中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

设施菜地土壤氮素运移及淋溶损失模拟评价

雷豪杰，李贵春，丁武汉，徐驰，王洪媛，李虎

引用本文:
雷豪杰, 李贵春, 丁武汉, 等. 设施菜地土壤氮素运移及淋溶损失模拟评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 38–52.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200570

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下水位波动对不同施氮量农田土壤硝态氮运移影响

Effects of groundwater fluctuation on nitrate nitrogen transport after nitrogen application in cropland soil

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 154–162 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200707

减水减肥对设施黑土菜田磷素累积与淋溶的影响

The effect of reduced irrigation and chemical fertilizers on phosphorus accumulation and leaching in Mollisol vegetable fields

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 119–127 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200462

施氮量对潮土区冬小麦–夏玉米轮作农田氮磷淋溶的影响

Effects of nitrogen application on nitrogen and phosphorus leaching in fluvo–aquic soil on a winter wheat–summer maize rotation farmland

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 29–37 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200548

褐土区农田土壤氮磷淋溶特征及其管理措施

Effects of field management practices on nitrogen and phosphate leaching in the cinnamon soil area of China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 163–175 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200576

不同水肥措施下华北露地菜地氮淋溶特征

The effects of water and fertilizer practices on nitrogen leaching in open–field vegetable soil in North China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 176–186 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200533

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 1 月 第 29 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2021, 29(1): 38−52

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200570

雷豪杰, 李贵春, 丁武汉, 徐驰, 王洪媛, 李虎. 设施菜地土壤氮素运移及淋溶损失模拟评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 38−52

LEI H J, LI G C, DING W H, XU C, WANG H Y, LI H. Modeling nitrogen transport and leaching process in a greenhouse vegetable field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 38−52

设施菜地土壤氮素运移及淋溶损失模拟评价*

雷豪杰[1], 李贵春[2], 丁武汉[1], 徐 驰[1], 王洪媛[1], 李 虎[1**]

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 北京 100081)

摘 要: 设施菜地因大水大肥管理方式导致的氮素淋失已成为当前关注焦点。探寻氮素淋失阻控技术需要首先探明土壤中 NO_3^--N 的运移和淋失过程, 找到淋失阻控的关键点, 从而实现蔬菜栽培高产量低环境成本。本研究以京郊设施菜地黄瓜-番茄轮作系统为研究对象, 通过田间试验获取土壤温度、湿度、NO_3^--N 含量等数据, 对反硝化-分解(DNDC)模型进行参数校验, 并以农民常规种植模式为基线情景, 设置改变土壤基础性质、灌溉量、施氮量等不同情景, 运用 DNDC 模型对设施菜地系统土壤氮素运移及淋溶损失进行定量评价。结果表明: 经验证后的 DNDC 模型能够较好地模拟蔬菜产量、5 cm 土壤温度和 0~20 cm 土壤孔隙含水率变化以及 NO_3^--N 的迁移过程, 是模拟和评价氮素运移和损失的有效工具。模拟不同情景表明, 设施菜地 0~60 cm 土壤 NO_3^--N 累积主要受灌溉水量和氮肥施入量的影响, 此外土壤 pH 和土壤有机碳的变化也是影响 NO_3^--N 运移的重要因子。节水节肥是设施菜地氮素淋失减量的最有效方法, 相比常规措施, 同时减少 20%灌溉量和 20%施氮量可明显降低 59.04%的 NO_3^--N 淋失量。同时, 在节水节肥的基础上改变灌溉方式并提高 20%土壤有机碳含量, 在保证蔬菜产量的前提下, 能够进一步降低 69.04%的 NO_3^--N 淋失量。可见, DNDC 模型为设施菜地 NO_3^--N 淋失评价和阻控提供了一个较好的解决方案。在当前重点关注减氮节水等管理措施的同时, 提高土壤本身的质量, 不失为一种更有效的减少设施菜地氮素淋失的途径。

关键词: 设施菜地; 氮淋失; 水氮控制; 土壤有机碳; DNDC 模型

中图分类号: S19 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Modeling nitrogen transport and leaching process in a greenhouse vegetable field*

LEI Haojie[1], LI Guichun[2], DING Wuhan[1], XU Chi[1], WANG Hongyuan[1], LI Hu[1**]

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Nitrogen (N) leaching is caused by the mismanagement of water and fertilizer in greenhouse vegetable fields. Understanding N movement and leaching process is important for achieving high crop yields at low environmental costs. A field

* 国家重点研发计划项目(2018YFD0800402, 2016YFD0800101)和国家自然科学基金项目(41671303)资助

** 通信作者: 李虎, 主要研究方向为农业资源利用与区划。E-mail: lihu0728@sina.com
雷豪杰, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环。E-mail: haojielink@126.com

收稿日期: 2020-07-14 接受日期: 2020-09-15

* This study was supported by the National Key Research and Development Program (2018YFD0800402, 2016YFD0800101) and the National Natural Science Foundation of China (41671303).

** Corresponding author, E-mail: lihu0728@sina.com

Received Jul. 14, 2020; accepted Sep. 15, 2020

experiment was conducted for a greenhouse cucumber-tomato rotation system in the suburbs of Beijing, China. The DeNitrification-DeComposition (DNDC) model was used to quantitatively evaluate the soil N transport and leaching loss in the facility vegetable field after considering factors obtained from field experiments, such as soil temperature, humidity, and nitrate nitrogen (NO_3^--N) content. Conventional practices were selected as the baseline scenario, and the modeled scenarios, such as changes in soil properties, irrigation, and N application, were set according to the baseline. The results showed that the DNDC model can better simulate the vegetable yield, 5 cm soil temperature, 0–20 cm soil water-filled pore space, and NO_3^--N migration process, indicating that it is an effective tool for simulating and evaluating N transport and leaching in vegetable field soil. The modeling scenarios showed that the accumulation of NO_3^--N in the 0–60 cm soil was primarily affected by the irrigation amount and N application; soil pH and organic carbon were also important factors affecting NO_3^--N migration. Increasing irrigation amount significantly accelerated the downward movement of NO_3^--N , and increasing N application promoted the accumulation of NO_3^--N at the surface and a depth of 20 cm. Increasing soil pH lessened NO_3^--N surface accumulation; and to a certain extent, increasing soil organic carbon delayed the downward movement of NO_3^--N. Controlling water and fertilizer was the most effective method for mitigating N leaching. Compared with conventional measures, reducing irrigation and N application simultaneously by 20% significantly reduced NO_3^--N leaching by 59.04%. Changing irrigation method and increasing soil organic carbon content by 20% (to save water and fertilizer) further reduced NO_3^--N leaching by 69.04%. The DNDC model is a useful method for evaluating and controlling NO_3^--N leaching in vegetable fields. Changing management practices, such as N and water amounts as the soil quality improves, may be an effective way to reduce N leaching in vegetable fields.

Keywords: Facility vegetable field; Nitrogen leaching; Water and nitrogen control; Soil organic carbon; DNDC model

我国是世界设施菜地生产第一大国。2019 年设施菜地面积近 4.000×10^6 hm^2。按照当前平均增长率 1.25%计算, 2021 年预计将达到 4.133×10^6 hm^2。为了追求高产量, 设施菜地普遍采用“大水大肥”的管理模式, 化肥投入量可高达 4088 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ [1], 而平均氮肥利用率仅为 18.6%[2], 导致地下水污染而威胁人类健康[3-6]。此外, NO_3^--N 的表聚现象也导致土壤表层 pH 最低, 不断积累的 NO_3^--N 最终导致土壤酸化、次生盐渍化,土壤肥力降低[7]。滕艳敏等[8]对不同蔬菜种植模式土壤淋溶水的长期定位试验研究表明, 两茬蔬菜总氮淋失量为 137.02~184.93 $kg\cdot hm^{-2}$, 其地下水中 NO_3^--N 含量明显高于粮食作物系统[9]。巨晓棠等[10]对山东寿光集约化蔬菜种植区地下水的监测结果显示, 80 多个样品中有 29%硝酸盐含量超过欧盟标准(50 $mg\cdot L^{-1}$), 且超标率在 3 年后增至 49%。而另一项对北京菜田浅层地下水的调查结果显示, 43 个抽样地超标率达 100%, NO_3^--N 平均含量为 72.42 $mg\cdot L^{-1}$[11]。可见, NO_3^--N 的累积和淋失已成为当前集约农区面临的重大农业和生态环境问题。

土壤氮素的淋失以 NO_3^--N 为主要形态, 分别占淋溶和径流总氮流失量的 66.31%和 73.33%[12-13], 土壤中 NO_3^--N 的累积和运移是造成氮素淋失的关键前提条件。在设施菜地系统中, 蔬菜的根系较浅, 土壤深层的 NO_3^--N 无法被有效吸收利用。又因为 NO_3^--N 自身带负电, 不易被土壤胶体吸附, 当施氮量大于作物吸收和土壤固持能力, 土壤剖面中大量 NO_3^--N 在足够重力水的驱动下势必会向深层运移。酸性环境下, NO_3^--N 脱去的氧易与 H^+结合生成水, 削弱了 NO_3^--N 的运移。而在弱碱性土壤中, NO_3^--N 的氧化性受到抑制, 较高含量的 NO_3^--N 增加了土壤中运移风险[14]。在 NO_3^--N 向下运移的过程中, 当灌溉量较小时其集聚范围仅在 0~20 cm 土层, 灌溉量过大时开始向土壤深层聚集[15], 且随着灌溉频率和单次灌溉量的增加, NO_3^--N 的垂向运移更明显[16]。另外, 在水平方向上, 当滴灌施肥时 NO_3^--N 易随着滴头附近湿润区水分的扩散而在土体横向运移, 导致 NO_3^--N 随施肥次序在湿润区边缘不断累积[17]。说明土壤中 NO_3^--N 的运移不仅受土壤环境和水文过程控制, 还受作物和管理措施的影响[14,18-19]。而设施菜地系统又属密闭环境, 加之过高的化肥和灌溉水投入量, 使之长期处于高温、高湿环境, 微生物活跃、有机氮矿化能力强使得 NO_3^--N 在土壤的运移情况更加复杂, 淋失风险极高。但目前设施菜地土壤中 NO_3^--N 的累积和运移机理尚不清晰, 仅通过有限数量的田间原位试验定量研究土壤中氮素的运移和淋失过程是远远不够的。因此, 如何正确评估 NO_3^--N 淋失过程对土壤氮素淋失阻控具有重要意义, 更是当前面临的

