝化则是微生物利用  $NO_3^-$  作为电子受体氧化无机化合物如  $S^{2-}$ 、 $Fe^{2+}$  和  $Cu^{2+}$  等的过程<sup>[11-13]</sup>。异养反硝化是比自养反硝化更重要的产生  $N_2O$  的途径。化学反硝化则指  $NO_2^-$  自身的化学分解或与其他物质的化学反应作用,反应主要受  $NO_2^-$  积累、土壤 pH、有机质含量和还原态金属离子浓度等因素影响,产物主要为  $NO_x$ 、 $N_2O$  和  $N_2$ 。化学反硝化通常只在酸性或酸化土壤中才被认作是  $N_2O$  的一个重要产生源<sup>[11]</sup>。一般而言,反硝化作用的最终产物是  $N_2$ , 但反硝化细菌会因为缺少某些相关还原酶而只能完成反硝化过程中的某些步骤,因而在反硝化过程中常伴有  $N_2O$  的产生,产生的  $N_2O$  总量远远多于硝化过程<sup>[12]</sup>。尽管反硝化过程是一个还原过程,但在结构良好的好气土壤中,反硝化作用依然可以发生<sup>[14]</sup>。

在硝态氮异化还原过程中,除以气态氮化物为

主要产物的反硝化作用外,还有以  $\text{NH}_4^+$  为终产物的硝态氮异化还原成铵(dissimilatory nitrate reduction to ammonium, DNRA)作用。DNRA 作用生成  $\text{N}_2\text{O}$  排放量占施氮量的 1%~8%<sup>[10]</sup>。仅在某些特定条件下(如高 pH 值、高 C/N 比和厌氧环境),硝态氮异化还原成铵作用会在土壤氮素转化过程中起较重要作用<sup>[11]</sup>。

硝化微生物反硝化作用同样也是  $\text{N}_2\text{O}$  产生的主要机制之一,指在低氧条件下仅在硝化微生物驱动下,  $\text{NO}_2^-$  被还原为  $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{N}_2$  的过程。该过程分为 2 个阶段:第 1 阶段是将  $\text{NH}_4^+$  ( $\text{NH}_3$ ) 氧化成  $\text{NO}_2^-$ , 第 2 阶段是将  $\text{NO}_2^-$  还原为  $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{N}_2$ ; 整个过程中没有  $\text{NO}_3^-$  生成,且仅由氨氧化细菌这类微生物参与<sup>[11-12]</sup>。高  $\text{NH}_4^+$ -N(或  $\text{NH}_3$ ) 含量、低有机碳和  $\text{O}_2$  含量以及低 pH 值环境更有利于硝化细菌进行反硝化。

## 2 预测农田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的机制过程模型

在农业生态系统中,土壤  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体的产生是一个复杂的过程。在气候、土壤、现行耕作制度和农业管理措施等诸多条件下,任何因子的微小变化都可能改变土壤  $\text{N}_2\text{O}$  产生及排放。由于这些因子存在地域差异,因此,建立一个受气候、土壤和农业管理措施综合影响的农田温室气体排放模型尤为重要。在明确农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放机制的基础上,根据模型建立方法的不同,可将  $\text{N}_2\text{O}$  排放模型分为经验统计模型和机制过程模型 2 类<sup>[15-16]</sup>。其中,机制过程模型是以土壤  $\text{N}_2\text{O}$  产生机制为基础,认为  $\text{N}_2\text{O}$  的排放主要来源于以土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 含量为基础、受控于  $\text{O}_2$  含量和水分状况等因素的硝化和反硝化作用<sup>[15-16]</sup>。气候、土壤、作物和农业等因子通过相互作用影响土壤硝化和反硝化作用,继而得到用数学公式表达的相关物理、化学和生物过程中的氮循环过程,以此模拟土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放。机制过程模型的模拟过程复杂,所需参数较多,用于点位模拟时准确度较高;用于区域模拟时,可探索不同土地利用方式和管理方式对温室气体排放的影响,继而因地制宜地制定合理高效的减排措施<sup>[17-21]</sup>。

当前,用来估算农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放并得到广泛应用的机制过程模型主要包括 DNDC(denitrification-decomposition)、WNMM(water and nitrogen management model)、DAYCENT 和 Ecosys(ecosystem model) 模型等。各模型的氮循环过程类似,但侧重点不

同,使得各模型  $\text{N}_2\text{O}$  占硝化反应的比例、反硝化  $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$  或  $\text{N}_2\text{O}/\text{NO}/\text{N}_2$  的产生来源、硝化和反硝化作用临界状态的  $\text{O}_2$  含量和水分状况等一些基本参数设定有所不同,这也使得各模型  $\text{N}_2\text{O}$  排放量模拟结果不同,应用和适用范围也各异<sup>[17]</sup>(表 1<sup>[15,17,22-31]</sup>)。当前国外对于机制过程模型的研究较多,我国尚没有自主开发的机制过程模型。

### 2.1 DAYCENT 模型

DAYCENT 模型是 Century 模型的衍生模型,所涵子模块包括作物生长模块,作物残留和土壤有机质分解模块,土壤含水量和温度模块,痕量气体模块等,主要输入参数包括每日天气变化、土壤属性以及当前和历史土地利用方式等,可用于模拟土壤-大气-植物碳氮循环相关的主要过程,包括作物生长、水分运移、热量流动、有机碳分解、氮素矿化和固定作用、硝化作用和反硝化作用以及甲烷氧化作用等<sup>[22]</sup>(图 2)。

