



我国设施菜地表观氮平衡分析及其空间分布特征

丁武汉, 雷豪杰, 徐驰, 柯华东, 李虎

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0493>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

*农业资源与环境学报*. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对—以宁夏引黄灌区为例

张爱平, 高霁, 刘汝亮, 陈哲, 杨世琦, 杨正礼, 张晴雯

*农业资源与环境学报*. 2015(2): 175–184 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0334>

茭白-鸭共作系统中氮平衡及经济效益分析

张家宏, 王桂良, 王守红, 寇祥明, 杨建春, 徐荣, 朱凌宇, 韩光明, 毕建花

*农业资源与环境学报*. 2015, 32(5): 498–505 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0029>

轮作不同高粱品种阻控设施菜田氮素损失潜力研究

康凌云, 黄诗坤, 陈硕, 陈清

*农业资源与环境学报*. 2015(3): 215–221 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0336>

东北三省农田化肥氮地下淋溶污染等级评估

孙铖, 周华真, 陈磊, 沈珍瑶, 王洪媛, 刘宏斌

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(5): 405–411 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0318>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Wu-han, LEI Hao-jie, XU Chi, 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.



开放科学 OSID

# 我国设施菜地表观氮平衡分析及其空间分布特征

丁武汉, 雷豪杰, 徐 驰, 柯华东, 李 虎\*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘 要:**为定量评估区域设施菜地土壤氮素的输入输出平衡状况,探明土壤中氮素的基本去向和氮素潜在污染,从CNKI中文数据库和Web of Science等英文数据库中检索筛选出针对设施菜地氮循环研究的可用数据648组,对我国设施菜地表观氮素平衡进行了分析,并根据《全国设施蔬菜重点区域发展规划(2015—2020年)》中的蔬菜分区,探索了不同区域的氮平衡分布特征。结果表明,我国设施菜地每一生长季总体上表观氮平衡为正值,盈余量为49~1154 kg N·hm<sup>-2</sup>,均值为324 kg N·hm<sup>-2</sup>,氮肥利用率平均为18.6%。从氮素的输入途径来看,每季氮素总投入约为863 kg N·hm<sup>-2</sup>,以化肥和有机肥投入为主,分别为471、306 kg N·hm<sup>-2</sup>,灌溉水带入的氮也不容忽视,达到86 kg N·hm<sup>-2</sup>。从氮素的支出途径来看,每季氮素总支出为539 kg N·hm<sup>-2</sup>,其中除了作物生长从土壤中吸取大量的氮素(230 kg N·hm<sup>-2</sup>)外,以淋溶、硝化反硝化和氨挥发等形式损失的氮达到309 kg N·hm<sup>-2</sup>,占输出量的57.4%,超过了作物吸收带走的氮(42.6%)。每季区域氮平衡差异显著,其中,黄淮海与环渤海暖温区氮素盈余最高,达到441 kg N·hm<sup>-2</sup>,其较高氮投入和较低的作物吸收是造成农田土壤氮素大量盈余的主要原因,同时也存在较高的氮素损失,通过淋溶流失的氮达到186 kg N·hm<sup>-2</sup>。总体上,当前我国设施菜地整体表观氮平衡为正盈余,主要由于化肥和有机肥投入量大,但同时存在较高的氮素损失风险。降低氮素投入水平和提高作物的吸收利用率是有效的氮优化管理途径,尤其是在黄淮海与环渤海暖温区,应减少氮素投入,重点关注氮素淋溶损失。

**关键词:**表观氮平衡;设施蔬菜;氮肥利用率;氮输入;氮输出

中图分类号:S143.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)03-0353-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0493

## Characteristics and spatial distribution of apparent nitrogen balance in the greenhouse vegetable cropping system in China

DING Wu-han, LEI Hao-jie, XU Chi, KE Hua-dong, LI Hu\*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Quantitative assessment of nitrogen (N) balance in greenhouse vegetable fields could enhance our understanding of N loss path in soil and its potential environmental pollution, which could be beneficial for the green development of intensive greenhouse vegetable production in China. In this study, we analyzed N balance and its spatial distribution in greenhouse vegetable fields based on 648 groups of available data selected from the CNKI and Web of Science according to the *National Key Area Development Plan of Greenhouse Vegetables (2015—2020)*. Our results showed that the apparent nitrogen balance of greenhouse vegetable fields was positive in every growing season (49~1154 kg N·hm<sup>-2</sup>), and the mean was 324 kg N·hm<sup>-2</sup>. The mean nitrogen use efficiency (NUE) of greenhouse vegetable fields was