一大科学难题。近年来，过程模型被越来越多地用来模拟农业生态系统中管理措施对碳和氮循环的影响[20-21]，成为定量化模拟研究氮素淋失过程的重要手段。DNDC(DeNitrification-DeComposion)模型具有同时结合土壤水分运动与氮素生物地球化学过程的优点，已成为各国科学家研究碳氮循环重点关注的模型，并在多个国家得到了改进和校正[22-24]。朱波等[25]利用 DNDC 模型模拟的氮素淋失量结果实测值和模拟值相关系数达 0.972。Li 等[26]对 DNDC 模型进行参数修正后，能够更好地模拟农田土壤氮淋溶。前人对土壤氮素淋失开展的研究多集中于粮食作物系统[3-4,13,18]，对设施菜地系统关注不够，且结合模型研究氮素淋失规律的更少，对设施菜地系统氮素淋失机理的揭示还不充分。本研究应用 DNDC 模型模拟设施菜地土壤 NO_3^--N 累积和运移过程，利用田间观测数据检验和本土化 DNDC 模型，针对土壤氮素运移的影响因素，设置不同的情景模式，利用模型定量评价输入参数变化对土壤氮素运移的影响，明确影响设施菜地土壤氮素运移和淋失的关键因子，为设施菜地氮素淋失阻控技术的研究提供数据支撑和科学指导，具有重要的现实和科学意义。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地位于北京市顺义区大孙各庄镇(116°28′E, 40°00′N)，属暖温带半湿润大陆性季风气候区，四季分明，年平均气温 11.5 ℃，年平均降水量 625 mm，年相对湿度 50%。供试试验田为普通半拱圆形设施大棚(75 m×7 m)。土壤质地为潮褐土，起始土壤的 NO_3^--N 含量为 195.47 mg(N)·kg^{-1}，NH_4^+-N 2.15 mg(N)·kg^{-1}，有机质 14.31 g·kg^{-1}，pH 为 7.19。大棚棚面为无色透明塑料棚膜，膜上盖有棉被，顶部和低端设有通风口，以控制温室内的温度和湿度。

1.2 试验设计与数据获取

试验种植模式为黄瓜(*Cucumis sativus* L.)-番茄(*Solanum lycopersicum* L.)轮作，设计农民习惯漫灌施肥处理(FP)和滴灌施肥处理(FPD)，各处理均有 3 个重复，每个小区 24 m^2，小区间用隔离带(塑料布埋深 1 m，长 6 m)隔开。试验中有机肥为羊粪(N 2.03%)，氮肥为尿素(N 46%)，磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 18%)，钾肥为硫酸钾(K_2O_5 2%)。供试黄瓜品种为‘中农 12’，2017 年 9 月 13 日移栽，同年 12 月 28 日拉秧。供试番茄品种为‘超杂 32’，移栽日期为 2018 年 3 月 16 日，同年 7 月 16 日拉秧。各处理肥料施用量和灌溉水用量如表 1 所示。

表 1 模型输入的黄瓜-番茄轮作不同处理的施肥和灌溉管理数据

Table 1 Input data of model of fertilization and irrigation management for different treatments of facility cucumber-tomato rotation

处理 Treatment	施肥量 Fertilization rate (kg·hm^{-2})				灌溉水量 Irrigation amount (mm)	灌溉次数及日期(月/日) Irrigation frequency and date (month/day)
	有机肥 Organic fertilizer	N	P_2O_5	K_2O		
漫灌施肥 Flood irrigation and fertilization (FP)	1300	1450	320	500	772	黄瓜季 Cucumber season: 5; 9/13, 10/12, 11/1, 11/20, 12/4
滴灌施肥 Drip fertigation (FPD)	1300	1450	320	500	555	番茄季 Tomato season: 5; 3/16, 4/15, 5/12, 5/27, 6/12

1.3 样品采集与测定

黄瓜季和番茄季实际产量均在成熟期每次摘果时按小区记录，拉秧后汇总产量。利用田间原装渗漏计收集土壤 90 cm 深度的水样，用连续流动分析仪测定 NO_3^--N 浓度。土壤溶液提取器安装在每个小区，位于根系以下(表土层下 60 cm 处)。为了保证陶瓷吸盘部分与土壤之间合适的液体压力，陶瓷吸盘被安装在一个直径相当的孔中，然后用原土填充提取器与土壤之间的孔隙。在整个观测期，每次灌溉后提取土壤溶液。在定植前、拉秧后及作物生长的关键期利用土钻采集 1 m 土样，取部分土样与 1 mol·L^{-1} KCl 溶液按水土比 1∶5 混合振荡 1 h，收集过滤液并利用连续流动分析仪测定 NO_3^--N 的浓度。另外，同步测定 0~5 cm 深度的土壤温度，利用 Trim-IPH 测定 0~15 cm 土壤水分。

1.4 DNDC 简介及模型验证方法

DNDC(反硝化-分解)模型主要用来模拟农业生态系统中碳氮循环[27-28]。模型主要分为两部分，一部分是将气候、土壤、植被和人类活动等生态驱动因子与温度、湿度、pH、底物浓度等土壤环境因子连接起来，另一部分连接生物地球化学过程。DNDC 模型通过结合作物生长曲线、作物生理过程和环境因素(例如辐射、气温、土壤湿度和可利用氮素)对作物生长进行模拟[29]。通过气候子模型，DNDC 模型能够实现对土壤水分动态的准确模拟；可以模拟出 0~1 m 深度土壤剖面的氮素淋溶特征，

其中包括 0~0.5 m 根系生长区和 0.5~1.0 m 非根系生长区。Li 等[27-28,30]已经对 DNDC 模型模拟氮素淋溶过程应用到的水文学方程和参数等进行了详细叙述。本研究使用 DNDC 9.5 版本进行氮素的运移和淋溶模拟。

在 DNDC 模型应用之前需要进行验证。采用模拟值与观测值之间标准化的均方根误差(RMSE)验证 DNDC 模型的模拟效果，计算公式如下:

$$\mathrm{RMSE}=\frac{100}{\bar{O}}\sqrt{\frac{\sum_i\left(P_i-O_i\right)^2}{n}} \tag{1}$$

式中: P_i 表示模拟值, O_i 表示观测值, n 表示观测值的个数，$\bar{O}$ 表示观测值的均值。RMSE 值趋近于 0，说明模拟值和观测值越接近，模型模拟效果越好。RMSE<10%，模拟值与预测值一致性非常好，10%~30%为较好，>30%则效果一般。DNDC 模型检验的初始输入参数如表 2 所示。其中，作物生理参数由田间试验或者模型默认值确定，其余参数均由田间实测获得。

表 2　用来模拟蔬菜生长的生理学参数及 DNDC 输入参数(测量值和模型默认值)

Table 2　Parameters used for simulating vegetable growth and general description of DNDC input data (measured on site and default)

参数 Parameter		黄瓜 Cucumber	番茄 Tomato
目标产量 Max. biomass production [kg(C)·hm^{-2}]		560	1660.68
成熟时生物量分配比例 Biomass fraction at harvest (%)	果 Grain	0.65	0.36[a]
	叶 Leaf	0.15	0.22[a]
	茎 Stem	0.15	0.22[a]
	根 Root	0.05	0.2[a]
成熟时 C/N 比值 C/N ratio at harvest	果 Grain	12	26[a]
	叶 Leaf	11.97	26[a]
	茎 Stem	11.33	26[a]
	根 Root	25	45[a]
生长积温 Thermal degree days for maturity (℃)		1000	1400
需水量 Water demand [g(water)·g^{-1}(DM)]		500	300
土壤表层有机碳 Surface soil organic carbon content [kg(C)·kg^{-1}]		0.0143	
田间持水量 Field capacity (soil water-filled pore space, WFPS)		0.67	
土壤质地 Soil texture		粉壤土 Silt loam	
黏粒含量 Clay fraction		0.20	
容重 Soil bulk density (g·cm^{-3})		1.29	
萎蔫点 Soil WFPS at wilting point		0.16	
孔隙度 Porosity		0.65	

上标 a 表示 DNDC 模型默认值。Superscript “a” indicates the default value of DNDC model.