DAYCENT 模型可用于模拟各种自然生态系统和人为管理下的农业系统中  $\text{N}_2\text{O}$  排放等,在世界范围内尤其是欧美一些国家得到广泛应用,被用于预测不同土地利用方式或管理措施下农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放,取得了较好的模拟效果<sup>[32-34]</sup>。

我国学者应用 DAYCENT 模型的研究相对较少。有研究探讨了 DAYCENT 模型用于预测农田系统不同管理模式下的温室气体减排潜力,并对不同管理模式旱作农业系统和稻作系统的产量和温室气体排放量进行模拟<sup>[35]</sup>。CHENG 等<sup>[36]</sup>则采用国内 350 处农田实验数据以验证 DAYCENT 模型并预测中国农田生态系统在不同土地管理模式下的温室气体减排潜力,结果表明,降低土壤有机质含量、控制氮肥施用和减少翻耕次数可大幅减少雨养农业生态系统下温室气体排放量。

### 2.2 Ecosys 模型

Ecosys 模型由加拿大阿尔伯达大学的 GRANT 等人开发,可用来模拟不同陆地生态系统下的生态行为,是一个较复杂的数学模型<sup>[37]</sup>。该模型包括 7 个子模型,主要用以模拟水、热、碳、氧和氮等在土壤-大气-植物界面下的迁移转化过程,在模拟过程中同时兼顾土壤管理措施对这些过程的影响<sup>[38]</sup>。该模型需输入参数较多,主要有气候、土壤层、土壤属性、详细的作物信息和管理措施(施肥、耕作、灌溉、播种和收获)等。

表 1 预测农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的机制过程模型简介

Table 1 Introduction of major N<sub>2</sub>O simulation models at the field scale

模型名称	特征	时间步长	氮循环过程和产物	模型模拟 N <sub>2</sub> O 来源	硝化过程主要控制因子	硝化过程中 N <sub>2</sub> O 排放过程
DAYCENT	主要用以模拟土壤-大气-植物碳氮循环,要求输入数据较少,突出水分含量为控制模型进程的关键因子,在模拟 N <sub>2</sub> O 排放方面显得相对简单	1 d	包括矿化、固定、氨挥发、硝化、反硝化和硝态氮淋溶等过程;产物包括 NH <sub>3</sub> 、NO、N <sub>2</sub> O 和 N <sub>2</sub>	硝化过程和反硝化过程	土壤 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 浓度、水分含量、温度、pH、土壤质地和 O <sub>2</sub> 含量等	遵循第一动力学反应,受水分含量影响较大,发生的最佳土壤充水孔隙度(WFPS)为 55% 左右;一般设定 N <sub>2</sub> O 占硝化作用总产物的比例为 2%
Ecosys	主要用以模拟水、热、碳、氧、氮等在土壤-大气-植物界面间的迁移转化过程,为微生物数学模型。模型认为微生物群落分布受营养元素、作物根系、真菌等影响;所需参数和模型结构复杂,但机制性较强,适用范围广,在任何空间或时间尺度上模拟 N <sub>2</sub> O 排放的能力均较强	1 s~100 a	包括矿化、固定、氨挥发、硝化、反硝化和硝态氮淋溶等过程;产物包括 NH <sub>3</sub> 、N <sub>2</sub> O 和 N <sub>2</sub>	硝化过程和反硝化过程	碳、氮、磷等营养元素,根系吸收及真菌等控制的微生物群落分布状况等	遵循硝化细菌动力学,以此控制由铵氧化生成 N <sub>2</sub> O 的排放比例;没有设定 N <sub>2</sub> O 占硝化作用的比例
WNMM	主要用以模拟不同农业管理模式下水分迁移、溶质运动及碳氮循环等过程,针对旱地作物开发,适用于干旱半干旱气候条件;结构较简单,所需输入参数少,但数据格式要求为地理信息系统条件下的格点数据;侧重于水肥管理措施对 N <sub>2</sub> O 排放的影响	1 d	包括矿化、固定、氨挥发、硝化、反硝化和硝态氮淋溶等过程;产物包括 NH <sub>3</sub> 、N <sub>2</sub> O 和 N <sub>2</sub>	硝化过程和反硝化过程,且这 2 个过程的界限取决于土壤水分状况	土壤 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 浓度、pH、WFPS 和土壤温度等	采用一级动力学方程进行描述,并设定硝化作用产 N <sub>2</sub> O 的比例为 0.1%~0.5%
DNDC	除能同时模拟 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放过程外,还能定量评估作物产量和氮素淋失等过程。要求输入数据相对较多,模型过程明确;适用范围广,便于改造或适用于其他用途的综合模型;是在农业 N <sub>2</sub> O 排放上应用最广泛的模型	1 d	包括矿化、固定、氨挥发、硝化、反硝化和硝态氮淋溶等过程;产物包括 NH <sub>3</sub> 、NO、N <sub>2</sub> O 和 N <sub>2</sub>	硝化过程和反硝化过程	土壤属性、温度、湿度、pH 和 Eh 等环境因子以及分解过程中产生的可溶性有机碳(DOC)和 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	遵循硝化细菌动力学和厌氧球理论,设定 N <sub>2</sub> O 占硝化作用总产物的比例为 0.25%