收稿日期:2019-09-30 录用日期:2019-12-27

作者简介:丁武汉(1995—),男,河南信阳人,硕士研究生,从事农田生态系统碳、氮循环研究。E-mail:dingwuhan\_1995@163.com

\*通信作者:李 虎 E-mail:lihu0728@sina.com

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015);国家自然科学基金项目(41671303);国家重点研发计划项目(2018YFD0800402)

**Project supported:** Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS(CAAS-XTCX2016015); The National Natural Science Foundation of China(41671303); The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800402)

18.6%. Regarding N input, the total nitrogen input per growing season was approximately  $863 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Chemical fertilizer and organic fertilizer were two major sources ( $471 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  vs  $306 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) of nitrogen, and the nitrogen contributed by irrigation water could not be ignored ( $86 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). Regarding N output, the total nitrogen output per growing season was approximately  $539 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  and the percentages absorbed by crops and lost to the environment (leaching, nitrification and denitrification, and  $\text{NH}_3$  volatilization) were 42.6% and 57.4%, respectively. The distribution of N balance exhibited a spatial heterogeneity pattern. The N surplus in the Huang-Huai-Hai and the warm temperature area around the Bohai Sea were the highest ( $441 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). The main reasons were the large amount of nitrogen input and low crop absorption. In addition, the nitrogen loss in this area was also high, and the leaching loss reached  $186 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Our result suggested that the overall apparent nitrogen balance of Chinese vegetable fields showed a positive surplus, mainly owing to the large amounts of chemical fertilizer and organic fertilizer input, but there was a high risk of nitrogen loss. Reducing N input as well as improving crop uptake and NUE may be promising ways to optimize N management. It is necessary to reduce nitrogen input and mainly focus on nitrogen leaching losses, especially in Huang-Huai-Hai and the warm temperature area around the Bohai Sea.

**Keywords:** apparent nitrogen balance; greenhouse vegetable; nitrogen use efficiency (NUE); nitrogen input; nitrogen output

我国用占全球52%的蔬菜种植面积贡献了59%的蔬菜总产量,单位面积蔬菜产量是全球的1.13倍<sup>[1]</sup>。菜地生态系统相对于一般的粮食作物生态系统具有复种指数高、水肥施用量大、土壤中氮磷等养分累积量高等特点<sup>[2-4]</sup>。有研究指出,每季常规蔬菜种植的推荐氮肥用量为 $150\sim 300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[5]</sup>,但为了高收益、高产,氮肥过量施用的现象越来越普遍。山东寿光大棚黄瓜单季化肥氮施用量达到 $1816 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,远超蔬菜实际需要<sup>[6-7]</sup>。从种植地区看,山西南部地区设施菜地施氮量为 $1500\sim 3200 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[8]</sup>,而辽宁省设施菜地施氮量最高甚至达到 $3000 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[9]</sup>。据估计,施用于作物的氮素有近一半未被利用<sup>[10]</sup>,长此以往会导致地下水污染<sup>[11-12]</sup>、硝态氮累积<sup>[13]</sup>和土壤酸化<sup>[12,14]</sup>等一系列环境问题。

氮素平衡是指氮素输入和输出的平衡关系,它不仅对提高生产力和土壤质量具有借鉴意义,而且还可提高我们对潜在环境影响的预估能力,此外,量化氮平衡还是评价农业生态系统和环境影响的敏感指标<sup>[15]</sup>,可为改进农业管理决策提供依据。国内外对氮素平衡的研究很多,但大都集中在特定点位上农业种植体系土壤氮平衡<sup>[16-17]</sup>、区域农田氮平衡时空变化<sup>[18-20]</sup>,以及建立农田生态系统氮素平衡模型和利用模型进行预测等<sup>[21-22]</sup>。而针对设施菜地种植模式下的氮素平衡的研究却鲜有报道<sup>[15,17]</sup>。尽管目前对一些粮食作物,如小麦、玉米、水稻等,种植体系中的氮平衡有了比较宏观的了解<sup>[21-23]</sup>,但是与设施蔬菜系统氮输入和氮输出平衡相关的分析和定量研究结果却很少。部分研究<sup>[24-25]</sup>报道了我国大陆蔬菜生产系统氮循环研究进展及其环境影响进展情况,但大部分研究都侧重于研究氮平衡过程中的某单个

环节或过程,所以导致系统估算设施菜地生产系统的资料和数据不完整<sup>[10,15,26]</sup>。因此,研究设施菜地蔬菜-土壤系统表观氮素平衡具有现实意义。

本研究搜集了覆盖我国大陆地区18个省份的648组设施菜地数据,汇总分析了蔬菜种植在区域和全国尺度下的表观氮素平衡,从而在摸清氮素损失途径基础上,为设施菜地施肥管理提供合理的指导,并对降低氮素损失、有效解决蔬菜种植引起的生态环境问题具有极大的帮助。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

