

# Meta 分析养分管理措施对菜田土壤硝酸盐累积淋溶阻控效应

金玉文, 芦远闯, 许华森, 李文超, 孙志梅\*

(河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071000)

**摘 要:** 根系密集层以下土壤剖面硝态氮累积导致的土壤氮淋溶是活性氮损失的主要途径, 然而不同养分管理措施对菜田土壤硝酸盐累积和淋溶的系统性影响尚不清楚。该研究通过搜集整理 2000—2021 年间发表的国内外相关文献数据, 分别以农民传统施肥(TF)、单施化肥(CF)和不添加抑制剂(WI)为对照组, 应用 Meta 分析方法整合分析了减量施氮(RF)、有机无机配施(OF)和抑制剂调控(IF)三种主要优化养分管理措施对菜田土壤硝酸盐累积淋溶的影响。结果表明, 与各自的对照相比, 三种养分管理措施均可以有效降低 0~100 cm 土壤剖面的硝酸盐累积量及淋溶量。RF、OF 和 IF 分别显著降低 0~100、60~80 和 0~80 cm 土层硝酸盐累积量; RF 的氮淋溶阻控效应值为-4.301, 硝酸盐淋溶量下降 43.19%; OF 的氮淋溶阻控效应值为-4.279, 淋溶量下降 36.79%, 但有机氮肥替代率大于 60%时阻控效应反而下降; 对于 IF 来说, 单施脲酶抑制剂或硝化抑制剂, 以及二者同时配施对硝酸盐淋溶均具有显著的阻控效应, 但以二者同时配施最好, 效应值为-4.373, 淋溶量下降 37.12%。施氮量和水分投入量是影响菜田硝酸盐累积淋溶的两个主要因素, 二者总的贡献度达 43.2%~47.3%。综合分析表明: 对于减氮施肥措施而言, 水分、纯氮投入量分别为 430.74 mm 和 646.53 kg/hm<sup>2</sup> 左右时, 减氮比例以 30%~50%为宜; 对于有机无机配施措施而言, 在土壤有机质含量较高的土壤上, 水分、纯氮投入量分别为 360.28 mm 和 432.18 kg/hm<sup>2</sup> 左右时, 有机肥替代化肥比例以 30%~60%为宜; 抑制剂调控氮素转化则以脲酶/硝化抑制剂配合施用效果最佳。该研究可为蔬菜生产中制定适宜的养分管理策略提供依据。

**关键词:** Meta 分析; 菜田; 减量施氮; 有机无机配施; 抑制剂调控; 硝酸盐累积; 硝酸盐淋溶

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.012

中图分类号: S365; S626

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-03-0103-09

金玉文, 芦远闯, 许华森, 等. Meta 分析养分管理措施对菜田土壤硝酸盐累积淋溶阻控效应[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 103-111. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.012 <http://www.tcsae.org>

Jin Yuwen, Lu Yuanchuang, Xu Huasen, et al. Inhibiting effects of nutrient managements on nitrate accumulation and leaching in vegetable soil: A meta-analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 103-111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.012 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

近年来, 随着农业产业政策的大力扶持和人民生活水平的提高, 中国蔬菜需求量和种植面积持续扩大。据统计, 2019 年中国蔬菜播种面积达  $2.09 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>, 占农作物总播种面积的 12.6%, 比 2010 年的  $1.74 \times 10^7$  hm<sup>2</sup> 增加了 16.7%, 蔬菜产量也从 2010 年的 57 264.86 万 t 增加到 2019 年的 72 102.56 万 t<sup>[1]</sup>。但当前的农业生产中, 农民往往通过过量施肥以追求更高的产量和经济效益, 其结果不仅提高了种植成本, 降低了经济效益, 而且降低了肥料利用率, 造成了严重的环境污染<sup>[2]</sup>。

氮肥利用率低是农业生产中普遍存在的问题, 尽管当前中国氮肥利用率已提高到 40%左右, 但与欧美等发达国家高达 70%的氮肥利用率相比仍有很大差距<sup>[3]</sup>。蔬菜生产体系氮素盈余量高, 土壤剖面氮素累积量高, 必然导致淋溶量也高。已有研究表明, 番茄收获后 0~100 cm

土壤硝态氮的累积量高达 613~869 kg/hm<sup>2</sup><sup>[4-5]</sup>, 施入农田的氮肥约有 30%通过淋溶进入地下水, 导致地下水硝态氮浓度升高<sup>[6]</sup>。氮在土壤剖面中的累积淋溶造成的环境问题已引起了国内外的广泛关注<sup>[7]</sup>。早在 20 世纪 80—90 年代, 一些发达国家已开始通过限定氮的施用量来控制地下水硝酸盐污染<sup>[8]</sup>, 如何在不影响产量的前提下通过养分的优化管理降低硝酸盐在土壤剖面中的累积淋溶已成了助推绿色农业发展过程中亟待解决的关键问题。养分的优化管理技术中以减量施氮、有机无机配施以及抑制剂调控研究较多, 但独立研究的结果会受到其特定试验条件的影响, 导致相关研究结果变异较大, 甚至有相反的结论。如高伟等<sup>[9]</sup>研究表明, 与只施用化肥相比, 有机无机配施显著减少了 57.5%的硝酸盐淋溶, 但李晓兰等<sup>[10]</sup>的研究却发现, 有机无机配施对降低硝酸盐淋溶的作用不显著; 张春霞等<sup>[11]</sup>研究表明, 优化施肥土壤硝态氮淋溶量比常规施肥减少了 54.9%, 但赵营等<sup>[12]</sup>的研究却发现黄瓜季优化施肥土壤硝态氮淋溶量比常规施肥略有增加; 尹兴等<sup>[13]</sup>发现氮肥配施硝化抑制剂显著降低温室番茄土壤硝态氮在 0~100 cm 土层的累积, 而赵伟鹏等<sup>[14]</sup>研究则发现, 配施抑制剂后黄瓜和紫甘蓝拉秧期 0~100 cm 剖面的硝态氮累积量均显著增加。Meta 分析可对

收稿日期: 2021-08-22 修订日期: 2022-01-11

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (20326909D)

作者简介: 金玉文, 研究方向为养分资源高效管理与利用。

Email: 1525980610@qq.com

\*通信作者: 孙志梅, 教授, 博士生导师, 研究方向为养分资源高效管理、植物营养调控。Email: sunzhm2002@163.com

多个具有共同研究目的且相互独立,但是彼此存在争议的研究结果进行系统合并,剖析研究间差异特征,定量综合评价研究结果。因此,本文采用 Meta 分析的方法,对 2000—2021 年总计 21 a 的相关文献结果进行汇总和整合分析,旨在进一步明确三种养分管理措施减少菜田土壤剖面硝酸盐累积和淋溶损失的技术效果,为基于环境友好的菜田养分高效管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集