模型名称	反硝化过程主要控制因子	反硝化过程中 N <sub>2</sub> O 排放过程	N <sub>2</sub> O 在土壤中扩散过程	模拟作物种类	其他	来源文献
DAYCENT	土壤 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度、水分含量、活性碳含量和土壤质地等	NO、N <sub>2</sub> O 和 N <sub>2</sub> 的分配比例受 WFPS 和第一动力学反应控制。当 WFPS 达到临界值时发生反硝化反应,随着 WFPS 增加反硝化速率变大,当水分达到饱和状态后则趋于平缓	由土壤质地决定	可模拟多数主要作物类型如玉米、小麦、水稻、大豆、苜蓿、高粱和棉花等		[15, 17, 22-24]
Ecosys	O <sub>2</sub> 含量和营养物质来源等	由反硝化细菌驱动	动力扩散	无特定作物种类		[15, 17, 25-27]
WNMM	土壤 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度、WFPS 和 DOC	假定反应只发生在距地表以下 20 cm 的土壤范围内,产物 NO、N <sub>2</sub> O 和 N <sub>2</sub> 的分配比例受 WFPS 和第一动力学反应影响,不同土壤质地启动反硝化作用所需的 WFPS 数值不同,且假定反硝化作用产 N <sub>2</sub> O 的比例为 1%	气体从发生层到地表的扩散采用 DNDC 模型中所描述的方法,扩散过程中主要受到黏粒含量、WFPS 和土壤温度的影响	可模拟玉米、小麦、花生、大豆和水稻等作物	在模型的最新版本中,土壤 N <sub>2</sub> O 排放除选择自身相关模块进行模拟外,亦可采用其他模型方法(如 DNDC 或 DAYCENT 模型所采用的经验方法和 FAS-SET 模型方法等)进行模拟	[15, 17, 28-29]
DNDC	土壤属性、温度、湿度、pH 和 Eh 等环境因子以及分解过程中产生的 DOC 和 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	当降水、淹田和灌溉或低温事件(气温低于 -5 ℃)发生时反硝化作用得以触发,且由反硝化细菌动力学和厌氧球理论驱动,氮可按一定比例直接转化为 N <sub>2</sub> O	应用空隙扩散方程,根据土壤属性、含水量、温度和黏粒含量等来计算土壤各层 N <sub>2</sub> O 的扩散速率	可模拟 63 种作物	模型发展了厌氧球理论,即设定硝化作用和反硝化作用发生的比例由土壤 O <sub>2</sub> 含量决定,将土壤分为厌氧和非厌氧 2 个部分,跟踪土壤 O <sub>2</sub> 的扩散和消耗,厌氧球体积也随之发生变化,当底物位于厌氧球范围内(即厌氧区域)时进行反硝化作用,反之则进行硝化作用	[15, 17, 30-31]

Ecosys 模型结构复杂,模拟过程繁琐,模拟时间尺度从 1 s 到 100 a,模拟空间尺度从 1 mm 到 1 km,适用范围广,结果也较准确<sup>[39-40]</sup>。但由于 Ecosys 模型主要为微生物数学模型,模拟过程所需参数较多,因此该模型应用受到诸多条件限制,目前仅在加拿大等国家应用较多,多用于模拟在不同空间尺度上施肥农田 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[41-42]</sup>。当前,我国尚未开展有关 Ecosys 模型的研究。

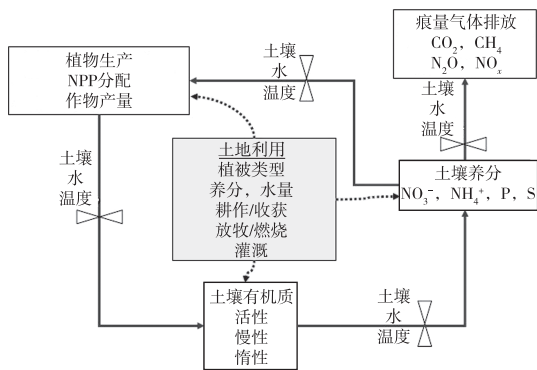


图 2 DAYCENT 模型中的碳氮收支平衡<sup>[23-24]</sup>  
Fig. 2 The balance of carbon and nitrogen in DAYCENT model

### 2.3 WNMM 模型

WNMM 模型即农业水氮管理模型,由澳大利亚墨尔本大学 Li Yong 与中国科学院南京土壤研究所张佳宝等人共同开发,用于模拟不同农业管理模式(灌溉、耕作和施肥等)水分迁移、溶质运动、作物生长和碳氮循环等过程<sup>[28,43]</sup>(图 3)。WNMM 模型适用于干旱半干旱气候条件下的旱地作物开发,结构较为简单,所需输入参数较少,着重于水肥管理措施对温室气体排放的影响,主要应用于澳大利亚和中国等国家<sup>[15,44]</sup>。

WNMM 模型在国际和国内的应用多集中在不同气候条件及农业管理措施下的农田 N<sub>2</sub>O 等温室气体排放及作物产量的相关研究上,且均取得了较好的模型拟合结果<sup>[15]</sup>。LI 等<sup>[45-46]</sup>在澳大利亚西部雨养麦田中应用 WNMM 模型研究了不同氮肥施用所引发的 N<sub>2</sub>O 排放变化,并提出了适用于当地农业生产的 N<sub>2</sub>O 减排措施。在国内相关研究中,WNMM 模型被用于模拟青藏高原陆地生态系统 N<sub>2</sub>O 排放总量,发现硝化作用造成了绝大部分 N<sub>2</sub>O 排放损失<sup>[47]</sup>。在发展的新的含氮气体排放子模型后,WNMM 还可用于模拟中国亚热带茶田 N<sub>2</sub>O 排放损失,发现反硝化作用为主要 N<sub>2</sub>O 排放来源<sup>[48]</sup>。