基于中国知网CNKI中文数据库(包括中国学术期刊网络出版总库、中国博士学位论文全文数据库、中国优秀硕士学位论文全文数据库、中国重要会议论文全文数据库、国际会议论文全文数据库)和Web of Science英文数据库(包括ScienceDirect、Springer Journals、American Chemical Society、Nature)的检索,按照如下标准进行文献筛选:①试验地在我国大陆;②试验起止年份清楚;③试验氮肥施用量明确;④至少有明确的作物吸收、带走氮量或作物产量。最终筛选获得自2005年以来已发表可用文献64篇,包含设施菜地数据648组,以温室大棚为主,覆盖18个省份,因此绝大部分数据都具有很好的代表性。

### 1.2 表观氮平衡的定义及计算方法

氮素平衡的定义是指在一个给定系统、给定时间段内(一般一季作物或周年)详细的氮素输入与输出的关系<sup>[27]</sup>,本文讨论的均是设施蔬菜-土壤系统在一季作物生长周期内详细的表观氮平衡关系。根据定义和物质守恒原理,系统氮输入与氮输出的差值即为

表观氮平衡量。土壤系统的表观氮素平衡记录了土壤系统中的输入与输出项,可以反映氮素进入土壤的途径和土壤氮库的变化情况。若氮输入量与氮输出量之差(即表观氮平衡量)为正值,表示土壤氮库过剩,若表观氮平衡量为负值,则意味着土壤氮库亏损<sup>[27]</sup>。综合前人的一些研究得出蔬菜种植体系中,表观氮平衡量=氮输入量(化肥输入氮+有机肥输入氮+灌溉水带入氮)-氮输出量(作物吸收氮+硝化反硝化损失氮+氨挥发损失氮+土壤淋失氮)。本研究中每季作物的化肥输入氮(472组)、有机肥输入氮(273组)、灌溉水带入氮(146组)、部分作物吸收氮(291组)、部分硝化反硝化损失氮(45组)、部分氨挥发损失氮(44组)和土壤淋失氮(112组)由各文献直接给出。部分未给出的硝化反硝化损失氮(471组)和氨挥发损失氮(512组)根据王敬国等<sup>[15]</sup>和Cui等<sup>[28]</sup>给出的参数计算得到,即氮肥氨挥发系数0.10,有机肥氨挥发系数0.20,反硝化的 $N_2O$ 排放因子0.009 5, $N_2O/(N_2+N_2O)$ 为3.9%。部分未给出的作物吸收氮(271组)采用各蔬菜产量乘以单位产量蔬菜吸收养分量得到<sup>[29]</sup>。最终所有数据都由各氮输入项目和输出项目平均得到。

### 1.3 区域划分

根据《全国设施蔬菜重点区域发展规划(2015—2020年)》<sup>[30]</sup>将我国大陆地区分为5个区域:黄淮海与环渤海暖温区(包括辽宁东西南部、北京、天津、内蒙古赤峰和乌兰察布、山西、河北、山东、河南、安徽中北部、江苏中北部)、西北温带干旱及青藏高原寒区(包括新疆、甘肃、宁夏、陕西、青海、西藏、内蒙古中西部)、长江流域亚热带多雨区(包括四川、重庆、云南北部、江西、湖北、湖南、上海、浙江、贵州、江苏南部、安徽南部、福建北部)、东北温带区(包括辽宁中北部、吉林、黑龙江中南部、内蒙古东部)和华南热带多雨区(包括

福建中北部、广东、广西、海南、云南中南部)。假定试验数据在各省份及大区域分布具有代表性,每个区域可作为一个整体来分析,施氮量由区域内试验数据平均得到。

### 1.4 氮肥利用率计算

氮肥利用率(Nitrogen use efficiency, NUE)是评价氮肥使用效果和对环境影响的一个重要指标<sup>[19,28-31]</sup>。其计算公式为:

$$NUE = \frac{U_N - U_0}{F} \times 100\%$$

式中: $U_N$ 为施肥处理作物吸收氮量, $kg N \cdot hm^{-2}$ ;  $U_0$ 为不施肥处理作物吸收氮量, $kg N \cdot hm^{-2}$ ;  $F$ 为化肥施氮量, $kg N \cdot hm^{-2}$ 。

### 1.5 数据分析

采用Excel 2010进行数据处理,采用Excel 2010和Origin 9.0作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 我国典型设施菜地的表现氮平衡情况