1.5　情景设置及敏感性分析

为了更好地研究不同水氮管理措施对土壤表层 NO_3^--N 累积以及淋失的影响，本研究以农民常规处理为基准情景，运用独立参数扰动法，选择土壤性质、施氮量和灌溉量等 8 个参数设置不同的情景，进行单因素模拟试验，即每次模拟只改变 1 个参数。每个参数的输入范围选择其基值的±20%，模拟不同情景设置下 0~50 cm 土层 NO_3^--N 累积量的运移过程，模拟情景设置如表 3 所示。

根据模拟结果对输入参数的响应程度计算敏感性指数 S (sensitive index)，以敏感性指数来评价模拟结果受不同情景输入参数的影响程度，其计算公式如下:

$$S=\frac{\left(O_2-O_1\right)/O_{12}}{\left(I_2-I_1\right)/I_{12}} \tag{2}$$

式中: I_2、I_1 和 I_{12} 分别为输入参数的最大值、最小值和平均值, O_2、O_1 和 O_{12} 为对应模拟输出结果的最大值、最小值和平均值。S 值越大说明模拟结果受输入参数的影响程度越大。在本研究中, S 值越大说明土壤 NO_3^--N 累积受输入参数影响程度越大。

1.6　数据处理

模型对田间观测的 NO_3^--N 淋失量是以日为时间步长进行模拟的，而田间实际收集量为对应阶段的累计量。因此，需要将模型的模拟结果分别进行累加。采用 Excel 2016、Origin 2017 等软件对试验数据进行计算和制图。

2 结果与分析

2.1 DNDC 模型的校验

2.1.1 对设施菜地土壤温度、土壤孔隙含水率的模拟与验证

DNDC 模型对设施菜地系统 5 cm 土壤温度和 0~20 cm 土壤孔隙含水率变化模拟结果如图 1 所示。DNDC 模型能够较好地模拟出 5 cm 土壤温度和 0~20 cm 土壤土壤孔隙含水率的动态变化过程。整个轮作周期内, FP 和 FPD 处理 5 cm 土壤温度的变化范围分别为 11.78~28.60 ℃和 12.47~30.27 ℃, 模拟值与实测值均达显著相关(P<0.05), 皮尔逊相关系数分别为 0.829 和 0.836, DNDC 模型能够较好地模拟出 5 cm 土壤温度随季节气温先下降后回升的变化过程。5 cm 土壤温度和 0~20 cm 土壤孔隙含水率模

表 3 不同土壤基础性质和管理措施下的情景设置

Table 3 Scenario setting of different soil basic properties and management practices

项目 Item	情景名称 Scenario name	描述 Description	单位 Unit	值 Value
土壤基础性质 Basic soil properties	壤沙土, 粉壤土, 沙黏壤土 Loamy sand, silt loam, sand clay loam	土壤质地为壤沙土, 粉壤土, 沙黏壤土 The soil texture is loamy sand, silt loam, and sandy clay loam	—	—
	pH×0.8, pH 基线, pH×1.2 pH×0.8, pH baseline, pH×1.2	降低/提高 20%的土壤 pH 基线 Decrease or increase the soil pH baseline by 20%	—	5.75, 7.19, 8.63
	土壤有机碳含量(SOC)×0.8, SOC, SOC×1.2 Soil organic carbon content (SOC) ×0.8, SOC baseline, SOC×1.2	降低/提高 20%的土壤 SOC 基线 Decrease or increase the soil SOC baseline by 20%	$kg(C)\cdot kg^{-1}$	0.0114, 0.0143, 0.0172
管理措施 Management measures	施氮量×0.8, 施肥量基线, 施氮量×1.2 Nitrogen application rate × 0.8, nitrogen application rate baseline, nitrogen application rate × 1.2	降低/提高 20%的施氮量基线 Decrease or increase the nitrogen application rate baseline by 20%	$kg(N)\cdot hm^{-2}$	1160, 1450, 1740
	灌溉量×0.8, 灌溉量基线, 灌溉量×1.2 Irrigation water volume × 0.8, irrigation water volume baseline, irrigation water volume × 1.2	降低/提高 20%的灌溉量基线 Reduce or increase the irrigation baseline by 20%	mm	617.8, 772.3, 926.8
	漫灌, 滴灌 Flood irrigation, drip irrigation	灌溉方式分别为漫灌和滴灌 Irrigation methods are flood irrigation and drip irrigation	—	—

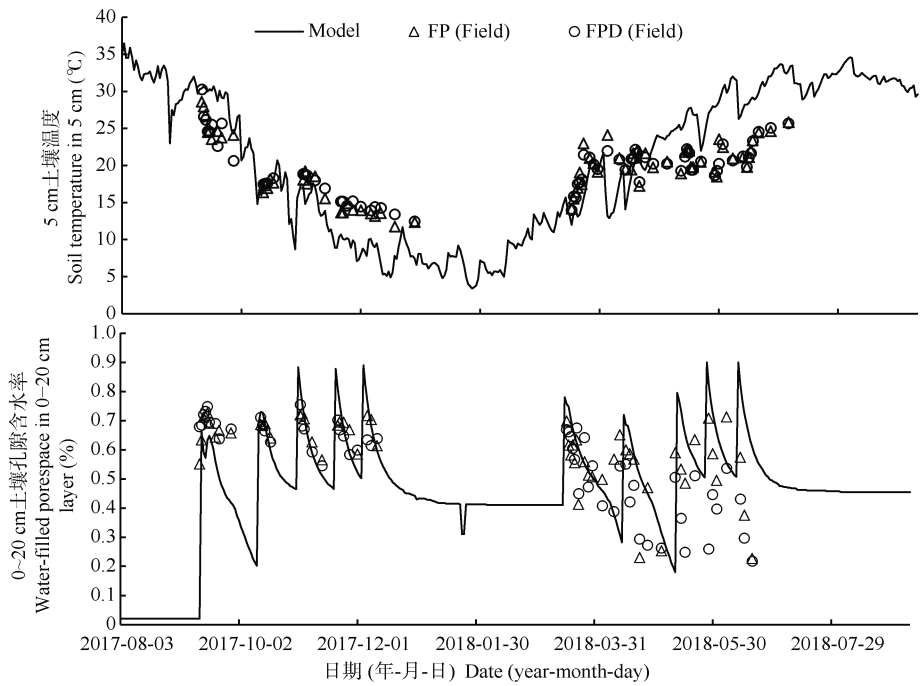

图 1 设施菜地系统 5 cm 土壤温度和 0~20 cm 土壤孔隙含水率变化模拟结果

Fig. 1 Simulation results of 5 cm soil temperature and 0−20 cm soil water-filled pore space changes in facility vegetable system

"Model"为 DNDC 的模拟值, "FP (Field)"为漫灌施肥处理的观测值, "FPD (Field)"为滴灌施肥处理的观测值。"Model" is the simulated value of DNDC, "FP (Field)" is the observation value of flood irrigation and fertilization treatment, and "FPD (Field)" is the observation value of drip fertigation treatment.

拟的 RMSE 值在 FP 处理中分别为 25.44%和 24.40%, FPD 处理中分别为 25.85%和 33.11%, 模拟结果较为可靠。另外, 由图 1 可知, 对土壤温度和土壤孔隙含水率的模拟误差主要出现在番茄季(3—7 月), 分析其原因主要是番茄季属夏茬, 高温天气下, 实际种植过程中会打开棚内通风口调节棚内温度, 进而降低表层土壤温度, 而模型中未能体现这一过程。其次, 实际棚内较高的土壤水分蒸发量和损失量也是导致其土壤孔隙含水率模拟结果偏高的原因。

2.1.2　设施菜地系统作物产量的模拟及验证

DNDC 模型对设施菜地系统作物产量的模拟结果见图 2。在设施菜地系统中, FP 处理的黄瓜季田间实际产量为 491.16 kg(C)·hm^{-2}, 番茄季的产量为 2144.57 kg(C)·hm^{-2}。FPD 处理的黄瓜季田间实际产量为 529.27 kg(C)·hm^{-2}, 番茄季的产量为 2184.16 kg(C)·hm^{-2}。对比实测产量和模拟产量, FP 处理的 RMSE 值为 7.79%, FPD 处理的 RMSE 值为 5.10%, 模型的模拟效果非常好(P<0.05)。DNDC 模型具有模拟设施菜地系统黄瓜和番茄产量的能力, 为模拟土壤中 NO_3^--N 含量、氮素淋失以及环境效应提供了坚实的基础。

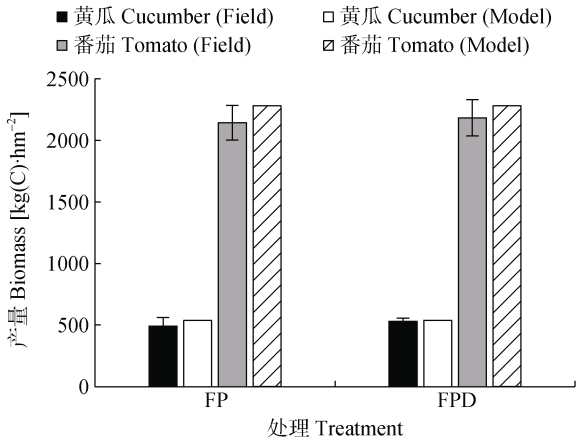

图 2　DNDC 模型对设施菜地系统作物产量的模拟结果

Fig. 2　Simulation result of crops yields of facility vegetable system by DNDC model

FP 为漫灌施肥处理, FPD 为滴灌施肥处理。Field 表示观测值, Model 表示模拟值。"FP" means flood irrigation and fertilization treatment, "FPD" means drip fertigation treatment. "Field" represents the observed value, and "Model" represents the simulated value.