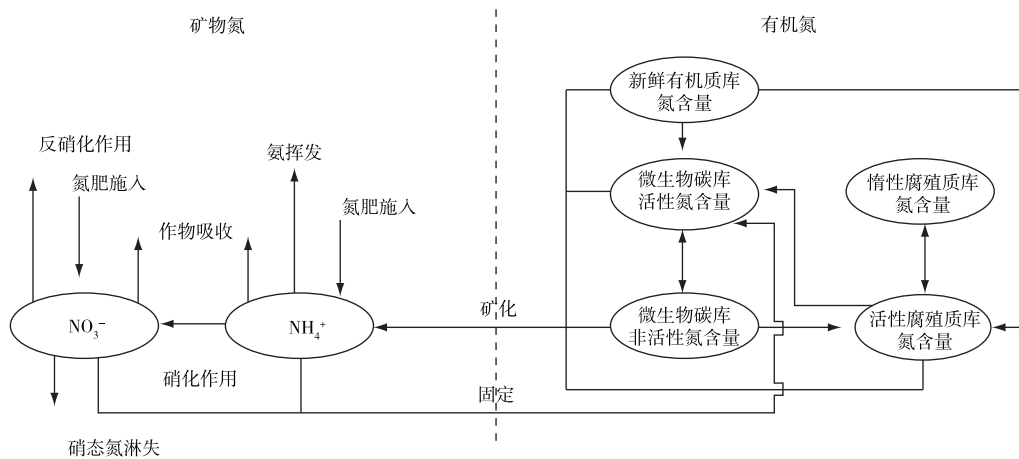


图 3 WNMM 模型在农田系统中的氮循环示意<sup>[44]</sup>  
Fig. 3 Diagram of nitrogen cycling in soil-crop system in WNMM

### 2.4 DNDC 模型

DNDC 模型由美国新罕布什尔州大学陆地海洋空间研究中心李长生等人研发,最初被用来模拟美国农业土壤 N<sub>2</sub>O 排放。模型输入参数主要包括气象条件、土壤属性、植被和农田管理措施等 4 个方面。在研发初期, DNDC 模型包括土壤气候过程子模型、有机质分解过程子模型和反硝化作用子模型 3 个子

模型,并对植物生长过程子模型和土地管理利用方式进行解释<sup>[31]</sup>。随后, DNDC 模型增加了利用土壤氧化还原电位模拟发酵过程的子模型并进一步修正了 N<sub>2</sub>O 等气体排放的模拟过程等,逐渐发展为现在的 DNDC 模型<sup>[49]</sup>(图 4)。

DNDC 模型在模拟 N<sub>2</sub>O 排放方面的应用非常广泛。各国研究者应用 DNDC 模型模拟不同作物管理

模式下农业土壤 N<sub>2</sub>O 等温室气体排放,取得了较好拟合效果,并发现 N<sub>2</sub>O 排放对施肥时机、施肥频率、肥料类型、施肥方式和使用硝化抑制剂(或脲酶抑制剂)等因素都非常敏感<sup>[50-51]</sup>。我国学者也应用 DNDC 模型做了大量相关工作。起初, DNDC 模型被应用于贵州省农业土壤 N<sub>2</sub>O 排放研究中,初步论述了我国亚热带旱田生态系统 N<sub>2</sub>O 排放特征及影响

因素,揭示并讨论了施肥和耕作措施变化等对该地区农业土壤 N<sub>2</sub>O 排放量的潜在影响<sup>[52]</sup>。近些年,关于 DNDC 模型的研究重点则逐渐集中在不同研究区农业生态系统下 N<sub>2</sub>O 等温室气体的排放机制和减排措施,发现合理的水肥管理系统能有效减少 N<sub>2</sub>O 排放; DNDC 模型还被广泛应用于碳氮循环模拟研究中,拟合效果均较理想<sup>[53-54]</sup>。