从图1可知,我国设施菜地每季蔬菜氮素总投入约为 $863 kg N \cdot hm^{-2}$ 。肥料施用是氮素输入的主要途径,其中化肥和有机肥分别占氮素总投入的54.6%和35.5%;约有9.9%的氮素来自于灌溉水带入。

从氮素输出途径来看,设施菜地每季氮素输出为 $539 kg N \cdot hm^{-2}$ 。其中被蔬菜吸收带走的氮素约占输出量的42.6%。随着栽培品种的不断更新,作物籽粒含氮量一般会随产量提高而有所降低。所以即使种植蔬菜种类相同,其单位产量作物吸收养分量也不同,但综合考虑差别不会太大<sup>[15]</sup>。进入土壤的氮素除了被作物吸收带走外,还有一部分以 $NO_3^-$ -N淋溶、硝化反硝化和氨挥发等途径从土壤中损失掉。每一生长季有13.1%的氮素是以 $NH_3$ 的形式挥发到大气中,

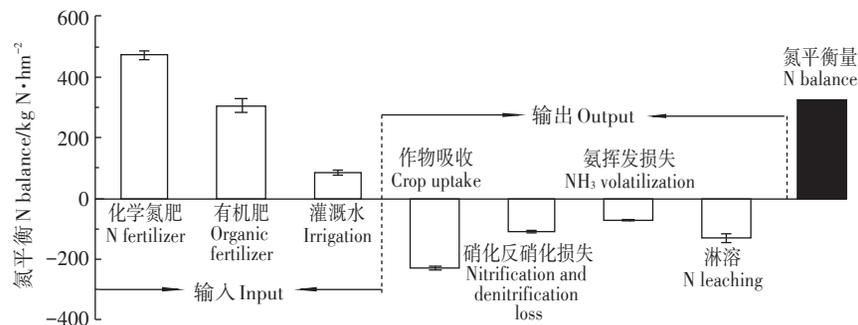


图1 设施菜地系统平均生长季表现氮平衡估算

Figure 1 Estimation of the nitrogen balance in greenhouse vegetable cropping system per growing season

约有23.9%氮素通过淋溶而损失,这也是造成我国地下水污染的主要成因。在土壤微生物的硝化反硝化作用下,以N<sub>2</sub>、NO和N<sub>2</sub>O等形式损失的氮素约有20.4%。

从表观氮平衡结果来看,设施菜地从播种到收获经历一个完整的生长季,土壤氮库当季过剩量为49~1154 kg N·hm<sup>-2</sup>,均值为324 kg N·hm<sup>-2</sup>,占氮素总投入的37.5%,说明在设施菜地系统中,氮输入大于氮输出,土壤氮库呈盈余状态。

### 2.2 表观氮平衡区域空间分布特征

从最终表观氮平衡收支(表1)来看,各区土壤氮库均有盈余。其中黄淮海与环渤海暖温区盈余最多,也意味着该区的环境潜在风险最高。对比各区氮素投入发现,化肥和有机肥仍是氮素输入的主要途径,而且在土壤氮库盈余较高的地区施氮量也较大。氮素投入由高到低依次为黄淮海与环渤海暖温区>西北温带干旱及青藏高寒区>华南热带多雨区>东北温带区>长江流域亚热带多雨区。根据区域空间上的表观氮平衡分布得到,化肥氮输入最高的华南热带多雨区硝化反硝化损失最大,有机肥施用量最大的东北温带区氨挥发损失也最大。而施氮量最高的黄淮海与环渤海暖温区,通过淋溶、硝化反硝化和氨挥发等途径损失的氮素均较大,但作物吸收带走的氮素却不及施氮量相对较低的东北温带区。长江流域亚热带多雨区氮素总投入最低,但在输出量中约有49.3%的氮素以淋溶、硝化反硝化和氨挥发的形式损失。由于影响设施菜地系统土壤表观氮平衡的因

素有很多,其不仅与前茬蔬菜种类和残留氮量有关,而且与当季蔬菜种类、土壤性质和管理方式等密切相关,随着设施菜地管理方式的不断改进和种植技术的不断提高,土壤表观氮素平衡的空间分布特征也将会越来越明显。

### 2.3 我国设施菜地氮肥利用率及其空间分布特征

将搜集的数据整理并按照区域进行划分处理,得到我国设施菜地氮肥利用率均值为18.6%。图2为各区域氮肥利用率箱线图,箱体的长短表示波动的大小。可以看到在5个区域中,西北温带干旱及青藏高寒区和华南热带多雨区箱体相对较长,且中位数明显低于平均值,即这两个区域氮肥利用率波动较大,数值相对分散,大部分数据均低于平均值。原因是在华南热带多雨区设施菜地研究相对较少,在少量的数据中蔬菜种类也多种多样,从而决定了该区域氮肥利用率波动较大。东北温带区箱体较短表明氮肥利用率相对集中,此外该区中位数与均值较为接近,与长江流域亚热带多雨区相似,表明该区氮肥利用率分布较为均匀。黄淮海与环渤海暖温区氮素投入较大,作物吸氮较低,同时还有大量氮素由于淋溶和硝化反硝化等过程而损失掉,导致该区域氮肥利用率均值与中位数值均最低。