本研究数据来源于知网、万方、维普中文数据库和 Web of science 英文数据库,以“有机无机配施”与“硝酸盐或硝态氮”“优化施肥或减量施氮”与“硝酸盐或硝态氮”“抑制剂(硝化抑制剂、脲酶抑制剂、氮素调控剂)”与“硝酸盐或硝态氮”为主要关键词进行文献检索。设置减量施氮(RF)、有机无机配施(OF)和抑制剂调控(IF)为试验组,分别以农民传统施肥(TF),按照农民个人意愿确定的施肥量,纳入本研究的农民传统施肥量变异较大,在 225~1000 kg/hm<sup>2</sup>之间,平均为 646.53 kg/hm<sup>2</sup>、单施化肥(CF,施肥量在 200~607 kg/hm<sup>2</sup>,平均为 432.18 kg/hm<sup>2</sup>)和不添加抑制剂(WI)为对照组,分析试验组三种养分管理措施对硝酸盐累积淋溶的影响。根据 Meta 分析方法中数据整合的要求和本研究的目的,基于以下 4 个标准对文献进行检索筛选:1)同一研究中必须包含农民传统施肥处理和减量施氮处理或单施化肥处理和有机无机配施处理或不添加抑制剂处理和抑制剂调控处理;2)文中须列出各种处理以每 20 cm 土层为间隔,在 0~100 cm 土层中的土壤硝态氮含量或者硝酸盐淋溶量(通过地下埋入淋溶盘收集淋溶液的方式获得);3)试验地种植模式、蔬菜施肥量、降水量、灌水量和土壤基本理化性质等基本信息要清晰;4)必须是菜田研究结果。搜索时间跨度为 2000—2021 年,共计 21 年。基于以上标准,共筛选出符合要求的文献 62 篇,获得 0~100 cm 土壤剖面硝酸盐累积量数据 377 组,硝酸盐淋溶数据 202 组。

### 1.2 数据提取

在 Meta 分析中,试验组和对照组的标准差及重复次数是非常重要的参数。若原文献明确列出了样本量、均值及标准偏差(或标准误差),则直接提取数据;若文献中没有直接提供标准偏差,但列出各处理的多个重复试验数据时,则将试验数据整理到 Excel 中得出均值和标准差;若文献中只有以上数据的图表,则使用 GetData Graph Digitizer 软件进行数据提取。

### 1.3 数据计算

在 Excel 表中分别建立三种养分管理措施的硝酸盐累积量和淋溶量(不同研究界定的淋溶深度不同,纳入本研究的淋溶深度在 40~90 cm 之间)的均值、标准差和重复数( $n$ )数据库。

文献中只提供标准误(Standard Error, SE)的,通过公式(1)转化为标准差(Standard Deviation, SD):

$$SD = SE\sqrt{n} \quad (1)$$

统计学指标采用响应比(Response Ratio, RR)表示,用公式(2)进行计算,并用公式(3)将其对数化为效应值(lnRR),以反映试验组对硝酸盐累积、淋溶的阻控程度:

$$RR = \frac{A_t}{A_c} \quad (2)$$

$$\ln RR = \frac{\ln A_t}{\ln A_c} = \ln A_t - \ln A_c \quad (3)$$

式中  $A_t$  和  $A_c$  分别为试验组和对照组硝酸盐累积量或淋溶量的平均值, kg/hm<sup>2</sup>。

对每个独立试验的效应值进行加权,得到加权效应值(Weighted effect size,  $RR_{++}$ ),以反映三种不同养分管理措施对硝酸盐累积、淋溶的阻控程度,由公式(4)计算:

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \ln RR_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (4)$$

式中  $\ln RR_i$  为第  $i$  个试验的效应值,  $w_i$  第  $i$  个试验的权重系数,用平均值的变异系数( $V$ )的倒数表示,由公式(5)计算,  $V$  则通过公式(6)计算得出:

$$w_i = \frac{1}{V} \quad (5)$$

$$V = \frac{SD_t^2}{A_t^2 n_t} + \frac{SD_c^2}{A_c^2 n_c} \quad (6)$$

式中  $SD_t$  和  $n_t$  分别为试验组的标准差和样本数;  $SD_c$  和  $n_c$  分别为对照组的标准差和样本数。

$RR_{++}$  的 95% 置信区间(95%CI)通过式(7)计算。95%CI 若未与零点线( $x=0$ )交叉,则表示与对照组相比,试验组对硝酸盐累积淋溶影响显著,反之则表示没有显著影响;若全部落在负半轴,表示对硝酸盐累积淋溶有阻控效应,反之则表示有促进效应。 $RR_{++}$  的标准差  $S(RR_{++})$  通过式(8)计算:

$$95\%CI = RR_{++} \pm 1.96S(RR_{++}) \quad (7)$$

$$S(RR_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i}} \quad (8)$$

### 1.4 数据处理方法

在进行 Meta 分析时,需对收集的相关数据进行异质性检验( $Q$  检验)和正态分布检验。若  $P>0.05$  (卡方检验),表明数据不存在异质性,选用固定效应模型(fixed effect model);若  $P<0.05$ ,则用随机效应模型(random effect model)<sup>[15]</sup>。本研究数据经卡方检验  $P<0.05$ ,因此选用随机效应模型。对三种养分管理措施与对照处理硝酸盐累积和淋溶的效应值进行正态分布检验,  $P<0.05$ ,符合整合分析的要求<sup>[16]</sup>。以上数据处理均在 Stata 14.0 软件中进行,使用 Origin 2019b 作图。

应用 R 软件中的局部加权回归散点平滑法分别对减

量施氮、有机无机配施两种养分管理措施下的硝酸盐淋溶量数据进行分析,观察其在局部展现出的规律和趋势,进一步研究不同减量比例和有机肥施用比例对硝酸盐淋溶的影响。

采用 R 语言中的“Random Forest”软件包对影响硝酸盐淋溶的因子贡献度进行评价<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 三种养分管理措施对硝酸盐累积的影响