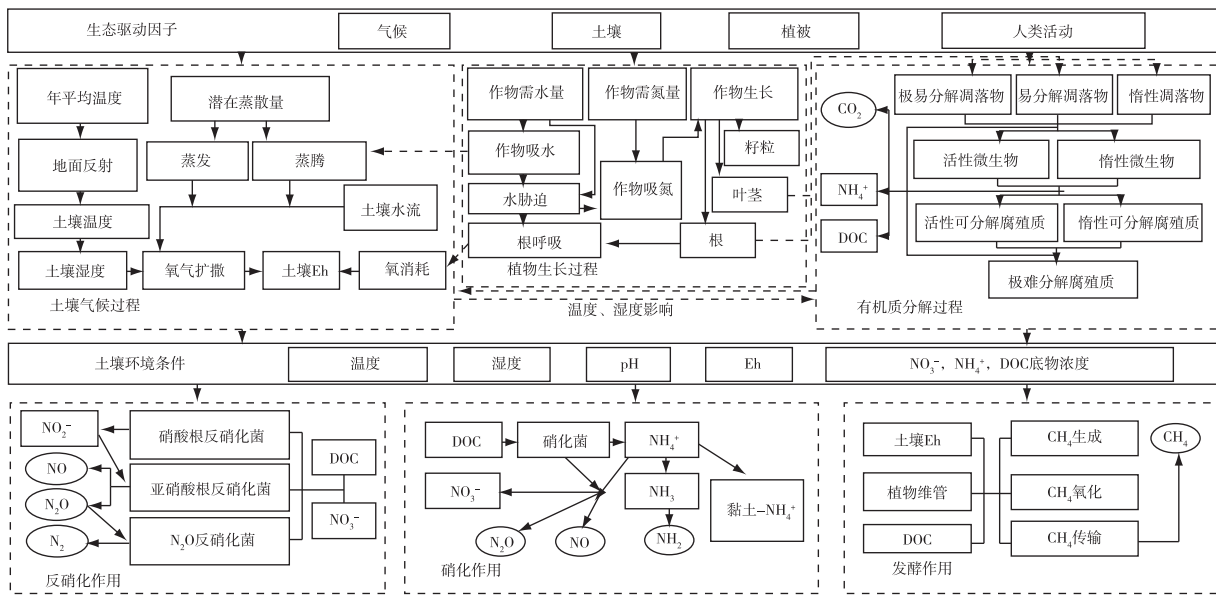


图4 DNDC模型结构<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Structure of DNDC model

适用于中国特有农业生态系统的 China-DNDC 也在不断发展中。China-DNDC 修改土壤水氮运移过程的缺省参数,引入地表径流曲线和修正的通用土壤流失方程来控制模拟地表径流,还加入有关薄膜覆盖管理模式的参数化模块,并补充种养结合的相关子模型。这些改动提升了模型在中国主要农业生态系统及生产管理模式下应用的能力,并取得了理想的模拟效果<sup>[55-56]</sup>。与其他模型相比, DNDC 模型适用环境范围广(旱地和水田等),模拟过程明确,模拟效果好,便于改造成适用于其他各种用途的综合模型;且在利用 GIS 技术进行区域 N<sub>2</sub>O 排放模拟时, DNDC 模型优势更明显<sup>[18, 57-58]</sup>。

### 3 结论与展望

近年来大气中 N<sub>2</sub>O 浓度呈不断上升趋势,其引发的环境问题已成为当今重要的全球性课题。N<sub>2</sub>O 主要来源于土壤尤其是农田土壤。随着土壤 N<sub>2</sub>O 产生机制研究的不断深入,影响农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的相关模型研究也在发展,研究广度和深度在不断加

强。机制过程模型可有效模拟陆地生化循环中的碳氮时空动态;但不同模型有着不同的物理生化过程,这也使各模型模拟 N<sub>2</sub>O 等温室气体排放过程时表现出一定差异。在实际应用中,使用者应根据研究目的和数据可用性来选择模型。针对当前研究现状,还应加强以下几方面的探索:

在 N<sub>2</sub>O 产生机制研究方面,应更多采用新的工具和技术(如同位素技术、宏基因组学等),加强土壤微环境碳氮循环机制与微生物群落参与的 N<sub>2</sub>O 产生与消耗过程的研究,尤其应加强硝化细菌反硝化和硝态氮异化还原成铵过程的相关研究<sup>[10-11, 59]</sup>。

在模型开发和应用相关研究上,应重视以下方面:(1)模型模拟 N<sub>2</sub>O 排放机制研究中,普遍只考虑硝化和反硝化作用对 N<sub>2</sub>O 排放的贡献;对硝化细菌反硝化和硝态氮异化还原成铵过程的模拟研究工作应继续深入开展。(2)作物修剪、病虫害发生和杂草生长等影响农作物生长并作用于土壤 N<sub>2</sub>O 排放的相关模块仍有待开发和改进。(3)模型中有关农田管理措施的描述应更详尽,这将有助于探索更有效