## 3 讨论

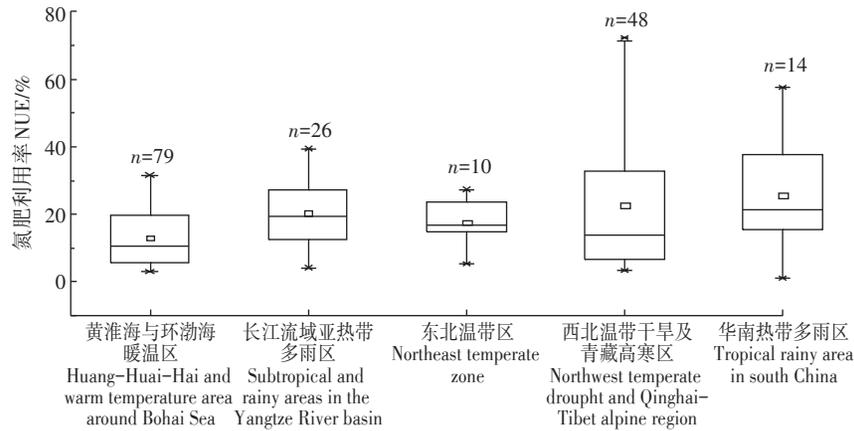
### 3.1 数据不确定性分析

(1)在文献检索方面,本研究所用数据的所有文献均检索自各类数据库,其收录内容也随数据库种类

表1 各区域设施菜地生长季表观氮平衡估算(kg N·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 Estimation of the seasonal nitrogen balance in greenhouse vegetable cropping system in five areas of China(kg N·hm<sup>-2</sup>)

项目 Items	来源 Sources	黄淮海与环渤海暖温区	长江流域亚热带多雨区	东北温带区	西北温带干旱及青藏高寒区	华南热带多雨区
		Huang-Huai-Hai and warm temperature area around Bohai Sea	Subtropical and rainy areas in the Yangtze River basin	Northeast temperate zone	Northwest temperate drought and Qinghai-Tibet alpine region	Tropical rainy area in south China
输入 Input	化学氮肥 N fertilizer	546	295	150	557	698
	有机肥 Organic fertilizer	434	91	503	255	—
	灌溉水 Irrigation	108	2	15	82	—
	合计 Sum	1088	387	668	894	698
输出 Output	作物吸收 Crop uptake	251	155	370	251	237
	硝化反硝化损失 Nitrification and denitrification loss	117	67	140	132	170
	氨挥发损失 NH <sub>3</sub> volatilization	93	34	103	61	70
	淋溶 N leaching	186	50	—	74	105
	合计 Sum	647	306	613	518	582
氮平衡 N Balance		441	81	55	376	116



-表示最大值和最小值;×表示1%和99%;□表示平均值;箱体的下、中、上三条水平线分别表示下四分位数、中位数和上四分位数;箱体两端与上下限之间的垂线为胡须线;每组上方的数字表示相应分组数据的数量  
- represents the maximum value and minimum value;× represents 1% value and 99% value;□ represents the mean value;The lower, middle and upper horizontal lines of the box represent the lower quartile, median and upper quartile, respectively; The vertical line between the two ends of the box and the upper and lower limits is the beard line;The number above each group represents the number of corresponding grouped data pairs

图2 各区域设施菜地氮肥利用率分布

Figure 2 NUE distribution for greenhouse vegetable cropping system in five areas of China

和更新频率而有所区别<sup>[32]</sup>。因此针对我国设施菜地地表观氮平衡文献的检索可能会受到所选数据库种类、检索关键词和检索时间等的影响,导致所得结果存在或大或小的差异<sup>[33]</sup>,所以在分析过程中力求能够客观公正地反映我国设施菜地地表观氮平衡的发展态势及空间特征。

(2)在文献数据方面,存在数据不全、部分数据缺失或不明确的问题,除了文献中明确提到的数据外,有些数据仍需要文献中给出的数据间接求得,例如,有146组数据直接给出灌溉水带入氮,但是也有大量文献给出灌溉水量的其他形式(单位:mm、 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 和 $t \cdot hm^{-2}$ ),这些形式的数据在缺少灌溉水硝酸盐含量情况下而被舍去;有291组数据直接给出作物吸收带走氮量,但也有271组数据是由作物产量间接算出。不同文献研究侧重点不同、数据格式和单位的不统一以及数据的筛选整理过程等决定了设施菜地氮素估算的不确定性。