#### 2.1.1 减量施氮对硝酸盐累积的影响

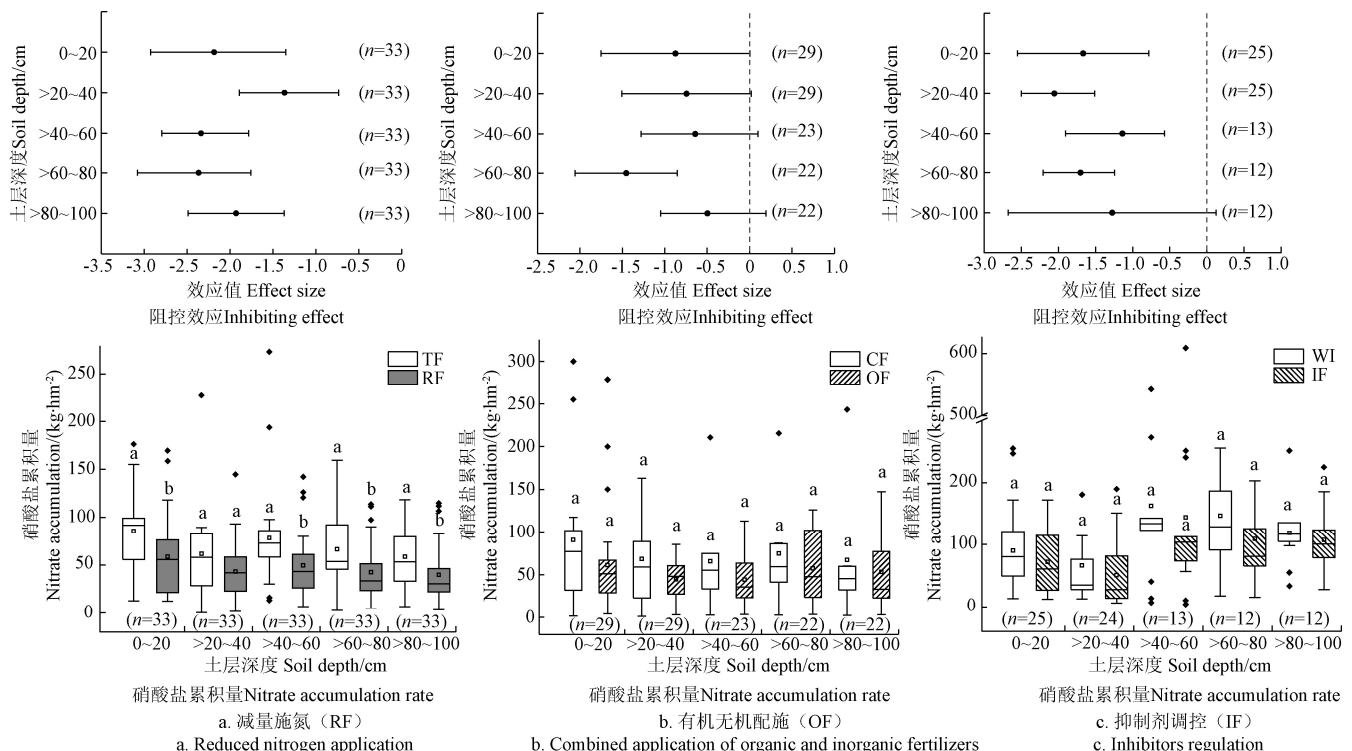
Meta 分析结果表明(图 1a),与传统施肥相比,减量施氮(RF)对 0~100 cm 各土层硝酸盐累积量的阻控效应均达到了显著水平,效应值自上到下分别为-2.187、-1.366、-2.339、-2.368 和-1.931。传统施肥(TF)和 RF 的土壤硝酸盐累积量基本上均表现出随土层深度的增加而下降的趋势。与 TF 相比,RF 处理>20~40 cm 土层的硝酸盐累积量差异不显著,但>40~60 和>60~80 cm 土层分别显著降低了 36.30%和 36.74%;0~20 和>20~40 cm 土层分别显著降低了 31.19%和 29.60%。

蔬菜一般为浅根系作物,根系密集层主要集中在 0~40 cm 土层,多数蔬菜根系分布更浅<sup>[18]</sup>,这就意味着蔬菜田 40 cm 以下土壤中的氮素很难被蔬菜吸收利用。因此,以 40 cm 以上土层为蔬菜有效养分供应层,由图 1a 可以

看出,TF 处理 0~40 和>40~100 cm 土层硝酸盐累积量分别为 73.62 和 203.13 kg/hm<sup>2</sup>,分别占 0~100 cm 土层硝酸盐累积总量的 21.01%和 78.99%。而 RF 处理 0~40 cm 土层硝酸盐累积量提高到 102.28 kg/hm<sup>2</sup>,占 0~100 cm 土层硝酸盐累积总量的比例达到 43.63%,>40~100 cm 土层硝酸盐累积量降为 132.15 kg/hm<sup>2</sup>,占 0~100 cm 土层硝酸盐累积总量的比例下降到 56.37%。

#### 2.1.2 有机无机配施对硝酸盐累积的影响

图 1b 结果表明,相较于单施化肥(CF),有机无机配施(OF)显著降低 60~80 cm 土层硝酸盐累积量,效应值为-1.454,对其他土层的影响不显著。对 0~100 cm 土层硝酸盐累积量进行统计分析,结果表明,OF 处理 0~20 cm 土层硝酸盐累积量下降了 21.37%,>60~80 cm 下降幅度最大,为 23.12%,>80~100 cm 土层下降幅度最小,为 18.64%。CF 处理 0~40 和>40~100 cm 土层硝酸盐累积量分别为 159.02 和 207.44 kg/hm<sup>2</sup>,分别占到了 0~100 cm 土层硝酸盐累积总量(366.46 kg/hm<sup>2</sup>)的 43.39%和 56.61%。而 OF 在 0~40 和>40~100 cm 土层的硝酸盐累积量占 0~100 cm 土层硝酸盐累积总量的比例分别为 40.61%和 59.39%,与 CF 相比虽然差异不大,但 0~40 和>40~100 cm 土层的硝酸盐累积量分别下降到 106.10 和 155.19 kg/hm<sup>2</sup>,分别下降了 33.28%和 25.19%,0~100 cm 剖面的硝酸盐累积总量比 CF 下降了 28.73%。



注:不同小写字母表示同一土层处理间硝酸盐累积量差异显著( $P<0.05$ )。减量施氮、有机无机配施和抑制剂调控的对照组分别为农民传统施氮量(TF)、单施化肥(CF)和不添加抑制剂(WI),下同。

Note: Different lowercase letters indicate the significant difference in nitrate accumulation between treatments of the same soil layer ( $P<0.05$ ). Reduced nitrogen application (RF), combined application of organic and inorganic fertilizers (OF), and inhibitor regulation (IF) were compared with the conventional nitrogen application (TF), single fertilizer application (CF) and no inhibitor application (WI), respectively, the same below.