的土壤 $N_2O$ 减排措施(如施用控释肥料,肥料深施或混施,应用滴灌等节水灌溉技术,应用秸秆还田和秸秆覆盖技术以及使用硝化抑制剂等)<sup>[5,8,60-61]</sup>。(4)在中国,还应加强其他 $N_2O$ 排放模拟模型(或模拟 $N_2O$ 排放的作物模型)相关研究,如NOE(the algorithm of nitrous oxide emission)、NGAS、Expert-N、NLOSS、STICS(simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard)和DSSAT(decision support system for agrotechnology transfer)等模型<sup>[62-67]</sup>。与 $N_2O$ 排放相关的以上模型的对比研究可参见文献[68-69]。在对这些模型的研究基础上,可更多采用多模型结合的方法估算农田土壤 $N_2O$ 排放,以提高预测的可靠性与准确性<sup>[70-71]</sup>。(5)在未来研究中,可用模型估算区域、国家乃至全球农田土壤 $N_2O$ 排放总量,进一步研究不同气候条件、土壤条件和农田管理措施等对农田土壤 $N_2O$ 排放的影响,这将有助于决策者制定更加合理有效的温室气体减排措施,维持农业稳定发展<sup>[1,72-73]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] TIAN H Q, CHEN G S, LU C Q, *et al.* Global Methane and Nitrous Oxide Emissions From Terrestrial Ecosystems Due to Multiple Environmental Changes [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(1):1-20.
- [2] SIGNOR D, CERRI C E P. Nitrous Oxide Emissions in Agricultural Soils: A Review [J]. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 2013, 43(3):322-338.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [R]. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: C2, C6, C8, 159-254, 473-552, 677-731.
- [4] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5):722-732. [HUANG Yao. Emissions of Greenhouse Gases in China and Its Reduction Strategy [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5):722-732. ]
- [5] REAY D S, DAVIDSON E A, SMITH K A, *et al.* Global Agriculture and Nitrous Oxide Emissions [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2:410-416.
- [6] DAVIDSON E A, KANTER D. Inventories and Scenarios of Nitrous Oxide Emissions [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(10):105012. DOI:10.1088/1748-9326/9/10/105012.
- [7] ZHU X, BURGER M, DOANE T A, *et al.* Ammonia Oxidation Pathways and Nitrifier Denitrification Are Significant Sources of  $N_2O$  and NO Under Low Oxygen Availability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(16):6328-6333.
- [8] BENCKISER G, SCHARTEL T, WEISKE A. Control of  $NO_3^-$  and  $N_2O$  Emissions in Agroecosystems: A Review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3):1059-1074.
- [9] ZHU-BARKER X, CAVAZOS A R, OSTROM N E, *et al.* The Importance of Abiotic Reactions for Nitrous Oxide Production [J]. *Biogeochemistry*, 2015, 126(3):251-267.
- [10] 杨杉, 吴胜军, 蔡延江, 等. 硝态氮异化还原机制及其主导因素研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(5):1224-1232. [YANG Shan, WU Sheng-jun, CAI Yan-jiang, *et al.* The Synergetic and Competitive Mechanism and the Dominant Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction Processes: A Review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(5):1224-1232. ]
- [11] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤 $N_2O$ 和NO产生机制研究进展[J]. *土壤*, 2012, 44(5):712-718. [CAI Yan-jiang, DING Wei-xin, XIANG Jian. Mechanisms of Nitrous Oxide and Nitric Oxide Production in Soils: A Review [J]. *Soils*, 2012, 44(5):712-718. ]
- [12] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 $N_2O$ 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, 35(2):792-800. [ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, *et al.* Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):792-800. ]
- [13] 林存刚. 硝化与反硝化作用对农田土壤 $N_2O$ 排放的贡献[D]. 重庆:西南大学, 2006. [LIN Cun-gang. Contributions of Nitrification & Denitrification to Emission of Nitrous Oxide in Farmland Soil [D]. Chongqing: Southwest University, 2006. ]
- [14] JIA W L, LIANG S, ZHANG J, *et al.* Nitrous Oxide Emission in Low-Oxygen Simultaneous Nitrification and Denitrification Process: Sources and Mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136:444-451.
- [15] 刘运通. 华北春玉米土壤 $N_2O$ 减排措施研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2011. [LIU Yun-tong. Mitigation Options for  $N_2O$  Emissions From Spring Maize Soil in North China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. ]
- [16] 廖千家骅, 颜晓元. 农业土壤氧化亚氮排放模型研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5):817-825. [LIAO Qian-jiahua, YAN Xiao-yuan. Models of  $N_2O$  Emissions From Agricultural Fields: A Review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):817-825. ]
- [17] THOMAS A R C, BOND A J, HISCOCK B K M. A Multi-Criteria Based Review of Models That Predict Environmental Impacts of Land Use-Change for Perennial Energy Crops on Water, Carbon and Nitrogen Cycling [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(3):227-242.
- [18] 郭佳伟, 邹元春, 霍莉莉, 等. 生物地球化学过程模型DNDC的研究进展及其应用[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2):571-580. [GUO Jia-wei, ZOU Yuan-chun, HUO Li-li, *et al.* DNDC Model, a Model of Biogeochemical Processes: Research Progress and Applications [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2):571-580. ]
- [19] PTER C, FIORE A, HAGEMANN U, *et al.* Improving the Accounting of Field Emissions in the Carbon Footprint of Agricultural Products: A Comparison of Default IPCC Methods With Readily Available Medium-Effort Modeling Approaches [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(6):791-805.