(3)在蔬菜种类上,有的试验种植的是叶菜,有的种植的是果菜,蔬菜种类不同,其施肥量和生育期也有较大差异,因此在平均之后具有较大的不确定性。

(4)在科学研究方面,由于学科背景和各个课题组研究重点的不同,我国目前对设施蔬菜研究的侧重点也不一样,许多研究者往往只重视氮素管理中的某一个环节,而忽略了其他环节,所以导致系统估算设施菜地生产系统的资料和数据不完整<sup>[10,15,26]</sup>。

(5)在试验地分布方面,目前关于我国农田管理

分区估算较多,而关于设施菜地地表观氮平衡分区估算还鲜有报道。从搜集到的文献发现,我国对设施蔬菜地的研究主要集中在黄淮海与环渤海暖温区的山东、北京和河北三个省份,以及长江流域亚热带多雨区的江苏和浙江,对其他区域特别是东北温带区和华南热带多雨区研究较少。由于此类基础数据严重缺乏,再进行尺度放大就会导致估计值偏高或偏低,所以对各区域地表观氮平衡估算具有很大的不确定性<sup>[12]</sup>。

### 3.2 我国设施菜地氮素潜在污染分析

我国设施菜地生产系统中被作物吸收带走的氮素仅占氮素总投入的26.6%,剩下的部分或淋失进入土壤深层污染地下水,或通过硝化反硝化和氨挥发等过程以气体的形式排入大气环境,再或者是累积在土壤中成为潜在的污染源等。一般认为氨挥发是露地菜田氮素损失主要途径,设施菜地土壤湿度高、土壤酸化,导致氨挥发量较低<sup>[34]</sup>。本研究发现每一生长季仍有高达13.1%(占总输出量)的氮素是以 $NH_3$ 的形式挥发到大气中。我国设施菜地每一作物生长季通过淋溶而损失的氮素占氮素总输出的23.9%。在空间分布上,黄淮海与环渤海暖温区灌溉水输入的氮素、通过淋溶损失的氮素和氮素盈余均最高,原因是黄淮海与环渤海暖温区是蔬菜集约化种植主产区,氮素施用量较大,而且由于常年种植,土壤中氮素残留较多,在灌溉水作用下淋溶到土壤深层而进入地下水,从而使地下水硝酸盐含量超标,如此循环导致土壤氮素淋失严重<sup>[33,35]</sup>。通过硝化反硝化损失的氮素

约占20.4%,其中华南热带多雨区最高。王效科等<sup>[33]</sup>根据模型估算得到,若我国氮肥用量减少一半,全国农业土壤的 $N_2O$ 排放量将会减少22.0%。我国设施菜地生态系统中每一生长季投入总氮素中约有37.5%的氮素盈余,土壤氮库增加,其中黄淮海与环渤海暖温区最高。有研究认为当土壤中氮素大量盈余时,作物产量和品质不会增加,甚至会降低,如果不进行有效的氮素管理,长此以往不仅会影响作物产量和品质,而且会大量增加氮素损失,付出较大环境代价<sup>[24,26]</sup>。但是当前还没有明确的针对设施菜地的氮素盈余参考指标,所以在提高或保持作物产量的前提下如何优化氮素投入、减少淋溶和气态氮损失等是今后需要着重关注的问题。

### 3.3 我国设施菜地氮肥利用现状及对策

由于氮素投入量大、作物吸收带走量低,设施菜地氮肥利用率普遍较低,且具有较高变异性。而且氮肥利用率受到施肥种类、施肥量、施用技术、土壤性质、作物种类、气候条件等多因素的影响,因此具有极大的变幅<sup>[36]</sup>。总体而言,我国设施菜地平均氮肥利用率为18.6%,在空间分布上也具有较大差异性,氮肥利用率均值、中值最高和最低的地区分别是华南热带多雨区和黄淮海与环渤海暖温区。有研究指出被作物吸收带走的氮素中有超过50%来自土壤自身累积的氮素,而与肥料氮的施用无关<sup>[31,37]</sup>。本研究估算得到的氮肥利用率高于Zhang等<sup>[38]</sup>研究得到的2010年世界果蔬氮肥利用率(14%),但略低于Ti等<sup>[10]</sup>研究得到的2010年我国设施菜地平均氮肥利用率(19.7%)。针对我国设施菜地氮肥利用率低、氮素损失严重和环境压力大等问题,政府部门应鼓励农民减少菜地氮肥施用,大力推广优化施氮等减少氮肥施用和氮素损失的新技术,改善当前“大水大肥”现状;科研人员应创新技术,在保证产量的前提下同时重视蔬菜种植,特别是设施菜地中表观氮素平衡,摸清氮素循环各个环节,完善各个环节基础资料,从而健全氮素管理体系,减少氮素损失。