2.1.3　土壤剖面 NO_3^--N 累积量的模拟与验证

图 3 所示是 DNDC 模型对设施菜地系统 FP 处理 0~60 cm 土壤剖面 NO_3^--N 含量的模拟结果。在设施系统中, FP 处理 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土壤中 NO_3^--N 的累积量均值分别为 414.28 kg(N)·hm^{-2}、255.80 kg(N)·hm^{-2} 和 81.833 kg(N)·hm^{-2}, 可见, 设施菜地系统中 NO_3^--N 的累积主要集中于 0~20 cm 的表层土壤中。通过对比分析 DNDC 模型对不同深度土壤 NO_3^--N 累积量的模拟结果, DNDC 模型能够较好地模拟出设施菜地系统 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤中 NO_3^--N 的累积量(图 3a、图 3b), RMSE 值分别达 23.65%和 32.33%。DNDC 模型对 40~60 cm 土壤的 NO_3^--N 累积量模拟存在一定误差, 低估了 NO_3^--N 的累积量, 但 R^2 达 0.87, 说明模拟值和实测值间相关性显著(P<0.05)(图 3c)。因此, DNDN 模型能够用来模拟菜地系统表层土壤剖面的 NO_3^--N 含量。

2.2　土壤基础性质对 NO_3^--N 累积的影响

2.2.1　土壤质地对 NO_3^--N 累积的影响

不同土壤质地类型下土壤中 NO_3^--N 的累积和运移过程如图 4 所示。本研究的基线情景为粉壤土,

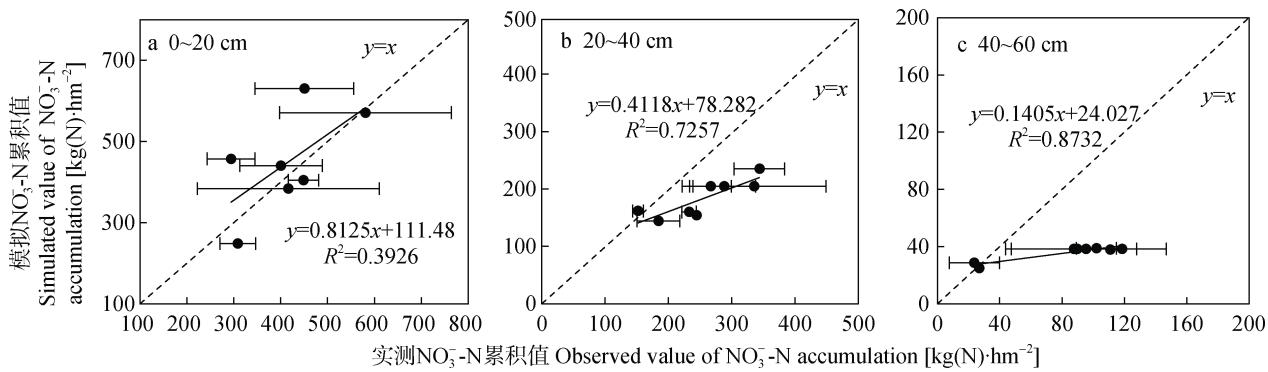

图 3　DNDC 模型对设施菜地系统 0~60 cm 土层土壤 NO_3^--N 累积量的模拟(虚线表示 y=x 线, 实线表示趋势线)

Fig. 3　Simulation of NO_3^--N accumulation in 0−60 cm soil layer of facility vegetable system by DNDC model (dashed line is the y=x line, solid line is the trend line)

基线情景下 NO_3^--N 的累积层主要集中在 20 cm，最高 NO_3^--N 含量出现在番茄季最后一次灌溉施肥(第 316 d)之后，达 984.11 kg(N)·hm^{-2}。垂直方向上，土层的 NO_3^--N 含量变化特征为由 20 cm 累积层向上向下逐渐脉冲式降低。时间尺度上，番茄季 20 cm 深度 NO_3^--N 累积量高于黄瓜季。同时，单季表层土壤的 NO_3^--N 累积量随灌溉施肥次序逐渐升高，黄瓜季达 200~300 kg(N)·hm^{-2}，番茄季达 300~400 kg(N)·hm^{-2}。不同于基线情景，壤沙土中没有观察到 NO_3^--N 的明显累积，累积量处于 0~100 kg(N)·hm^{-2}。而在沙黏壤土中可以明显观察到 NO_3^--N 的运移。在番茄季，第 3 次灌溉施肥后土壤 NO_3^--N 的累积层下移到 30 cm，第 5 次灌溉施肥后此深度 NO_3^--N 累积量稳定在 1005.43 kg(N)·hm^{-2}。说明不同的土壤类型 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 运移特征存在明显差异，当质地从壤沙土转为沙黏壤土，土壤吸附能力随黏土含量的增加而变强，增加了土壤 NO_3^--N 的固持作用，累积层 NO_3^--N 含量增高同时向更深层运移。

2.2.2 土壤 pH 对 NO_3^--N 累积的影响

由图 5 可知，pH×0.8 情景下土壤中 NO_3^--N 迁移和累积特征与基线情景一致。相比基线情景，在 pH×1.2 情景中番茄季第 1 次灌溉施肥之后，10~20 cm 深度土壤中的 NO_3^--N 累积明显减少，从 300~400 kg(N)·hm^{-2} 降低至 200~300 kg(N)·hm^{-2}。此外，20 cm 深度处最大 NO_3^--N 累积量也降低 16.11%。说明表层土壤 NO_3^--N 累积量受土壤 pH 的调节。随着土壤 pH 的升高，能够削弱 NO_3^--N 在土壤表面的累积，缓解施氮引起的土壤表面酸化。同时，降低了累积层 NO_3^--N 的含量。

2.2.3 土壤有机碳对 NO_3^--N 累积的影响

由图 6 可知，减少 20%的土壤有机碳(SOC)后，累积层最大 NO_3^--N 累积量降低 5.81%，为 926.95 kg(N)·hm^{-2}。同时，10~20 cm 表层土壤 NO_3^--N 累积量下降较快，特别是番茄季第 2 次施肥灌溉之后。在 SOC×1.2 的情景中，SOC 含量升高降低了土壤水和 NO_3^--N 的下移速度，且单季土壤表层 10~20 cm NO_3^--N 累积量升高，两季均达 300~400 kg(N)·hm^{-2}。20 cm 处 NO_3^--N 累积量最大值达 1023.76 kg(N)·hm^{-2}。可见，随着 SOC 含量的增加，不仅提高了土壤20 cm深处的 NO_3^--N 累积量的最大值，而且促进了土壤 NO_3^--N 的表层累积。

2.3 不同管理措施对 NO_3^--N 累积的影响

2.3.1 灌溉方式对 NO_3^--N 累积的影响

灌溉方式是影响土壤中 NO_3^--N 运移的重要因素之一。图 7 为漫灌和滴灌条件下 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 的累积和运移过程。与基线情景(漫灌)相比，滴灌施肥导致局部土壤湿润，土壤水受重力作用下渗减弱，NO_3^--N 的累积层集中在 10 cm，表层最大 NO_3^--N 的累积量达 1817.55 kg(N)·hm^{-2}。其次，10~15 cm 中土壤 NO_3^--N 呈明显带状分布，整个轮作周期内 NO_3^--N 的含量基本稳定在 600~1200 kg(N)·hm^{-2}。表明滴灌施肥能够改变土壤中水分的分布进而影响 NO_3^--N 的分布，通过抑制土壤 NO_3^--N 的向下迁移而提高土壤表面 NO_3^--N 的累积量。

2.3.2 不同施氮量对 NO_3^--N 累积的影响

由图 8 可知，随着施氮量的增加，两季土壤表面 NO_3^--N 的累积量不断升高，从 200~300 kg(N)·hm^{-2} 提高到 300~400 kg(N)·hm^{-2}，尤其是番茄季。其次，土壤 20 cm 深处 NO_3^--N 累积层的厚度和最大累积量也在不断增加，最大累积量从 984.11 kg(N)·hm^{-2} 提高到 1184.52 kg(N)·hm^{-2}，提高 20.36%。可见，施氮量的增加既促进了土壤表面 NO_3^--N 的累积，又提高了土壤 20 cm 深处 NO_3^--N 累积。

2.3.3 不同灌溉量对 NO_3^--N 累积的影响

由图 9 可知，在灌溉量×0.8 的情景中，由于灌溉水量减少，削弱了土壤中重力水对 NO_3^--N 向下运移的驱动力，10~20 cm 土壤中 NO_3^--N 在黄瓜季未观察到随灌溉施肥次序出现运移。而在番茄季出现了 NO_3^--N 累积，最后一次施肥灌溉后累积量达 1218.68 kg(N)·hm^{-2}，比基线情景提高 23.84%。其次，减少灌溉后休闲期 15~25 cm 土壤中 NO_3^--N 含量也明显提高。而将灌溉量提高到 120%，10~15 cm 表层土壤的 NO_3^--N 累积量减少，20 cm 累积层 NO_3^--N 的含量也明显降低，大量 NO_3^--N 随水下渗，且在每季最后一次施肥灌溉后土壤中 NO_3^--N 向下运移速度加快。说明不同灌溉量下土壤中 NO_3^--N 的运移和累积特征不同，较低的灌溉量易导致 NO_3^--N 在土壤表面累积，提高灌溉量能够明显加快土壤中 NO_3^--N 的向下运移速度，同时降低了表层 NO_3^--N 累积量。

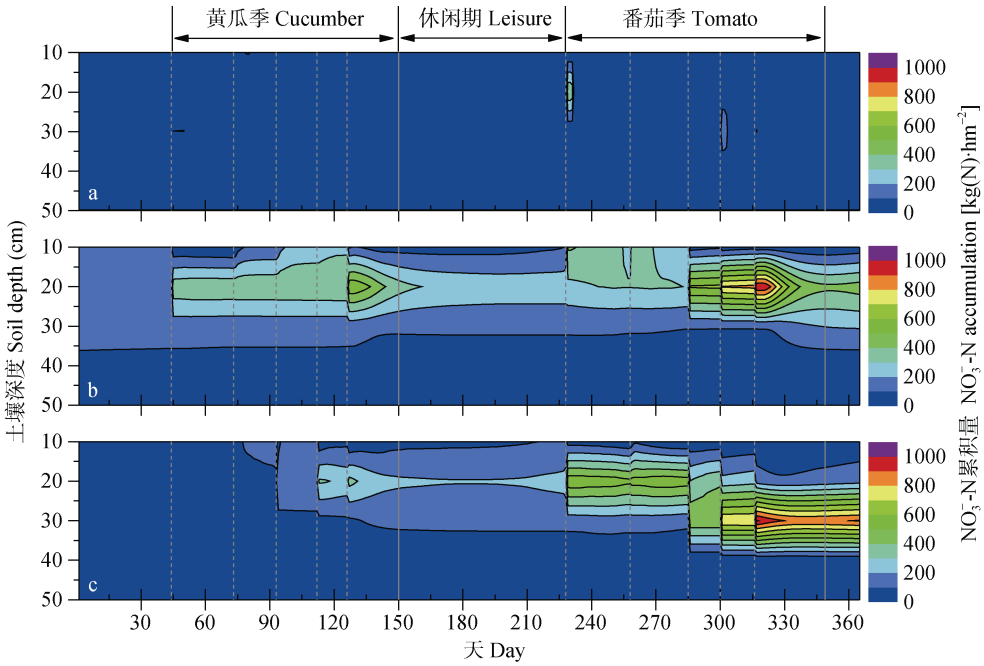

图 4　不同土壤质地类型下设施菜地系统 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 的累积和运移过程(a：壤沙土；b：粉壤土；c：沙黏壤土)

Fig. 4　Accumulation and migration process of NO_3^--N in 0−50 cm soil of facility vegetable system under different soil texture types (a: loamy sand; b: silt loam; c: sand clay loam)

虚竖线代表每个作物轮作周期内灌溉施肥事件，实竖线代表每季作物拉秧事件。横坐标天表示每个轮作周期内自然日。The dashed vertical line represents the irrigation and fertilization events, and the solid vertical lines represent the crop plants uprooting events. The abscissa (Day) represents the natural day of the rotation cycle.