- [20] XU X F, TIAN H Q, HUI D F. Convergence in the Relationship of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O Exchanges Between Soil and Atmosphere Within Terrestrial Ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1651–1660.
- [21] CHEN Z M, DING W X, LUO Y Q, *et al.* Nitrous Oxide Emissions From Cultivated Black Soil: A Case Study in Northeast China and Global Estimates Using Empirical Model[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(11): 1311–1326.
- [22] PARTON W J, MOSIER A R, OJIMA D S, *et al.* Generalized Model for N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O Production From Nitrification and Denitrification [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(3): 401–412.
- [23] PARTON W J, HARTMAN M, OJIMA D, *et al.* DAYCENT and Its Land Surface Submodel: Description and Testing [J]. *Global and Planetary Change*, 1998, 19(1/2/3/4): 35–48.
- [24] PARTON W J, HOLLAND E A, DEL GROSSO S J, *et al.* Generalized Model for NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O Emissions From Soils [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D15): 17403–17419.
- [25] GRANT R F, NYBORG M, LAIDLAW J W. Evolution of Nitrous Oxide From Soil: I. Model Development [J]. *Soil Science*, 1993, 156(4): 259–265. DOI: 10. 1097/00010694–199310000–00006.
- [26] GRANT R F, NYBORG M, LAIDLAW J W. Evolution of Nitrous Oxide From Soil: II. Experimental Results and Model Testing [J]. *Soil Science*, 1993, 156(4): 266–277. DOI: 10. 1097/00010694–199310000–00007.
- [27] GRANT R F. Mathematical Modeling of Nitrous Oxide Evolution During Nitrification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(9): 1117–1125.
- [28] LI Y, CHEN D L, ZHANG Y M, *et al.* Comparison of Three Modeling Approaches for Simulating Denitrification and Nitrous Oxide Emissions From Loam-Textured Arable Soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(3): GB3002. DOI: 10. 1029/2004GB002392.
- [29] LI Y, WHITE R, CHEN D L, *et al.* A Spatially Referenced Water and Nitrogen Management Model (WNMM) for (Irrigated) Intensive Cropping Systems in the North China Plain [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 203(3/4): 395–423.
- [30] LI C S, ABER J, STANGE F, *et al.* A Process Oriented Model of N<sub>2</sub>O and NO Emissions From Forest Soils: I. Model Development [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D4): 4369–4384.
- [31] LI C S. Modeling Trace Gas Emissions From Agricultural Ecosystems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/2/3): 259–276.
- [32] SCHEER C, DEL GROSSO S J, PARTON W J, *et al.* Modeling Nitrous Oxide Emissions From Irrigated Agriculture: Testing DayCent With High-Frequency Measurements [J]. *Ecological Applications*, 2014, 24(3): 528–538.
- [33] ÁLVARO-FUENTES J, ARRUE, J L, BIELSA A, *et al.* Simulating Climate Change and Land Use Effects on Soil Nitrous Oxide Emissions in Mediterranean Conditions Using the Daycent Model [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 238: 78–88.
- [34] ABDALLA M, JONES M, YELURIPATI J, *et al.* Testing DayCent and DNDC Model Simulations of N<sub>2</sub>O Fluxes and Assessing the Impacts of Climate Change on the Gas Flux and Biomass Production From a Humid Pasture [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(25): 2961–2970.
- [35] 程琨. 农田减缓气候变化潜力的统计计量与模型模拟[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. [CHENG Kun. Quantification and Model Simulation of Climate Change Mitigation Potential of China's Cropland[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.]
- [36] CHENG K, OGLE M S, PARTON W J, *et al.* Simulating Greenhouse Gas Mitigation Potentials for Chinese Croplands Using the DAYCENT Ecosystem Model [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 948–962.
- [37] GRANT R F. Mathematical Modeling of Nitrous Oxide Evolution During Nitrification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(9): 1117–1125.
- [38] GRANT R F. A Review of the Canadian Ecosystem Model Ecosystem [M]//SHAFFER M. Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management. Florida: CRC Press, 2001: 175–264.
- [39] GRANT R F, JUMA N G, MCGILL W B. Simulation of Carbon and Nitrogen Transformations in Soil: Mineralization Biomass and Metabolic Products [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(10): 1331–1338.
- [40] GRANT R F, JUMA N G, ROBERTSON J A, *et al.* Long-Term Changes in Soil Carbon Under Different Fertilizer, Manure, and Rotation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(1): 205–214.
- [41] GRANT R F, PATTEY E. Modeling Variability in N<sub>2</sub>O Emissions From Fertilized Agricultural Fields [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(2): 225–243.
- [42] METIVIER K A, PATTEY E, GRANT R F. Using the Ecosystem Mathematical Model to Simulate Temporal Variability of Nitrous Oxide Emissions From a Fertilized Agricultural Soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2370–2386.
- [43] LI Y. A Spatially Referenced Model for Identifying Optimal Strategies for Managing Water and Fertilizer Nitrogen Under Intensive Cropping in the North China Plain [D]. Melbourne: University of Melbourne, 2002.
- [44] LI Y, WHITE R, CHEN D L, *et al.* A Spatially Referenced Water and Nitrogen Management Model (WNMM) for (Irrigated) Intensive Cropping Systems in the North China Plain [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 203(3/4): 395–423.
- [45] LI Y, LOUISE B, CHEN D L, *et al.* Simulating Response of N<sub>2</sub>O Emissions to Fertiliser N Application and Climatic Variability From a Rain-Fed and Wheat-Cropped Soil in Western Australia [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(5): 1130–1143.
- [46] LI Y, WANG W J, STEVEN R, *et al.* Simulation of N<sub>2</sub>O Emissions and Mitigation Options for Rain-Fed Wheat Cropping on a Vertisol in the Subtropics [J]. *Soil Research*, 2013, 51(2): 152–166.
- [47] DU Y G, GUO X W, CAO G M, *et al.* Simulation and Prediction of Nitrous Oxide Emission by the Water and Nitrogen Management Model on the Tibetan Plateau [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2016, 65: 49–56.
- [48] CHEN D, LI Y, WANG C, *et al.* Measurement and Modeling of Nitrous and Nitric Oxide Emissions From a Tea Field in Subtropi-