图1 三种养分管理措施对硝酸盐累积的阻控效应

Fig.1 Inhibiting effect of three nutrient management measures on nitrate accumulation

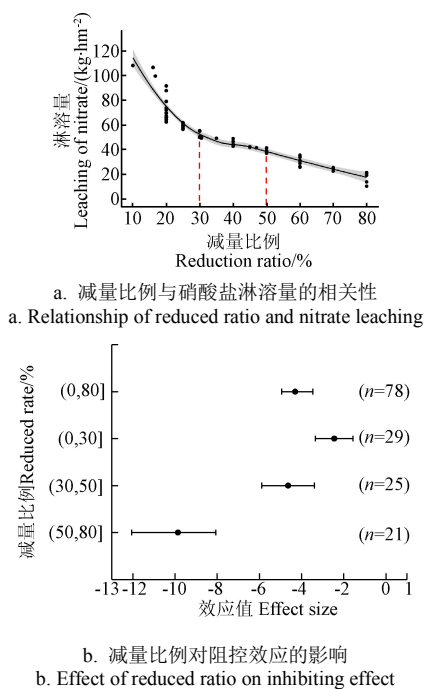
### 2.1.3 抑制剂调控对硝酸盐累积的影响

如图 1c 所示, 抑制剂调控 (IF) 可以显著降低 0~80 cm 土层硝酸盐累积量, 尤其对 >20~40 和 >60~80 cm 土层抑制效果最好, 效应值分别达到了 -2.054 和 -1.702, 但对 >80~100 cm 土层硝酸盐累积量影响不显著。0~100 cm 土层硝酸盐累积量的分布结果表明, 无抑制剂处理 (WI) >40~100 cm 土层硝酸盐累积量 428.05 kg/hm<sup>2</sup>, 而 IF 处理降为 360.2 kg/hm<sup>2</sup>, 下降了 15.85%。可见抑制剂的施用显著降低了蔬菜根区以下的硝酸盐累积量。但 WI 和 IF 处理根系密集层以下剖面中的硝酸盐累积量占 0~100 cm 土体中总累积量的比例仍分别高达 73.71% 和 74.94%。

## 2.2 三种养分管理措施对硝酸盐淋溶的影响

### 2.2.1 减量施氮对硝酸盐淋溶的影响

图 2a 结果显示, 氮肥减量比例在 0~30% 时, 随氮肥减施量的增加硝酸盐淋溶量显著下降; 当减量比例达到 30%~50% 时, 淋溶量下降速率变缓; 但当减量比例达到 50% 以上时, 淋溶量又明显下降。总体减量比例与硝酸盐淋溶量表现出了显著的负相关关系 ( $P<0.01$ )。依此对提取的文献中关于氮肥减量比例的数据进行分组, 计算了不同减量比例下菜田土壤硝酸盐淋溶的效应值。结果显示 (图 2b), RF 效应值为 -4.301, 95% 置信区间 (95%CI) 为 -4.944~-3.457。与对照相比, 硝酸盐淋溶量平均下降 43.19%, 而且随着减量比例的增加, 降低效果也随之提高。当减量比例达到 50%~80% 时, 硝酸盐淋溶量相较于对照显著降低了 70.61%。说明施肥量的多少直接影响硝酸盐向下层土壤的淋溶量。



注: 图中阴影部分代表 95% 置信区间。下同。  
Note: Shaded part in figure represents the 95% confidence interval. Same below.

图 2 减量施氮对硝酸盐淋溶的阻控效应  
Fig.2 Inhibiting effect of reduced nitrogen application (RF) on nitrate leaching

### 2.2.2 有机无机配施对硝酸盐淋溶的影响

图 3a 结果表明, 有机肥替代比例与硝酸盐淋溶量之间呈二次曲线分布。当有机肥比例小于 30% 左右时, 硝酸盐淋溶量随有机肥替代比例的增加明显下降; 有机肥比例在 >30%~60% 时, 淋溶量随有机肥替代比例的增加变化不明显; 但当有机肥替代比例大于 60% 时, 淋溶量又随替代比例的增加显著上升。总体而言, OF 阻控硝酸盐淋溶的效应值为 -4.279, 95%CI 为 -5.051~-3.606, 与 CF 相比, 硝酸盐淋溶量平均下降 36.79%。且配施比例不同影响效果也不同 (图 3b), 有机肥替代比例在 0~30% 时, 硝酸盐淋溶量下降达 33.27%; 有机肥替代比例为 >30%~60% 时, 下降 39.61%; 而有机肥替代比例达 >60%~90% 时, 下降率却只有 32.75%。这说明在一定范围内, 随着有机肥替代比例的增加, 阻控硝酸盐淋溶的效果增强, 但当有机肥替代比例增加到 60% 以上时, 阻控硝酸盐淋溶损失的效果反而降低, 硝酸盐淋溶风险也相应增加。

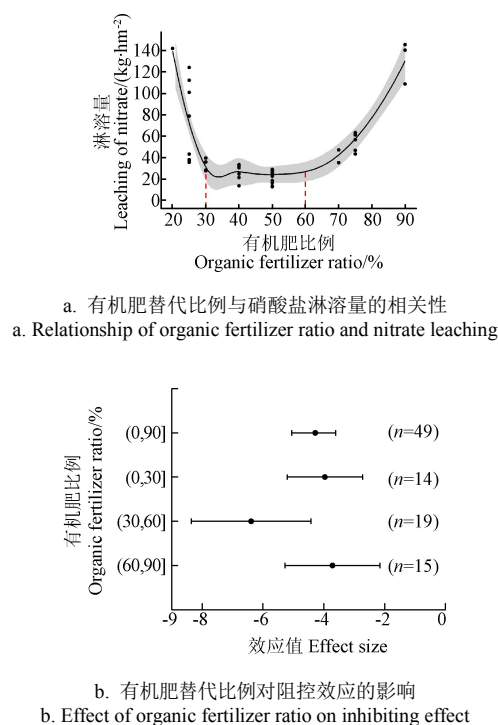


图 3 有机无机配施对硝酸盐淋溶的阻控效应  
Fig.3 Inhibiting effect of combined application of organic and inorganic fertilizers (OF) on nitrate leaching

### 2.2.3 抑制剂调控对硝酸盐淋溶的影响

在本研究中, 脲酶抑制剂、硝化抑制剂及其二者配施均可以显著降低土壤硝酸盐淋溶量 (图 4), 总效应值为 -2.557, 95%CI 为 -3.145~-1.969。与 WI 相比, 硝酸盐淋溶量下降幅度为 33.82%~37.12%, 平均下降率为 34.53%。脲酶、硝化抑制剂配施效果最好, 效应值为 -4.373, 淋溶量下降率为 37.12%; 单独施用硝化抑制剂的次之, 淋溶量下降率为 35.42%; 脲酶抑制剂单独施用的效果最差, 淋溶量下降率为 33.82%。