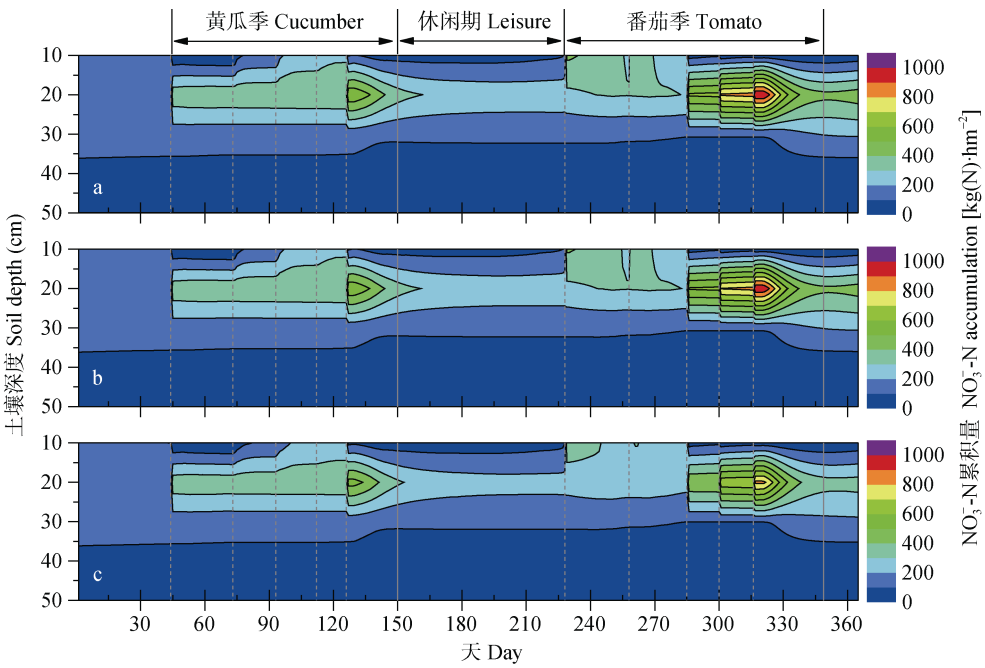

图 5　不同土壤 pH 对设施菜地系统 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 累积和运移的影响(a: pH×0.8; b: pH 基线; c: pH×1.2)

Fig. 5　Effects of different soil pH on NO_3^--N accumulation and transport in 0−50 cm soil of facility vegetable system (a: pH×0.8; b: pH baseline; c: pH×1.2)

虚竖线代表每个作物轮作周期内灌溉施肥事件，实竖线代表每季作物拉秧事件。横坐标天表示每个轮作周期内自然日。The dashed vertical lines represent the irrigation and fertilization events, and the solid vertical lines represent the crop plants uprooting events. The abscissa (Day) represents the natural day of the rotation cycle.

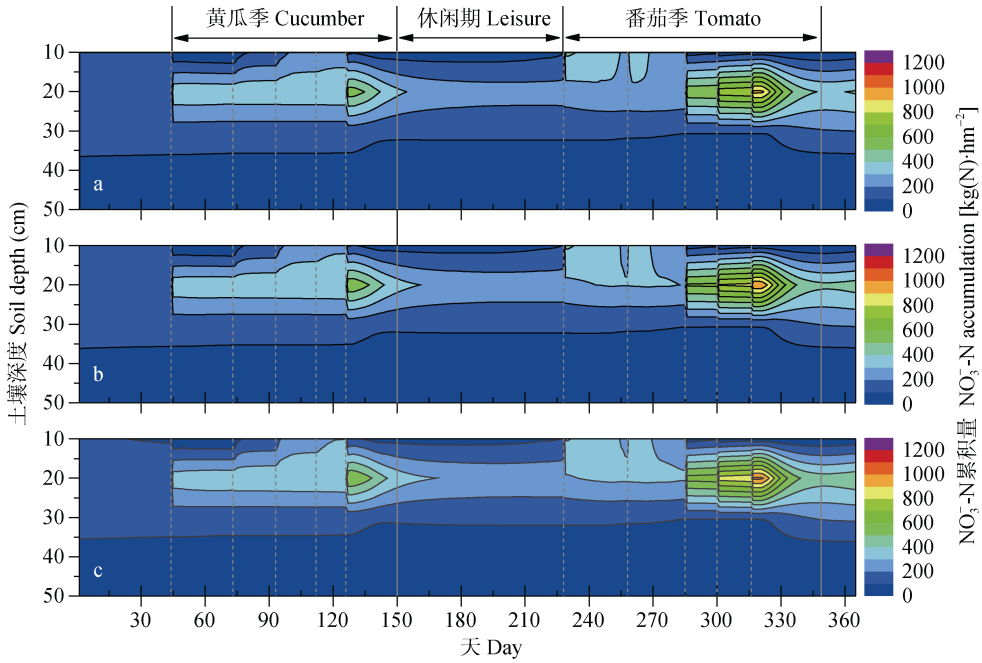

图 6 不同土壤有机碳含量(SOC)下设施菜地系统 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 的累积和运移(a: SOC×0.8; b: SOC 基线; c: SOC×1.2)

Fig. 6 Effects of soil organic carbon content (SOC) on NO_3^--N accumulation and transport in 0−50 cm soil of facility vegetable system (a: SOC×0.8; b: SOC baseline; c: SOC×1.2)

虚竖线代表每个作物轮作周期内灌溉施肥事件，实竖线代表每季作物拉秧事件。横坐标天表示每个轮作周期内自然日。The dashed vertical lines represent the irrigation and fertilization events, and the solid vertical lines represent the crop plants uprooting events. The abscissa (Day) represents the natural day of the rotation cycle.

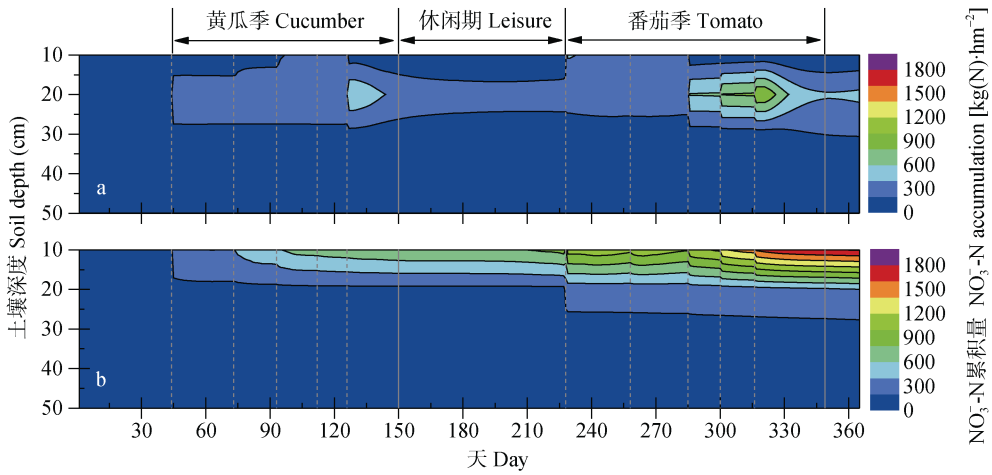

图 7 漫灌和滴灌下设施菜地系统 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 的累积和运移过程(a: 漫灌; b: 滴灌)

Fig. 7 Accumulation and migration of NO_3^--N in 0−50 cm soil of facility vegetable system under flood irrigation and drip irrigation conditions (a: flood irrigation; b: drip irrigation)

虚竖线代表每个作物轮作周期内灌溉施肥事件，实竖线代表每季作物拉秧事件。横坐标天表示每个轮作周期内自然日。The dashed vertical lines represent the irrigation and fertilization events, and solid vertical lines represent the crop plants uprooting events. The abscissa (Day) represents the natural day of the rotation cycle.