- cal Central China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107(2):157-173.
- [49] 李长生. 生物地球化学的概念与方法:DNDC模型的发展[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 89-99. [LI Chang-sheng. Biogeochemical Concepts and Methodologies: Development of the DNDC Model[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(2):89-99. ]
- [50] ABALOS D, SMITH W N, GRANT B B, *et al.* Scenario Analysis of Fertilizer Management Practices for N<sub>2</sub>O Mitigation From Corn Systems in Canada[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573:356-365.
- [51] UZOMA K C, SMITH W, GRANT B, *et al.* Assessing the Effects of Agricultural Management on Nitrous Oxide Emissions Using Flux Measurements and the DNDC Model[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 206:71-83.
- [52] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 应用DNDC模型估算区域农业土壤N<sub>2</sub>O释放通量和释放量:以贵州省为例[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 11-15. [XU Wen-bing, HONG Ye-tang, CHEN Xu-hui, *et al.* DNDC Model Estimates of N<sub>2</sub>O Emission From Regional Agricultural Soils: A Guizhou Province Case Study[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(2):11-15. ]
- [53] 侯会静, ABUDU Shalamu, 陈慧, 等. 水稻控制灌溉下华东稻麦轮作农田N<sub>2</sub>O排放模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 185-191. [HOU Hui-jing, ABUDU Shalamu, CHEN Hui, *et al.* Simulation of N<sub>2</sub>O Emission From Rice-Wheat Rotation Field Under Controlled Irrigation of Rice in Southeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47(12):185-191. ]
- [54] WU X R, ZHANG A. Comparison of Three Models for Simulating N<sub>2</sub>O Emissions From Paddy Fields Under Water-Saving Irrigation [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 98:500-509.
- [55] LI H, WANG L G, LI J Z, *et al.* The Development of China-DNDC and Review of Its Applications for Sustaining Chinese Agriculture [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 348:1-13.
- [56] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. DNDC模型在中国的改进及其应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2760-2770. [XIE Hai-kuan, JIANG Yu-qian, LI Hu, *et al.* Modification and Application of the DNDC Model in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8):2760-2770. ]
- [57] WU X R, ZHANG A. Comparison of Three Models for Simulating N<sub>2</sub>O Emissions From Paddy Fields Under Water-Saving Irrigation [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 98:500-509.
- [58] POHLERT T, HUISMAN J A, BREUER L, *et al.* Integration of a Detailed Biogeochemical Model Into SWAT for Improved Nitrogen Predictions: Model Development, Sensitivity, and GLUE Analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 203(3/4):215-228.
- [59] XIONG Z Q, KHALIL M A K, XING G, *et al.* Isotopic Signatures and Concentration Profiles of Nitrous Oxide in a Rice-Based Ecosystem During the Drained Crop-growing Season[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(G2). DOI:10.1029/2008JG000827.
- [60] 郭树芳, 齐玉春, 董云社, 等. 滴灌对农田土壤CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O产生与排放的影响研究进展[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2757-2763. [GUO Shu-fang, QI Yu-chun, DONG Yun-she, *et al.* Response of Production and Emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O of Agricultural Soil to Drip Irrigation [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11):2757-2763. ]
- [61] RUSER R, SCHULZ R. The Effect of Nitrification Inhibitors on the Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O) Release From Agricultural Soils: A Review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(2):171-188.
- [62] HENAULT C, BIZOUARD F, LAVILLE P, *et al.* Predicting *in Situ* Soil N<sub>2</sub>O Emission Using NOE Algorithm and Soil Database [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(1):115-127.
- [63] PARTON W J, MOSIER A R, OJIMA D S, *et al.* Generalized Model for N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O Production From Nitrification and Denitrification[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(3):401-412.
- [64] KAHARABATA S K, DRURY C F, PRIESACK E, *et al.* Comparing Measured and Expert-N Predicted N<sub>2</sub>O Emissions Form Conventional Till and No Till Corn Treatments [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66(2):107-118.
- [65] RILEY W J, MATSON P A. NLOSS: A Mechanistic Model of Denitrified N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> Evolution From Soil [J]. *Soil Science*, 2000, 165(3):237-249.
- [66] BRISSON N, GARY C, JUSTES E, *et al.* An Overview of the Crop Model STICS [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 309-332.
- [67] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, *et al.* The DS-SAT Cropping System Model [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4):235-265.
- [68] CHEN D L, LI Y, GRACE P, *et al.* N<sub>2</sub>O Emissions From Agricultural Lands: A Synthesis of Simulation Approaches [J]. *Plant and Soil*, 2008, 309(1/2):169-189.
- [69] BRILLI L, BECHINI L, BINDI M, *et al.* Review and Analysis of Strengths and Weaknesses of Agro-Ecosystem Models for Simulating C and N Fluxes [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598:445-470.
- [70] ZHANG W, LIU C Y, ZHENG X H, *et al.* Comparison of the DNDC, LandscapeDNDC and IAP-N-GAS Models for Simulating Nitrous Oxide and Nitric Oxide Emissions From the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System [J]. *Agricultural Systems*, 2015, 140:1-10.
- [71] GAILLARD R K, JONES C D, INGRAHAM P, *et al.* Underestimation of N<sub>2</sub>O Emissions in a Comparison of the DayCent, DNDC, and EPIC Models [J]. *Ecological Applications*, 2018, 28(3): 694-708.
- [72] PERLMAN J, HIJMANS R J, HORWATH W R. A Metamodelling Approach to Estimate Global N<sub>2</sub>O Emissions From Agricultural Soils [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(8):912-924.
- [73] DEL GROSSO S J, OJIMA D S, PARTON W J, *et al.* Global Scale DAYCENT Model Analysis of Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Strategies for Cropped Soils [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1/2):44-50.

作者简介: 张亚捷(1990—), 男, 河南新乡人, 博士生, 主要从事生态学方面的研究。E-mail: zhangyajie1990@yeah.net

(责任编辑: 王昌群)