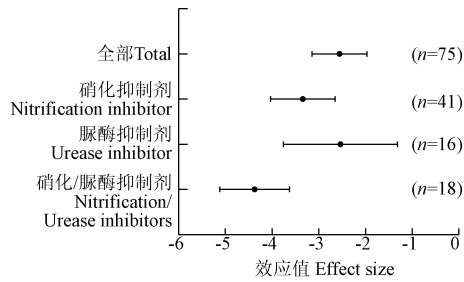


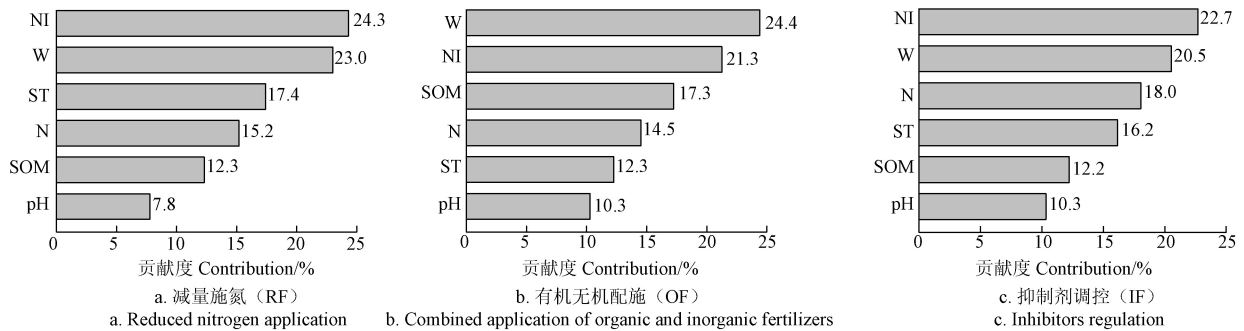
图4 抑制剂调控对硝酸盐淋溶的阻控效应

Fig.4 Inhibiting effect of inhibitor regulation on nitrate leaching

### 2.3 影响硝酸盐淋溶的因子贡献度分析

土壤硝酸盐的淋溶强度受多种因素的综合作用,施氮量、水分输入量、土壤氮素含量与硝态氮淋溶均呈显著相关关系<sup>[19]</sup>,此外硝酸盐淋溶还与土壤质地、肥力水平等有关<sup>[20]</sup>。因此,提取所有文献中的主要土壤参数,对影响硝酸盐淋溶的因子贡献度进行分析,结果表明(图5),水分投入量、施氮量及质地、有机质、pH

值等土壤基本理化性状对三种措施阻控硝酸盐淋溶的效果均有一定程度的影响。其中施氮量和水分投入量的贡献率均在20%以上,二者总的贡献度可以达到43.2%~47.3%。影响RF和IF阻控效应的主要因素是施氮量,贡献度分别达24.3%和22.7%;而影响OF阻控硝酸盐累积淋溶效应的主要因素则是水分投入量,贡献度为24.4%。其他因素在不同养分管理措施下的贡献度略有不同,但基本都在10%~20%之间。在减量施氮条件下,土壤质地和硝态氮含量对硝酸盐淋溶的贡献程度仅次于施氮量和水分投入量,分别占到了17.4%和15.2%(图5a);在有机无机配施条件下,土壤有机质、土壤硝态氮含量和土壤质地对硝酸盐淋溶的影响较大,分别占到了17.3%、14.5%和12.3%,而pH影响相对较小,贡献度为10.3%(图5b)。对于抑制剂调控措施来说,土壤硝态氮含量、土壤质地、有机质含量和pH对硝酸盐淋溶的贡献度占比分别为18.0%、16.2%、12.2%和10.3%(图5c)。



注: W: 水分投入量(包括降水和灌溉); NI: 施氮量; ST: 土壤质地; SOM: 土壤有机质含量; pH: 土壤酸碱度; N: 土壤硝态氮含量。  
Note: W: Water input (including precipitation and irrigation); NI: Nitrogen application rate; ST: Soil texture; SOM: Soil organic matter content; pH: N: Soil nitrate content.

图5 影响菜田硝酸盐淋溶主要因素的贡献度

Fig.5 Contribution of main factors affecting nitrate leaching in vegetable fields

## 3 讨论

### 3.1 菜田土壤硝酸盐累积现状分析

过量氮肥的投入会导致土壤中硝酸盐大量累积,当灌溉和降水量超过田间持水量时则会引起氮的淋溶。欧盟规定,大田作物收获后0~90 cm土壤硝态氮不宜超过90~100 kg/hm<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。N<sub>min</sub>目标值系统(KNS)研究表明,不造成土壤氮淋溶的0~90 cm土层最高土壤N累积量为100 kg/hm<sup>2</sup><sup>[22]</sup>。氮素专家系统也发现,绝大多数蔬菜生产系统根系土壤N累积量在100 kg/hm<sup>2</sup>以内不容易造成氮素的淋溶损失<sup>[23]</sup>。而本研究对87个菜田土壤0~100 cm剖面的硝酸盐累积结果进行统计分析发现,对照组的硝酸盐累积量为50.96~869.40 kg/hm<sup>2</sup>,平均高达344.07 kg/hm<sup>2</sup>,TF、CF和WI处理0~100 cm土壤中硝酸盐累积量平均值分别为350.38、366.45和581.29 kg/hm<sup>2</sup>。尽管RF、OF和IF分别降低了33.09%、28.70%和17.31%,但仍旧分别高达234.44、261.28和480.67 kg/hm<sup>2</sup>,远高于硝酸盐累积量的安全阈值。进一步分析发现,RF、OF和IF在蔬菜根系主要分布层0~40 cm的硝酸盐累积量分别为102.28、106.1和120.47 kg/hm<sup>2</sup>,

与氮素专家系统推荐施氮量相近。但40 cm土层以下的无效氮素占比仍分别高达56.37%、59.39%和74.94%,在灌溉量较大和降雨量较大的情况下,势必存在很大的淋溶风险。因此,在高水肥投入的蔬菜生产体系,还需要进一步优化养分管理策略,以降低蔬菜体系特别是根系密集层以下土壤中的硝酸盐累积量,这是减少农田生态系统硝酸盐淋溶,并进而缓解氮素环境风险的关键所在。

### 3.2 减量施氮对硝酸盐累积淋溶的影响

已有研究表明,氮肥的大量施用是造成氮素淋失和地下水硝酸盐严重污染的主要原因<sup>[24]</sup>,因此,控制氮肥施用量以减少土壤剖面中的硝酸盐累积是阻控硝酸盐淋溶的首要措施。纳入本研究的TF和RF的平均施氮量分别为646.53和376.40 kg/hm<sup>2</sup>,在平均节肥率42.42%的情况下,RF的0~100 cm土层硝酸盐累积量降低了33.09%,硝酸盐淋溶量下降了43.19%,效果显著。RF的阻控效果与减量比例呈正相关关系,当减量比例达50%~80%时,阻控效应达到了70.61%。但减量比例是一个相对值,除受传统施氮量影响外,土壤肥力水平和水分投入量是影响减肥比例和节肥效应的另两个关键因素。如Zhang等<sup>[25]</sup>的研究中土壤有机质和硝态氮含量显著低于Min等<sup>[26]</sup>的