2.4 不同情景对 0~50 cm 土壤 NO_3^--N 的影响

结合 DNDC 的模拟结果，计算设施菜地系统中不同情景设置下输入参数的土壤 NO_3^--N 累积敏感性指数，结果如表 4 所示。分析结果表明，不同输入参数对 NO_3^--N 累积过程的影响程度不尽相同。在各项输入参数中，灌溉量和施氮量的改变对设施菜地土壤 NO_3^--N 累积的影响较大，敏感性指数分别为 21.06 和 20.85。其次是土壤中有机碳含量和土壤的 pH。

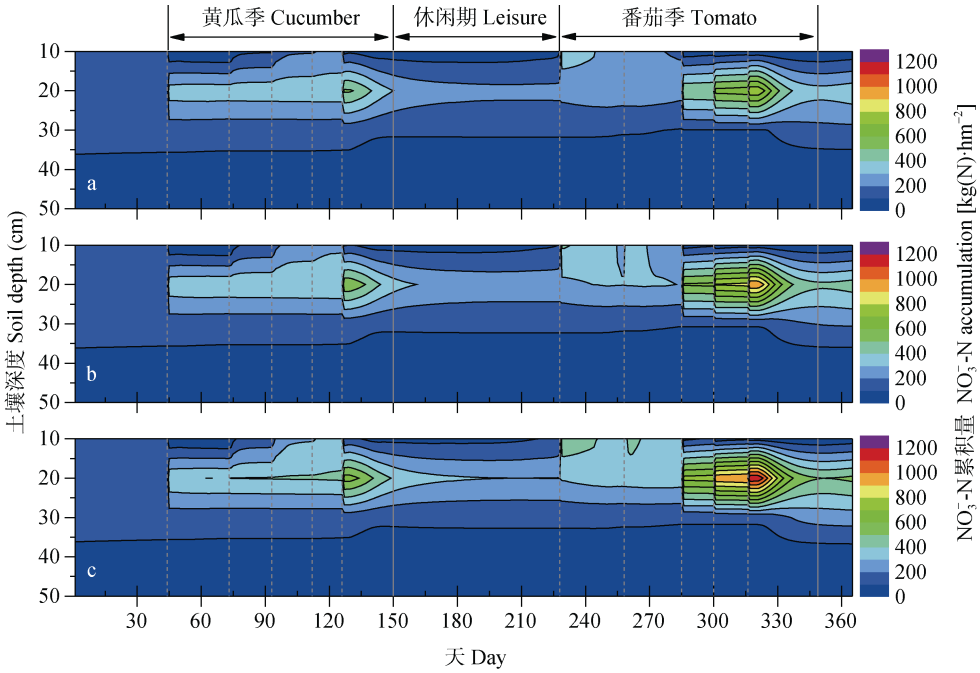

图 8　不同施氮量对设施菜地系统 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 累积和运移的影响(a：施氮量×0.8; b：施氮量基线; c：施氮量×1.2)

Fig. 8　Effect of different nitrogen application amounts on NO_3^--N accumulation and migration in 0−50 cm soil of facility vegetable system (a: nitrogen application amount×0.8; b: nitrogen application baseline; c: nitrogen application amount×1.2)

虚竖线代表每个作物轮作周期内灌溉施肥事件，实竖线代表每季作物拉秧事件。横坐标天表示每个轮作周期内自然日。The dashed vertical lines represent the irrigation and fertilization events, and the solid vertical lines represent the crop plants uprooting events. The abscissa (Day) represents the natural day of the rotation cycle.

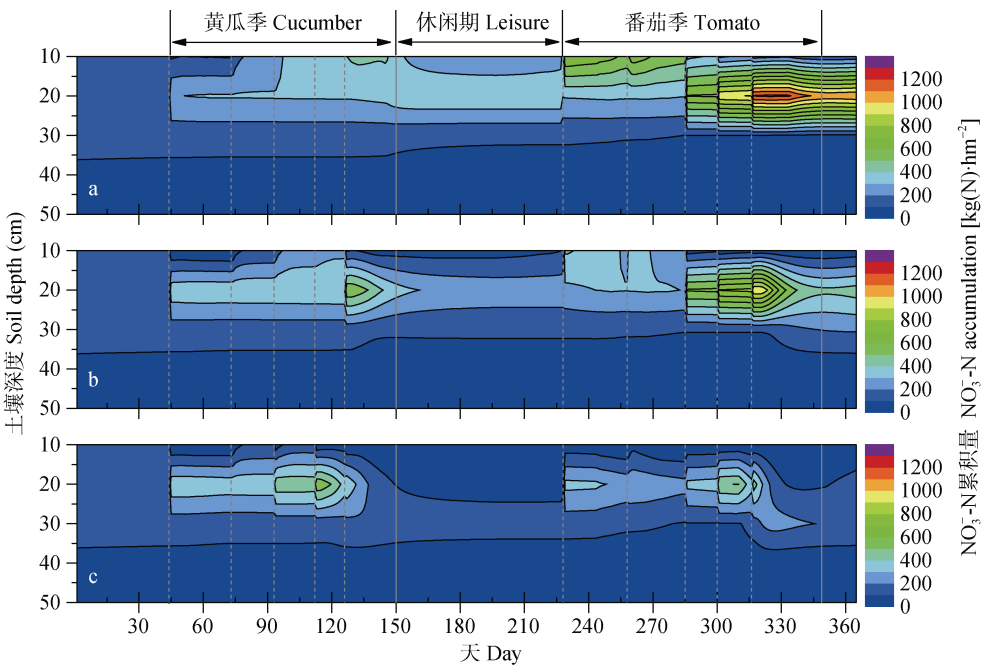

图 9　不同灌溉量对设施菜地系统 0~50 cm 土壤中 NO_3^--N 累积和运移的影响(a：灌溉量×0.8; b：灌溉量基线; c：灌溉量×1.2)

Fig. 9　Effects of different irrigation volumes on NO_3^--N accumulation and migration in 0−50 cm soil of facility vegetable system (a: irrigation water volume×0.8; b: irrigation water volume baseline; c: irrigation water volume×1.2)

虚竖线代表每个作物轮作周期内灌溉施肥事件，实竖线代表每季作物拉秧事件。横坐标天表示每个轮作周期内自然日。The dashed vertical lines represent the irrigation and fertilization events, and the solid vertical lines represent the crop plants uprooting events. The abscissa (Day) represents the natural day of the rotation cycle.

表 4 基于 DNDC 模型的设施菜地系统土壤 NO_3^--N 累积敏感性指数

Table 4 Sensitive indexes of NO_3^--N accumulation in soil of facility vegetable system based on DNDC model

输入参数 Parameter	变化范围 Range	敏感性指数 Sensitive index
土壤质地 Soil texture	壤沙土—粉壤土—沙黏壤土 Loamy sandy soil – silt loam – sandy clay loam	9.05
pH	pH×0.8—pH×1.2	17.97
土壤有机碳 Soil organic carbon (SOC)	SOC×0.8–SOC×1.2	18.14
灌溉方式 Irrigation method	漫灌—滴灌 Flood irrigation – drip irrigation	—
灌溉量 Irrigation volume	灌溉量×0.8—灌溉量×1.2 Irrigation volume×0.8 – irrigation volume×1.2	21.06
施氮量 Nitrogen application amount	施氮量×0.8—施氮量×1.2 Nitrogen application rate×0.8 – nitrogen application rate×1.2	20.85

2.5 不同情景下 NO_3^--N 的淋失总量

由图 10 可知，土壤中 NO_3^--N 淋失减量排序为：滴灌>灌溉量×0.8>SOC×1.2>施氮量×0.8。与基线情景相比，滴灌、灌溉量×0.8、SOC×1.2 和施氮量×0.8 情景分别降低了 NO_3^--N 两季淋失量的 68.20%、51.98%、27.21%和 14.71%。因此，从 NO_3^--N 两季淋失量变化来讲，滴灌施肥对 NO_3^--N 淋失减量效果明显，调控土壤有机碳也是 NO_3^--N 淋失减量的有效途径。其次，施氮量和灌溉量对 NO_3^--N 两季淋失量的影响具有一致性，即随着施氮量或灌溉量的减少，土壤中 NO_3^--N 的两季淋失总量也相应减少。

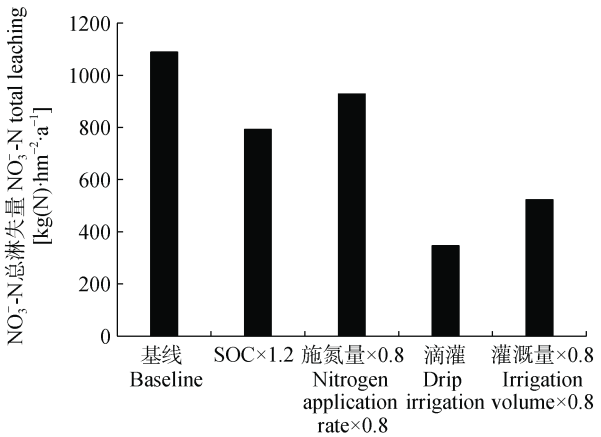

图 10 不同情景设置下设施菜地系统两季土壤 NO_3^--N 淋失总量

Fig. 10 Total leaching loss of NO_3^--N from soil in two seasons of facility vegetable system under different scenarios

SOC: 土壤有机碳含量。SOC: soil organic carbon content.

结合不同因素对土壤 NO_3^--N 淋失的影响，设置 3 个组合情景，分别为：组合 1 (80%施氮量+80%灌溉量)、组合 2 (80%施氮量+80%灌溉量+1.2 倍土壤 SOC)和组合 3 (80%施氮量+80%灌溉量+1.2 倍土壤 SOC+滴灌)。DNDC 模型对 3 种组合情景的产量和 NO_3^--N 淋失量的模拟结果如表 5 所示。与基线情景相比，3 种组合情景均能提高设施菜地系统的产量，同时降低土壤 NO_3^--N 的淋失量。组合情景 2 在优化 20%施氮量和 20%灌溉量的基础上提高 20%土壤有机碳，不仅增加了产量，而且降低 60.75%的 NO_3^--N 淋失量。组合情景 3 结合滴灌施肥，分别增加 3.41%的产量和减少 69.04%的 NO_3^--N 淋失量。说明将不同 NO_3^--N 淋失减量措施组合使用不仅具有增产潜力，还能获得更好的 NO_3^--N 淋失减量效果。