## 4 结论

(1)我国设施蔬菜每季表观氮素平衡为正值,均值为 $324 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,氮肥利用率平均为18.6%。化肥和有机肥是氮素输入的两大途径。氮素输出中,淋溶、硝化反硝化、氨挥发等形式损失的氮素占输出量的57.4%,超过被作物吸收带走的氮(42.6%)。因此,在提高或保持作物产量的前提下如何优化氮素

投入、减少氮素损失等是当前设施菜地亟需解决的问题。

(2)我国设施菜地土壤表观氮平衡区域分布差异显著,各区域每季盈余量为 $55 \sim 441 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中,黄淮海与环渤海暖温区氮素盈余最高,其较高氮投入和较低的作物吸收是造成农田土壤氮素大量盈余的主要原因,同时也存在较高的氮素损失,每季通过淋溶流失的氮达到 $186 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(3)降低氮素投入水平和提高作物的吸收利用率是有效的氮优化管理途径,尤其是在黄淮海与环渤海暖温区,应减少氮素投入,重点关注氮素淋溶损失。

### 参考文献:

- [1] FAO. Food and Agriculture Organization Statistical Databases (FAO-STAT)[DB/OL]. [2019-9-18]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC>.
- [2] Bellarby J, Surridge B W J, Haygarth P, et al. The stocks and flows of nitrogen, phosphorus and potassium across a 30-year time series for agriculture in Huantai County, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619:606-620.
- [3] 于静, 虞敏达, 蓝艳, 等. 北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(9):3696-3704.  
YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, et al. Analysis of the characteristics of groundwater quality in a typical vegetable field, northern China[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9):3696-3704.
- [4] 李银坤, 武雪萍, 武其甫, 等. 水氮用量对设施栽培蔬菜土壤氨挥发损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4):949-957.  
LI Yin-kun, WU Xue-ping, WU Qi-fu, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on ammonia volatilization loss from vegetable fields under greenhouse cultivation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4):949-957.
- [5] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4):783-795.  
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4):783-795.
- [6] 姜慧敏, 张建峰, 李玲玲, 等. 优化施氮模式下设施菜地氮素的利用及去向[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5):1146-1154.  
JIANG Hui-min, ZHANG Jian-feng, LI Ling-ling, et al. Utilization and fate of nitrogen in greenhouse vegetable under optimized nitrogen fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5):1146-1154.
- [7] 张相松, 刘兆辉, 江丽华, 等. 设施菜地土壤硝态氮淋溶防控技术的研究[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2009, 26(3):207-211.  
ZHANG Xiang-song, LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, et al. Study on the technology of soil nitrate nitrogen leaching preventive and control in mushroom house[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2009, 26(3):207-211.
- [8] 唐珣, 李丽君, 白光洁, 等. 山西南部设施蔬菜施肥及土壤氮磷累