研究, Zhang 等得出的最适减量比例也低于 Min 等的结果。纳入本研究的试验减量施氮比例在 10%~80%之间, 减量比例变异较大, 且当减量比例超过 50%时, 开始出现了增产、减产以及产量不受影响三种不同的试验结果。本研究 TF 处理纯氮投入量平均为 646.53 kg/hm<sup>2</sup>, 水分投入量平均为 430.74 mm, 因此, 在相似水肥投入量的一般肥力水平的菜田土壤中, 实际生产中的减肥比例应控制在 30%~50%为宜。

### 3.3 有机无机配施对硝酸盐累积淋溶的影响

有机无机配施的养管理措施既能满足作物对养分的需求, 又能将化肥提供的养分保蓄在土壤中, 同时有机肥还可以为微生物提供碳源, 提高微生物活性, 加速养分的循环转化<sup>[27]</sup>, 改良土壤<sup>[28]</sup>。此外, 增施有机肥还能够降低土壤硝酸盐的积累, 但过量施用有机肥料也会造成土壤硝酸盐的富集甚至淋失<sup>[18,29]</sup>。本文通过对大量研究结果的整合分析(图 4b)也证明了这一点, 在与单施化肥等氮投入和等水分投入的情况下, 有机肥施用比例在 30%~60%之间对硝酸盐的阻控效果最好, 但当有机肥的比例超过 60%时, 阻控效应明显下降。纳入本研究的土壤有机质平均值为 23.17 g/kg, 说明菜田土壤有机质总体较丰富。但较高的土壤有机质含量会使得土壤容重降低, 大孔隙增加<sup>[30]</sup>, 这样就必然会加大氮素随水分向土体下层淋溶的可能; 同时长期大量外源有机肥的投入一方面会导致可溶性有机氮的淋溶增加<sup>[31-32]</sup>; 另一方面也会通过显著提高土壤微生物种群数量和活性, 加快有机氮矿化为无机氮的进程, 通过提高土壤硝化细菌的数量和活性, 再进一步加速土壤的硝化作用过程, 从而导致土壤剖面硝酸盐累积量和淋溶量的增加。而徐大兵等<sup>[33]</sup>的研究中, 尽管有机肥的施用比例在 25%~100%的范围内, 硝酸盐淋溶量仍旧表现出了随有机肥比例的增加逐渐下降的结果, 在保证产量不降低的情况下, 明确了大白菜季的替代比例以 25%~50%为宜。对有机无机配施条件下影响硝酸盐累积淋溶的主要因素进行分析, 结果表明, 以水分的影响最大, 对硝酸盐淋溶的贡献度达到了 24.4%。这主要是因为土壤水分是硝酸盐运移的主要驱动力, 在有机质含量高而容重较低、孔隙度较大的菜田土壤上, 水分作为硝酸盐淋溶的驱动力作用更加凸显。此外, 土壤水分的高低还会通过影响土壤的通气状况直接影响土壤的微生物活性, 进而影响有机氮的矿化和硝化作用进程<sup>[34]</sup>。纳入本研究的 CF 处理施氮量平均为 432.18 kg/hm<sup>2</sup>, 水分投入量平均为 360.28 mm, 根据本研究结果, 在与此水氮投入水平基本相当的蔬菜生产中, 有机肥的替代比例以 30%~60%为宜。

### 3.4 抑制剂调控对硝酸盐累积淋溶的影响

施用抑制剂调控氮素的转化过程是降低土壤剖面硝酸盐累积和氮素淋失风险的一项重要措施。脲酶抑制剂通过延缓尿素水解降低土壤溶液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的浓度; 硝化抑制剂主要是通过抑制亚硝化细菌的活性, 阻止 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的第一步氧化, 使氮肥较长时间以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>形式保持在土壤中, 从而减少 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的累积, 进而控制 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的形成。二者分别

对尿素 N 转化某一特定过程产生作用, 配合施用则对尿素氮转化的全过程进行有效调控<sup>[35]</sup>。不少研究表明, 施用抑制剂可以显著降低硝酸盐淋溶量<sup>[36-37]</sup>。本研究通过对大量文献的整合分析也得出了类似结论, 且以脲酶/硝化抑制剂配施降低硝酸盐累积淋溶效果最优。但赵伟鹏等<sup>[14]</sup>在连续 8 a 高水肥投入的设施菜田中进行的研究表明, 抑制剂的调控反而显著增加了 0~100 cm 土壤硝态氮累积量, 其原因认为一方面可能是由于施用抑制剂减少了氮的气态损失, 从而使得更多的氮素保留在土壤中, 增加了土壤中氮的存留。另一方面是因为施用抑制剂显著增加 0~100 cm 土壤硝态氮累积量, 实际上是避免了硝酸盐向更深层次土壤的淋溶。由此可见, 抑制剂调控对 100 cm 以内土层硝酸盐累积和淋溶的影响除了受施氮量的影响外, 还受土壤肥力条件以及水分管理措施等因素的显著影响。本研究对抑制剂调控影响硝酸盐累积淋溶的影响因素进行的整合分析也恰恰证明了这一点。

## 4 结 论

对近 21 年的相关文献进行整合分析的结果表明, 与农民传统施肥相比, 减量施肥显著降低 0~100 cm 土层硝酸盐累积量, 硝酸盐淋溶量下降 43.19%; 与单施化肥相比, 有机无机配施显著降低 60~80 cm 土层硝酸盐累积量, 硝酸盐淋溶量下降 36.79%; 与不添加抑制剂相比, 抑制剂调控显著降低 0~80 cm 土层硝酸盐累积量, 硝酸盐淋溶量下降了 34.53%。影响各技术措施阻控硝酸盐累积淋溶效应的因素主要是施氮量和水分投入量, 二者总的贡献度达 43.2%~47.3%。基于整合分析结果认为, 三种养分优化管理措施均可以在保证作物产量的同时, 有效降低菜田土壤硝酸盐的累积和淋溶损失。综上所述, 对于减氮施肥措施而言, 在水分、纯氮投入量分别为 430.74 mm 和 646.53 kg/hm<sup>2</sup>左右时, 减氮比例以 30%~50%为宜; 对于有机无机配施的养管理措施而言, 在有机质含量较高(23.17 g/kg)的土壤上, 当水分、纯氮投入量分别为 360.28 mm 和 432.18 kg/hm<sup>2</sup>左右时, 有机肥替代化肥比例以 30%~60%为宜; 抑制剂调控氮素转化则以脲酶/硝化抑制剂配合施用效果最佳。

### [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [2] 张万锋, 杨树青, 刘鹏, 等. 秸秆覆盖方式和施氮量对河套灌区夏玉米氮利用及产量影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 71-79.  
Zhang Wanfeng, Yang Shuqing, Liu Peng, et al. Effects of stover mulching combined with N application on N use efficiency and yield of summer maize in Hetao Irrigated District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21):71-79. (in Chinese with English abstract)
- [3] Liu J, You L, Manouchehr A, et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland[J].

- Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(17): 8035-8040.
- [4] 杨俊刚, 张鹏飞, 倪小会, 等. 施用控释肥对设施番茄  $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗、 $\text{N}_2\text{O}$  排放及产量与品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1849-1857.
- Yang Jungang, Zhang Pengfei, Ni Xiaohui, et al. Effects of controlled release fertilizer on soil nitrate leaching,  $\text{N}_2\text{O}$  emission and fruit yield and quality in green house tomato production system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9): 1849-1857. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张学科, 李惠霞, 张俛, 等. 滴灌条件下水氮减量对番茄氮素利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 45-50.
- Zhang Xueke, Li Huixia, Zhang Tan, et al. Effects of different water and nitrogen levels on nitrogen use efficiency under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [6] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200-205.
- Chuan Limin, Zhao Tongke, An Zhizhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 200-205. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨荣, 苏永中, 王雪峰. 绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 304-313.
- Yang Rong, Su Yongzhong, Wang Xuefeng. A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 304-313. (in Chinese with English abstract)
- [8] Smith K A, Anthony S G, Henderson D, et al. Critical drainage and nitrate leaching losses from manures applied to freely draining soils in Great Britain[J]. Soil Use and Management, 2003, 19(4): 312-320.
- [9] 高伟, 朱静华, 李明悦, 等. 有机无机肥料配合施用对设施条件下芹菜产量、品质及硝酸盐淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 657-664.
- Gao Wei, Zhu Jinghua, Li Mingyue, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of celery and soil nitrate leaching under greenhouse condition[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(3): 657-664. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李晓兰, 兰翔, 潘振鹏, 等. 有机肥及 DMPP 对蔬菜生产及硝态氮淋失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(2): 118-126.
- Li Xiaolan, Lan Xiang, Pan Zhenpeng et al. Influence of organic fertilizer and adding DMPP on vegetable production and the nitrate leaching[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(2): 118-126. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 Chunxia, Wen Hongda, Liu Hongbin, 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. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵莹, 张学军, 罗健航, 等. 施肥对设施番茄-黄瓜养分利用与土壤氮素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 374-383.
- Zhao Ying, Zhang Xuejun, Luo Jianhang, et al. Effect of fertilization on nitrogen leaching loss from soil and nutrients utilization by tomato and cucumber in greenhouse[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(2): 374-383. (in Chinese with English abstract)
- [13] 尹兴, 张丽娟, 李博文, 等. 氮肥与双氰胺配施对温室番茄生产及活性氮排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9): 1725-1734.
- Yin Xing, Zhang Lijuan, Li Bowen, et al. Effects of nitrogen fertilizer and dicyandiamide application on tomato growth and reactive nitrogen emissions in greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(9): 1725-1734. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵伟鹏, 王倩姿, 王东, 等. 设施大棚黄瓜-紫甘蓝轮作体系产量和土壤氮平衡对氮素调控剂的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6): 980-990.
- Zhao Weipeng, Wang Qianzi, Wang Dong, et al. Response of vegetable yields and soil nitrogen balance to nitrogen regulators in a greenhouse cucumber-purple cabbage rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(6): 980-990. (in Chinese with English abstract)
- [15] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995-3004.
- Cai Andong, Zhang Wenju, Yang Pinpin, et al. Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in china-based on meta-analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(15): 2995-3004. (in Chinese with English abstract)
- [16] 任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 143-150.
- Ren Keyu, Xu Minggang, Zhang Lu, et al. Response of grain crop yield to manure application in different regions of China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(1): 143-150. (in Chinese with English abstract)
- [17] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [18] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 178-185.
- Hao Xiaoyu, Zhou Baoku, Ma Xingzhu, et al. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2015, 31(16): 178-185. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张家鹏. 丹江口库区覆膜表层土壤硝态氮淋失与影响因素模拟研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2018.
- Zhang Jiapeng. Simulation of Nitrate Leaching and Influenceing Factors in Topsoil under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area[D]. Wuhan: Hubei University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙志梅, 薛世川, 彭正萍, 等. 影响土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失的因素及预防措施[J]. 河北农业大学学报, 2001(3): 95-99.
- Sun Zhimei, Xue Shichuan Peng Zhengping et al. The factors influencing loss of nitrate nitrogen in soil and precautionary measures[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2001(3): 95-99. (in Chinese with English abstract)
- [21] 黄正来, 姚大年, 马传喜, 等. 氮素供应对不同类型小麦品种籽粒产量和品质性状的影响[J]. 安徽农业大学学报, 1999(4): 414-418.
- Huang Zhenglai, Yao Danian, Ma Chuanxi, et al. Effects of nitrogen application on yield and quality traits of different wheat varieties[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 1999(4): 414-418. (in Chinese with English abstract)
- [22] Ziegler J, Strohmeier K, Brand T. Nitrogen supply of vegetables based on the "KNS-system"[J]. Acta Horticultural, 1996(428): 223-233.
- [23] 张宏彦, 陈清, 李晓林, 等. 利用不同土壤  $\text{N}_{\min}$  目标值进行露地花椰菜氮肥推荐[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 342-347.
- Zhang Hongyan, Chen Qing, Li Xiaolin, et al. Nitrogen recommendation of cauliflower based on different soil  $\text{N}_{\min}$  target values[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2003, 9(3): 342-347. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 57-64.
- Du Jun, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 57-64. (in Chinese with English abstract)
- [25] Zhang J, He P, Ding W, et al. Identifying the critical nitrogen fertilizer rate for optimum yield and minimum nitrate leaching in a typical field radish cropping system in China[J]. Environmental Pollution, 2021, 268(Part B): 115004.
- [26] Min J, Zhang H, Shi W. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Water Management, 2012, 111: 53-59.
- [27] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 119-128.
- Ren Fengling, Zhang Xubo, Sun Nan, et al. A Meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(1): 119-128. (in Chinese with English abstract)
- [28] 付丽军, 张爱敏, 王向东, 等. 生物有机肥改良设施蔬菜土壤的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 1-5.
- Fu Lijun, Zhang Aimin, Wang Xiangdong, et al. Advances on application of bio organic fertilizer for restoring facility vegetable soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [29] 龚文, 张怀志, 李永梅, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同有机肥用量的农田氮素流失研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(2): 16-20.
- Gong Wen, Zhang Huaizhi, Li Yongmei, et al. Study on nitrogen loss from different chicken manure application level under the in-situ simulated rainfall conditions in Dianchi lake watershed of Yunnan province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(2): 16-20. (in Chinese with English abstract)
- [30] 史艺杰, 王美艳, 徐胜祥, 等. 太湖流域典型设施蔬菜地土壤结构特征研究[J]. 土壤, 2020, 52(5): 1050-1056.
- Shi Yijie, Wang Meiyan, Xu Shengxiang, et al. Study on soil structure characteristics of typical greenhouse vegetable field in Taihu Lake region[J]. Soils, 2020, 52(5): 1050-1056. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 99-107.
- Zhang Hongwei, Kang Lingyun, Liang Bin, et al. Long-term heavy fertilization increases leaching risk of soil soluble organic nitrogen in vegetable greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 99-107. (in Chinese with English abstract)
- [32] 梁斌, 唐玉海, 王群艳, 等. 滴灌和施用秸秆降低日光温室番茄地氮素淋溶损失[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 78-85.
- Liang Bin, Tang Yuhai, Wang Qunyan, et al. Drip irrigation and application of straw reducing nitrogen leaching loss in tomato greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 78-85. (in Chinese with English abstract)
- [33] 徐大兵, 赵书军, 袁家富, 等. 有机肥替代氮肥对叶菜产量品质和土壤氮淋失的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊 1): 13-18.
- Xu Dabing, Zhao Shujun, Yuan Jiafu, et al. Chemical N fertilizer replaced with organic fertilizer affecting yield and quality of leaf vegetable and N leaching in soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(Supp.1): 13-18. (in Chinese with English abstract)
- [34] 章燕平. 环境因素对菜地土壤氮素转化及其生物学特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- Zhang Yanping. Effects of Environmental Factors on