3 讨论

3.1 模型模拟的不确定性评价

DNDC 模型是一个模拟农业生态系统中碳氮元素循环的生物地球化学模型，且已在不同的农业生态系统中得到了验证和应用。以往的研究多集中于大田旱地基础经济作物种植系统，如小麦(*Triticum aestivum*)和玉米(*Zea mays*)等[31-32]，且多被用来进行土壤温室气体排放的评估[22,33]。本研究重点关注设施菜地系统氮素的运移和淋溶，校正后的 DNDC 模型能够较为准确地模拟出土壤表层温度和土壤孔隙含水率的动态变化过程以及作物的产量，但模拟结果还存在一些偏差。相比黄瓜季，番茄季出现了模拟值高于实测值。分析其原因：黄瓜季为轮作的第 1 季，输入的原始土壤参数与该季的土壤实际情况更吻合，使模拟的准度较高。其次，本研究中，2017 年 12 月—2018 年 3 月为休闲期，该期间种植填闲蔬菜会使土壤的理化性质发生改变，而模型仅认为该阶段的温度和湿度是一个自然演变的过程。而番茄季又是夏季种植，为避免棚内温度过高，进入夏季后，通过人工通风的方式调节棚内温度，也会造成实测土壤表层温度和湿度的下降。Uzoma 等[34]研究发现，土壤干燥开裂造成的优先流也会导致模型高估土壤的水分含量。张婧[35]研究表明，田间观测的不确定性也会造成土壤水分含量模拟值和实测值的差异。另外，由于土壤中 NO_3^--N 淋失的过程复杂，使得参

表 5　DNDC 模型对不同组合情景的设施菜地系统作物产量和 NO_3^--N 淋失量的模拟结果

Table 5　Simulation results of DNDC model on crop yield and NO_3^--N leaching in different combinations of facility vegetable system

情景 Scenario	描述 Description	产量 Biomass		NO_3^--N 淋失量 NO_3^--N leaching	
		模拟值 Simulated value [kg(C)·hm^{-2}]	变化率 Change rate (%)	模拟值 Simulated value [kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}]	变化率 Change rate (%)
基线情景 Baseline scenario	农民常规处理 Farmer's practice	2814.47	—	1088.60	—
组合 1 Combination scenario 1	80%施氮量+80%灌溉量 Nitrogen application rate×0.8+irrigation volume×0.8	2855.20	+1.45	445.94	−59.04
组合 2 Combination scenario 2	80%施氮量+80%灌溉量+1.2 倍土壤有机碳含量 Nitrogen application rate×0.8 + irrigation volume×0.8 + soil organic carbon content×1.2	2854.94	+1.44	427.32	−60.75
组合 3 Combination scenario 3	滴灌+80%施氮量+80%灌溉量+1.2 倍土壤有机碳含量 Drip irrigation + nitrogen application rate×0.8 + irrigation volume×0.8 + soil organic carbon content×1.2	2910.53	+3.41	337.08	−69.04

数修正的难度较大。本研究中 DNDC 模型对土壤 NO_3^--N 分布和淋失量的模拟存在不确定性，模型有可能高估了氮素的淋失量。但是，朱波等[25]运用本地化的 DNDC 模型(Version 9.3)实现了对紫色土坡耕地淋溶水量和氮素淋失量的有效模拟。造成差异的原因可能是，模型模拟的结果具有一定的不确定性，特别是点位的模拟，不同模拟点位的土壤属性之间存在较大差异。另外，DNDC 仅模拟 0~50 cm 的土壤氮素淋失，且默认点位的土壤属性在一个单元内是均一的，这与实际情况不一致。可见，通过田间试验获取的模型输入数据和模型部分参数本身具有不确定性，亦会引起模拟结果的较大变异[36]。因此，试验获取模型输入数据的准确性是保证模拟结果可靠的关键，还要通过大量的田间基础试验数据将模型的内部参数进行优化，进而降低系统误差。

3.2　设施菜地土壤 NO_3^--N 累积及其敏感因子

土壤氮素的累积过程受到土壤水文特征与土壤-植物系统共同控制[25]。通过分析各参数的敏感性指数，发现灌溉量、土壤有机碳含量和施肥量对土壤氮素的累积影响较大，与李虎等[37]在冬小麦种植系统中的研究结果一致。灌溉量的改变能够直接影响土壤剖面的水分运动，灌溉水量过大易把 NO_3^--N 带到土壤深层，降低作物对 NO_3^--N 吸收率，增大淋溶。受耕层深度的影响，本研究中 NO_3^--N 累积量主要集中在 20 cm 土层，优化水量后，降低了土壤耕作层的土壤含水率，削弱了 NO_3^--N 向下运移的驱动力[38]，导致淋溶水在下渗过程中被犁底层拦截，累积层厚度逐渐增加，导致 0~20 cm 土壤中 NO_3^--N 含量明显升高(图 9a)。其次，提高灌溉量能够加快土壤中的 NO_3^--N 向下运移速度，同时降低了累积层 NO_3^--N 的含量。胡映泉[39]也证明了土壤中 NO_3^--N 向下迁移累积的过程与水分下渗的过程一致，较低灌溉量促进土壤 NO_3^--N 的表聚现象，较高的灌溉量加速了 NO_3^--N 向下迁移。廖上强等[40]在番茄地的试验表明，优化 30%的灌溉水量能在不影响产量和品质的基础上使 40~60 cm 土层中 NO_3^--N 减少 8.0%~63.7%。因为土壤中 NO_3^--N 带负电荷，很难被土壤胶体吸附，大量施肥直接提高了 NO_3^--N 土壤表层 NO_3^--N 的浓度，促进其随水向土壤深层的低浓度区域扩散而发生迁移。另外，土壤中的有机碳主要来自于有机肥的施入，其氮素主要以大分子有机氮形式存在，且 NO_3^--N 比例较化肥低，易被土壤胶体吸附，进而提高了土壤表面的 NO_3^--N 累积。同时，土壤有机碳和黏土含量是反映土壤质地的重要指标，土壤中较高的土壤有机碳和黏土含量能降低土壤中 NO_3^--N 的下渗速度而促进累积[41]。基于此，对于设施菜地土壤 NO_3^--N 的运移和损失的研究，有必要进一步综合考虑施氮量、灌溉量和土壤有机碳含量对土壤 NO_3^--N 累积的影响。

3.3 土壤氮素淋失特征和控制因素

施氮量是导致 NO_3^--N 淋失的重要因素，供水量是 NO_3^--N 淋失的必要条件，且随着施氮量和灌溉量的增加，硝态氮的淋失风险也极大地提高[42]。与本文研究结果一致，张春霞等[43]在设施番茄种植中，减少 240 kg(N)·hm^{-2} 的氮素投入后明显减少了 NO_3^--N 淋失量。孙媛[44]在漫灌下优化施氮量后比农民习惯施肥处理 NO_3^--N 淋失量减少 19%~31%。本研究中，将优化 20%灌溉量和 20%施氮量两种情景组合减少了 59.04%的 NO_3^--N 淋失量，说明节水结合节氮能从源头上显著降低 NO_3^--N 的淋失量[16]。其次，组合情景 2 提高土壤有机碳含量再结合节水节氮减少了 60.75%的 NO_3^--N 淋失量，主要原因为提高土壤有机碳含量以后有效抑制了土壤中 NO_3^--N 的下移过程，进而减少淋失总量[45]。值得注意的是，组合情景 3 结合滴灌施肥后大幅减少 69.04%的 NO_3^--N 淋失总量，淋失减量效果较好，其原因在于滴灌施肥延缓了带入土壤水分的过程，避免因地表水分含量快速升高导致的快速下渗。同时，滴灌施肥改变土壤中的水分分布，滴头附近较高的土壤湿度和养分含量，促进了作物对 NO_3^--N 的吸收[46]。殷冠羿等[47]研究也发现，设施番茄系统中滴灌比漫灌处理能有效减少 72%~87%氮素淋失量。进而在滴灌的基础上，优化施肥量和灌溉量也势必会进一步降低土壤 NO_3^--N 淋溶[40]。综上可见，土壤基础理化性质、施肥灌溉量及方式均对土壤氮素的淋失影响较大，减少施氮量和灌溉量能够从总量上实现 NO_3^--N 淋失源头减量，优化施肥灌溉方式则通过调整土壤水肥分布进而提高 NO_3^--N 利用率，提高土壤有机碳含量能够有效延缓土壤 NO_3^--N 的淋失过程。因此，节水节肥依然是设施菜地土壤 NO_3^--N 淋失减量最简单直接的方法，但未来土壤 NO_3^--N 淋失减量更应该关注土壤基础性质和水肥分布特征对淋失过程的影响，以便于更好地实现 NO_3^--N 淋失总量的精准减量。

4 结论

1)利用田间原位试验数据校验之后的 DNDC 模型能够较好地模拟出设施菜地系统的蔬菜产量、土壤温度和水分变化以及 NO_3^--N 的迁移过程，校验后的 DNDC 模型可以用来对设施菜地土壤氮素的运移和淋失进行模拟评价。

2)灌溉水量和氮肥施入量对 0~60 cm 土壤 NO_3^--N 的累积运移影响最大，土壤 pH 和土壤有机碳也是影响土壤 NO_3^--N 运移的重要因子。较低的灌溉量易导致 NO_3^--N 在土壤表面累积，提高灌溉量能够明显加快土壤中 NO_3^--N 的向下运移速度。增加施氮量既促进了 NO_3^--N 的表聚现象，又提高了土壤 20 cm 深处 NO_3^--N 的累积量。随着土壤 pH 的升高削弱了 NO_3^--N 在土壤表面的累积，缓解施氮引起的土壤表面酸化。提高土壤有机碳能延缓 NO_3^--N 的下移，同时提高 20 cm 深处 NO_3^--N 的累积量。

3)设施菜地氮素淋失减量的重点依然是节水节肥，还要考虑结合优化灌溉方式、提高土壤有机碳含量等方法。相比农民常规措施，节水节肥能够减少 59.04%的 NO_3^--N 淋失量，在此基础上提高 20%土壤有机碳能够减少 60.75%的淋失量。将节水节肥与滴灌、提高土壤有机碳结合可以使 NO_3^--N 的淋失量明显减少 69.04%。

参考文献 References

[1] YU H Y, LI T X, ZHANG X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(6): 871−879

[2] 丁武汉，雷豪杰，徐驰，等. 我国设施菜地表观氮平衡分析及其空间分布特征[J]. 农业资源与环境学报，2020，37(3): 353−360
DING W H, LEI H J, XU C, et al. Characteristics and spatial distribution of apparent nitrogen balance in the greenhouse vegetable cropping system in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(3): 353−360