- 积现状调查分析[J]. 山西农业科学, 2017, 45(5):773-776, 785.
- TANG Yao, LI Li-jun, BAI Guang-jie, et al. Investigation and analysis on the current status of fertilization and soil nitrogen and phosphorus accumulation in greenhouse vegetable in southern of Shanxi[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(5):773-776, 785.
- [9] 王颖. 辽宁省设施蔬菜施肥现状及建议[J]. 辽宁农业科学, 2015(3):49-50.
- WANG Ying. Fertilization status and suggestions of greenhouse vegetables in Liaoning[J]. *Liaoning Agricultural Science*, 2015(3):49-50.
- [10] Ti C P, Luo Y X, Yan X Y. Characteristics of nitrogen balance in open-air and greenhouse vegetable cropping systems of China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2015, 22(23):18508-18518.
- [11] Gu B J, Ge Y, Chang S X, et al. Nitrate in groundwater of China: Sources and driving forces[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(5):1112-1121.
- [12] Gu B J, Ju X T, Chang J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(28):8792-8797.
- [13] Liu Z J, Ma P Y, Zhai B N, et al. Soil moisture decline and residual nitrate accumulation after converting cropland to apple orchard in a semiarid region: Evidence from the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 181:104080.
- [14] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [15] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3):503-517.
- WANG Jing-guo, LIN Shan, LI Bao-guo. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3):503-517.
- [16] 樊兆博, 刘美菊, 张晓曼, 等. 滴灌施肥对设施番茄产量和氮素表观平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):970-976.
- FAN Zhao-bo, LIU Mei-ju, ZHANG Xiao-man, et al. Effect of drip-irrigation on tomato yield and apparent N balance in a greenhouse[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4):970-976.
- [17] 郭瑞华, 杨玉宝, 李季. 3种蔬菜种植模式下土壤氮素平衡的比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1):10-15.
- GUO Rui-hua, YANG Yu-bao, LI Ji. Comparative study of nitrogen budget in three different vegetable planting patterns under greenhouse condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(1):10-15.
- [18] 卞建民, 李育松, 胡昱欣, 等. 吉林西部农田生态系统氮平衡及其水环境影响研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7):1862-1868.
- BIAN Jian-min, LI Yu-song, HU Yu-xin, et al. Nitrogen balance of farmland ecosystem in the western Jilin Province and its effect on water environment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(7):1862-1868.
- [19] 田冕, 杨秉臻, 金涛, 等. 江苏省农田氮素平衡的时空变化特征分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(12):146-151.
- TIAN Mian, YANG Bing-zhen, JIN Tao, et al. Spatio-temporal variation characteristics of nitrogen balance in farmland in Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12):146-151.
- [20] 张欢, 李恒鹏, 李新艳, 等. 太湖流域典型农业区氮平衡时间变化特征及驱动因素[J]. 土壤通报, 2014, 45(5):1119-1129.
- ZHANG Huan, LI Heng-peng, LI Xin-yan, et al. Temporal changes of nitrogen balance and their driving factors in typical agricultural area of Lake Tai basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5):1119-1129.
- [21] 邱建军, 李虎, 王立刚. 中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8):40-44.
- QIU Jian-jun, LI Hu, WANG Li-gang. Simulation of nitrogen level and balance in cropland in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(8):40-44.
- [22] 王激清, 马文奇, 江荣凤, 等. 中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):210-215.
- WANG Ji-qing, MA Wen-qi, JIANG Rong-feng, et al. Development and application of nitrogen balance model of agro-ecosystem in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(8):210-215.
- [23] Li S T, He P, Jin J Y. Nitrogen use efficiency in grain production and the estimated nitrogen input/output balance in China agriculture[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(5):1191-1197.
- [24] 杜连凤, 赵同科, 安志装, 等. 菜地氮素循环途径及其环境效应综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2):414-418.
- DU Lian-feng, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Nitrogen cycling and its environment effects in vegetable crop-soil system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(2):414-418.
- [25] 胡晓霞, 丁洪, 张玉树, 等. 菜地氮素循环及其环境效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(10):287-294.
- HU Xiao-xia, DING Hong, ZHANG Yu-shu, et al. Research progress on nitrogen cycling and its environment effects in vegetable crop-soil system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(10):287-294.
- [26] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(4):391-402.
- [27] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2):281-296.
- JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):281-296.
- [28] Cui S, Shi Y, Groffman P M, et al. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910-2010)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(6):2052-2057.
- [29] 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.
- [30] 中华人民共和国农业部. 全国设施蔬菜重点区域发展规划(2015-2020年)[R]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2015.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. National

- key regional development plan for greenhouse vegetables (2015—2020)[R]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2015.
- [31] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5):921-933.  
JU Xiao-tang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio: Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5):921-933.
- [32] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 等. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6):1140-1150.  
GAO Mao-fang, QIU Jian-jun, LIU San-chao, et al. Status and trends of agricultural diffuse pollution research based on bibliometrics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(6):1140-1150.
- [33] 王效科, 庄亚辉, 李长生. 中国农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量分布格局研究[J]. 生态学报, 2001, 21(8):1225-1232.  
WANG Xiao-ke, ZHUANG Ya-hui, LI Chang-sheng. The distribution pattern of N<sub>2</sub>O emission from agricultural soil in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8):1225-1232.
- [34] 陈清, 卢树昌. 果类蔬菜养分管理[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2015:371-372.  
CHEN Qing, LU Shu-chang. Nutrient management of fruit vegetables [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2015:371-372.
- [35] 谷端银, 焦娟, 高俊杰, 等. 设施土壤硝酸盐积累及其对作物影响的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2017(3):22-28.  
GU Duan-yin, JIAO Juan, GAO Jun-jie, et al. Research progress on soil nitrate accumulation under facility condition and its effects on crops[J]. *China Vegetables*, 2017(3):22-28.
- [36] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2):192-197.  
JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Thinking about nitrogen recovery rate [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):192-197.
- [37] Ju X T, Zhang C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in north China: A review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12):2848-2862.
- [38] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015, 528(7580):51-59.