- Nitrogen Transformation and Soil Biological Characteristics in Protected Vegetable Soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [35] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1611-1618.
- Sun Zhimei, Wu Zhijie, Chen Lijun, et al. Application effect, affect factors, and evaluation of nitrification inhibitor: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1611-1618. (in Chinese with English abstract)
- [36] 宁建凤, 崔理华, 艾绍英, 等. 两种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 144-151.
- Ning Jianfeng, Cui Lihua, Ai Shaoying, et al. Effects of two nitrification inhibitors on transformations of nitrogen in soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 144-151. (in Chinese with English abstract)
- [37] Wang D, Guo L, Zheng L, et al. Effects of nitrogen fertilizer and water management practices on nitrogen leaching from a typical open field used for vegetable planting in northern China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 913-921.

## Inhibiting effects of nutrient managements on nitrate accumulation and leaching in vegetable soil: A meta-analysis

Jin Yuwen, Lu Yuanchuang, Xu Huasen, Li Wenchao, Sun Zhimei<sup>\*</sup>

(College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Soil nitrogen leaching has been the main pathway of reactive nitrogen loss, which was caused by the accumulation of nitrate nitrogen in the soil profile below the dense layer of the root system. However, it is still unclear on the systemic effects of different nutrient managements on the soil nitrate accumulation and leaching in vegetable fields. In this study, a Meta-analysis was used to clarify the effects of reduced nitrogen application (RF), combined application of organic and inorganic fertilizers (OF), and inhibitor regulation (IF) on the accumulation and leaching of nitrate in vegetable soil. Taking the conventional nitrogen application (TF), single fertilizer application (CF) and no inhibitor application (WI) as control, respectively. Published studies from 2000 to 2021 were collected from the CNKI, Wanfang, Weipu (Chinese databases), and Web of Science database. A systematic literature search was conducted with the key words “organic and inorganic combined application” and “nitrate or nitrate nitrogen”, “optimal fertilization or reduced nitrogen application” and “nitrate or nitrate nitrogen”, “inhibitor (nitrification inhibitor, urease inhibitor, nitrogen regulators)” and “nitrate or nitrate nitrogen”. In the end, a total of 62 literatures were selected to obtain the 377 groups of nitrate accumulation data from 0-100 cm soil profile, and 202 groups of nitrate leaching data. The results showed that the three nutrient managements were effectively reduced the concentration of nitrate accumulation and leaching in the 0-100 cm soil profile, compared with the control. Specifically, the concentration of nitrate accumulation significantly decreased in the 0-100 cm soil profile for the RF, the 60~80 cm for the OF, and 0-80 cm for the IF, respectively, compared with the conventional TF, CF and WI. Among them, the RF showed the greatest inhibiting effect of soil nitrogen leaching, with an effect size of -4.301 and a decrease rate of 43.19%. The inhibiting effect size of nitrogen leaching and decrease rate were -4.279 and 36.79% in the OF, respectively. However, the inhibiting effect decreased significantly, when the substitution rate of organic nitrogen fertilizer was over 60%. There was a significant inhibiting effect in the IF treatment on the nitrate leaching, compared with the WI, especially, the combination of urease and nitrification inhibitor, with the effect size of -4.373, and the decrease rate of 37.12%, respectively. A software package “Random Forest” in the R programming language was used to determine the contribution rates of various influencing factors to nitrate leaching. Data analysis results showed that the nitrogen application rate and water input were the main influencing factors on the nitrate leaching, indicating the total contribution rates 43.2%-47.3% of the variance. In the RF, the contribution rates of soil texture and nitrate content to the nitrate leaching was the second, accounting for 17.4% and 15.2%, respectively. In the OF, the soil organic matter, soil nitrate content, and soil texture presented a great effect on the nitrate leaching, accounting for 17.3%, 14.5%, and 12.3%, respectively. Nevertheless, there was a relatively small effect of pH with a contribution rate of 10.3%. In the IF, the soil nitrate content, soil texture, and organic matter content shared the relatively high contribution to the nitrate leaching, accounting for 18.0%, 16.2%, and 12.2%, respectively. A comprehensive evaluation demonstrated that the appropriate nitrogen reduction ratio ranged from 30% to 50% for reduced nitrogen application measures, when the input amounts of water and nitrogen were 430.74 mm and 646.53 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. In the soil with high content organic matter, when the input amounts of water and nitrogen were 360.28 mm and 432.18 kg/hm<sup>2</sup>, respectively, the application proportion of organic fertilizer instead of chemical fertilizer was from 30% to 60% for combined application of organic and inorganic fertilizers measures. A combination of urease and nitrification inhibitor showed the greatest inhibiting effect for inhibitor regulation. This finding can provide valuable information for the decision-making on the appropriate strategies of nutrient management in vegetable production.

**Keywords:** meta-analysis; vegetable field; nitrogen application reduction; combined application of organic and inorganic fertilizer; inhibitor regulation; nitrate accumulation; nitrate leaching