[3] 李晓欣，马洪斌，胡春胜，等. 华北山前平原农田土壤硝态氮淋失与调控研究[J]. 中国生态农业学报，2011，19(5): 1109−1114
LI X X, MA H B, HU C S, et al. Soil nitrate leaching and control methods in the piedmont of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1109−1114

[4] HUANG T, JU X T, YANG H. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42247

[5] GUO Y J, LI B W, DI H J, et al. Effects of dicyandiamide (DCD) on nitrate leaching, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide in a greenhouse vegetable production system in northern China[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2012, 58(5): 647−658

[6] 谭德水，江丽华，谭淑樱，等. 基于减少土壤硝态氮淋失的作物搭配种植模式研究进展[J]. 中国生态农业学报，2014，22(2): 136−142
TAN D S, JIANG L H, TAN S Y, et al. Research progress on collocation planting of crops for decreasing the loss of soil nitrate nitrogen through leaching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 136−142

[7] 范庆锋, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式下设施土壤硝态氮的积累特征及其环境影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2281–2286
FAN Q F, ZHANG Y L, ZHANG Y L, et al. Soil nitrate accumulation and its environmental effects under various irrigation modes in protected field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(11): 2281–2286

[8] 滕艳敏, 韩卉, 郝梓依, 等. 不同蔬菜种植模式对土壤淋溶水总氮、总磷和 COD 的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 759–768
TENG Y M, HAN H, HAO Z Y, et al. Effect of vegetable cropping system on total nitrogen, phosphorus and COD in farmland leachate[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 759–768

[9] MCLAY C D A, DRAGTEN R, SPARLING G, et al. Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: A comparison of three approaches[J]. Environmental Pollution, 2001, 115(2): 191–204

[10] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24–28
JU X T, ZHANG F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in North China[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 24–28

[11] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 405–413
LIU H B, LI Z H, ZHANG Y G, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 405–413

[12] SUN Y, HU K L, FAN Z B, et al. Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in North China using the EU-Rotate_N model[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 72–84

[13] 秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 等. 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响[J/OL]. 农业环境科学学报. [2020-07-30]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1673589371151280711
QIN X C, PAN J T, GUO S F, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with biogas fertilizer on crop yield of wheat-maize rotation and soil nitrogen loss in North China Plain[J/OL]. Journal of Agro-Environment Science. [2020-07-30]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1673589371151280711

[14] 刘乐, 费良军, 曾健, 等. 容重对土壤水氮垂直运移特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(2): 200–205
LIU L, FEI L J, ZENG J, et al. Effects of soil bulk density on vertical migration of soil water and nitrogen[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(2): 200–205

[15] 黄吴进, 邓利梅, 夏建国, 等. 温室滴灌施肥条件下土壤硝态氮的运移及分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 42–48
HUANG W J, DENG L M, XIA J G, et al. Transport and distribution characteristics of soil nitrate nitrogen under drip fertigation in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(12): 42–48

[16] 闫鹏, 武雪萍, 华珞, 等. 不同水氮用量对日光温室黄瓜季硝态氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 645–653
YAN P, WU X P, HUA L, et al. Effects of different water and nitrogen amounts on nitrate leaching in sunlight greenhouse during cucumber growing season[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(3): 645–653

[17] 栗岩峰, 李久生, 李蓓. 滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 857–865
LI Y F, LI J S, LI B. Nitrogen dynamics in soil as affected by fertigation strategies and frequencies for drip irrigated tomato[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 857–865

[18] 王大鹏, 郑亮, 吴小平, 等. 旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1731–1741
WANG D P, ZHENG L, WU X P, et al. Review of soil nitrate formation, leaching transport and their control measures in upland farming systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1731–1741

[19] 张学科, 白俊英, 严海霞. 灌水量与施氮量对不同类型土壤中硝酸盐运移的影响[J]. 节水灌溉, 2020, (2): 83–87
ZHANG X K, BAI J Y, YAN H X. Effects of irrigation and nitrogen application on nitrate transport in different soils[J]. Water Saving Irrigation, 2020, (2): 83–87

[20] 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 C S. Biogeochemical concepts and methodologies: Development of the DNDC model[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(2): 89–99

[21] 李长生. 陆地生态系统的模型模拟[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 49–57
LI C S. Modeling terrestrial ecosystems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(1): 49–57

[22] 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 H K, JIANG Y Q, LI H, et al. Modification and application of the DNDC model in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2760–2770

[23] BROWN L, SYED B, JARVIS S C, et al. Development and application of a mechanistic model to estimate emission of nitrous oxide from UK agriculture[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(6): 917–928

[24] GILHESPY S L, ANTHONY S, CARDENAS L, et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution[J]. Ecological Modelling, 2014, 292: 51–62

[25] 朱波, 周明华, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地氮素淋失通量的实测与模拟[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 102–109
ZHU B, ZHOU M H, KUANG F H, et al. Measurement and simulation of nitrogen leaching loss in hillslope cropland of purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 102–109

[26] LI H, WANG L G, QIU J J, et al. Calibration of DNDC model for nitrate leaching from an intensively cultivated region of Northern China[J]. Geoderma, 2014, 223-225: 108–118

[27] LI C S, FROLKING S, FROLKING T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D9): 9759–9776

[28] LI C S, FROLKING S, FROLKING T A. A model of nitrous

oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D9): 9777–9783

[29] LI C S, FROLKING S, HARRISS R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3): 237–254

[30] LI C S, FARAHBAKHSHAZAD N, JAYNES D B, et al. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa[J]. Ecological Modelling, 2006, 196(1/2): 116–130

[31] 刘宁, 韩娟, 刘璐璐, 等. 应用 DNDC 模型模拟沟垄集雨种植对陕西省玉米产量的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(5): 691–701
LIU N, HAN J, LIU L L, et al. Effects of simulation of rainfall harvesting with ridge and furrow system on maize yield in Shaanxi Province by use of DNDC model[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinic, 2016, 25(5): 691–701

[32] 任小龙, 贾志宽, 陈小莉, 等. 模拟降雨量下沟垄微型集雨种植玉米的水温效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 70–77
REN X L, JIA Z K, CHEN X L, et al. Effect of corn (*Zea mays* L.) water and temperature of ridge and furrow planting of rainfall harvesting under simulated rainfall conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 70–77

[33] 张钊, 辛晓平. 生物地球化学模型 DNDC 的研究进展与碳动态模拟应用[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 445–452
ZHANG Z, XIN X P. Research progress of biogeochemistry model DNDC in carbon dynamic modeling[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(3): 445–452

[34] 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

[35] 张婧. 设施蔬菜地土壤 N_2O 排放与硝态氮淋溶的模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 44–45
ZHANG J. Modeling nitrous oxide emissions and nitrate leaching from greenhouse vegetable system by using a biogeochemical model[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 44–45

[36] 韩宁, 陈维梁, 高扬, 等. 基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2317–2325
HAN N, CHEN W L, GAO Y, et al. Comparative study of SWAT and DNDC applied to N leach and export from subtropical watershed[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2317–2325

[37] 李虎, 王立刚, 邱建军. DNDC模型在农田氮素渗漏淋失估算中的应用[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1591–1596
LI H, WANG L G, QIU J J. Application of DNDC model in estimating cropland nitrate leaching[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1591–1596

[38] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 61–64
WANG H, WANG Q J, SHAO M A. Characteristics of nitrogen leaching from sloping land on loess plateau under rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 61–64

[39] 胡映泉. 3种不同试剂处理对木槿种子发芽的影响[J]. 天津农业科学, 2013, 19(8): 95–98
HU Y Q. Analysis of three different treatments on the germination of *H. syriacus* Linn seeds[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2013, 19(8): 95–98

[40] 廖上强, 陈延华, 李艳梅, 等. 减量灌溉条件下缓释肥料对番茄产量、品质及硝态氮淋溶的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (6): 70–75
LIAO S Q, CHEN Y H, LI Y M, et al. Effect of slow release fertilizer on yield and quality of tomato and NO_3^--N leaching under reduction irrigation condition[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015, (6): 70–75

[41] 赵峥, 吴淑杭, 周德平, 等. 基于 DNDC 模型的稻田氮素流失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2405–2412
ZHAO Z, WU S H, ZHOU D P, et al. Modeling N loss from paddy fields and sensitivity analysis with DNDC Model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(12): 2405–2412

[42] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 水肥耦合对华北高产农区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 532–539
ZHANG Y M, ZHANG J B, HU C S, et al. Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 532–539

[43] 张春霞, 文宏达, 刘宏斌, 等. 优化施肥对大棚番茄氮素利用和氮素淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1139–1145
ZHANG C X, WEN H D, LIU H B, et al. Effect of optimum fertilization on nitrogen use efficiency and nitrate leaching in the greenhouses[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(5): 1139–1145

[44] 孙媛. 不同水肥管理下华北菜地氮素损失及水氮利用效率定量评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
SUN Y. Quantitative evaluation of nitrogen loss and water and nitrogen use efficiency in North China vegetable fields under different water and fertilizer management[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013

[45] 舒晓晓, 门杰, 马阳, 等. 减氮配施有机物质对土壤氮素淋失的调控作用[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 186–191
SHU X X, MEN J, MA Y, et al. Regulation of reduced nitrogen and organic matter application on nitrogen leaching[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 186–191

[46] 孙泽东, 马兴华. 滴灌施肥对作物生长及土壤氮素特征影响的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(5): 164–170
SUN Z D, MA X H. Research progress on effects of drip fertilization on plant growth and soil nitrogen characteristics[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(5): 164–170

[47] 殷冠羿, 胡克林, 李品芳, 等. 不同水肥管理对京郊设施菜地氮素损失及氮素利用效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2403–2412
YIN G Y, HU K L, LI P F, et al. Nitrogen loss and use efficiency in greenhouse vegetable soil under different water and fertilizer managements[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12): 2403–2412