

# 近 20 年中国玉米氮肥利用率的时空变化及驱动因素<sup>①</sup>

肖珣<sup>1,2</sup>, 王璐<sup>1</sup>, 赵琳<sup>1,2</sup>, 代文台<sup>1,2</sup>, 刘姝含<sup>1,2</sup>, 沈仁芳<sup>1,2</sup>, 赵学强<sup>1,2\*</sup>

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 玉米是重要的粮食、饲料和工业原料作物, 氮肥用量大, 但利用率低。近些年, 我国氮肥的形态、施用量、施用方法及玉米品种和配套栽培技术等发生了较大变化。在此新形势下, 我国玉米氮肥利用率时空变化特征尚不清楚。据此, 本文采用文献计量分析的方法, 收集了 2000—2023 年间发表的中英文献, 对 1 216 组玉米氮肥利用率数据进行了统计分析, 探讨了近 20 年我国玉米氮肥利用率的时空变异特征及其潜在驱动因素。结果表明: 我国 2000—2023 年玉米的氮肥表观利用率、偏生产力、农学效率、生理利用率的均值分别为 32.60%、47.03 kg/kg、13.01 kg/kg、38.50 kg/kg。随着施氮量的增加, 氮肥利用率参数呈下降趋势。当施氮量为 180~240 kg/hm<sup>2</sup> 时, 可保证玉米获得较高产量, 同时维持较高氮肥利用率。我国玉米氮肥利用率存在明显的时空变异特征。从时间上看, 自 2000 年以来, 我国玉米氮肥表观利用率呈现先降低(2000—2010 年)后稳步上升(2011—2023 年)的趋势。现阶段(2016—2023)玉米氮肥表观利用率(37.12%)较 2006—2010 年(28.29%)和 2011—2015 年(32.01%)分别提升了 8.83 和 5.11 个百分点, 与 2000—2005 年(37.39%)基本持平。从区域上看, 东北地区的玉米氮肥表观利用率最高, 达 36.68%; 西北和华东地区次之, 分别为 33.27% 和 32.33%; 华北和南方地区相对较低, 分别为 30.96% 和 30.41%。随机森林分析结果表明, 土壤 pH 和有机质是我国玉米氮肥表观利用率差异的主要驱动因素。综上所述, 近 20 年我国玉米氮肥利用率存在显著的时空变异, 玉米氮肥利用率得到大幅提高, pH 和有机质是驱动玉米氮肥利用率差异的主要土壤因素。

**关键词:** 玉米; 氮肥利用率; 施氮量; 时空变化特征; 文献计量分析

**中图分类号:** S143.1 **文献标志码:** A

## Spatiotemporal Variations and Driving Factors of Maize Nitrogen Fertilizer Use Efficiency in China over Past 20 Years

XIAO Xun<sup>1,2</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, ZHAO Lin<sup>1,2</sup>, DAI Wentai<sup>1,2</sup>, LIU Shuhan<sup>1,2</sup>, SHEN Renfang<sup>1,2</sup>, ZHAO Xueqiang<sup>1,2\*</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Maize is an important crop for food, feed, and industrial raw materials, with a high nitrogen (N) fertilizer application rate but relatively low N use efficiency (NUE). In recent years, the form, rate, method of N fertilizer application and the variety and cultivation method of maize have changed in China. However, the changes in fertilizer NUE of maize under this new situation remain unclear. Through a bibliometric analysis of 1 216 trials on maize NUE from 2000 to 2023, we investigated the spatiotemporal variations and potential driving factors of maize NUE in China. From 2000 to 2023, the obtained results showed that the average apparent NUE, partial factor productivity, agronomic efficiency, and physiological efficiency for maize in China are 32.60%, 47.03 kg/kg, 13.01 kg/kg, and 38.50 kg/kg, respectively. As N application rate increases, all these NUE parameters show a declining trend. When N application rate ranges from 180 to 240 kg/hm<sup>2</sup>, relatively high maize yields and NUE are achieved. The NUE of maize in China exhibits significant spatiotemporal variations. In terms of temporal change, since 2000, the trend in maize NUE in China initially declined from 2000 to 2010, followed by steady growth from 2011 to 2023. Currently, the N apparent use efficiency from 2016 to 2023 (37.12%) is similar to that of 2000—2005 (37.39%), increased by 8.83 and 5.11 percentage points compared to the periods of 2006—2010 (28.29%) and 2011—2015 (32.01%), respectively. Regarding regional differences, the average apparent NUE is the highest in Northeast China (36.68%), followed by Northwest (33.27%) and

①基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0440201)和国家自然科学基金项目(42077101)资助。

\* 通信作者(xqzhao@issas.ac.cn)

作者简介: 肖珣(1995—), 男, 湖南攸县人, 博士, 主要研究方向为玉米氮肥高效利用。E-mail: xunxiao@issas.ac.cn

East China (32.33%), and the lowest in North and South China (30.96% and 30.41%, respectively). Random forest analysis indicates that soil pH and organic matter are two main driving factors responsible for the regional differences in the apparent NUE. In conclusion, over the past 20 years, there is significant spatiotemporal variation in maize NUE of China and a substantial increase in maize NUE, and soil pH and organic matter are two main soil factors driving the differences in the NUE of maize.

**Key words:** Maize; Nitrogen use efficiency; Nitrogen application rate; Spatiotemporal variations; Bibliometric analysis

我国是农业大国,保障国家粮食安全始终是农业发展的首要任务。玉米是集粮食、饲料和工业原料为一体的优势作物<sup>[1]</sup>,在我国农业生产中占据重要地位。据统计,2022年我国玉米播种面积达4 307万hm<sup>2</sup>,年产量达2.77亿t,分别占粮食作物总播种面积的39.40%和总产量的43.78%,已超过水稻和小麦,成为我国三大粮食作物中总产量最高的作物<sup>[2]</sup>,对保障我国粮食安全发挥重要作用。

氮是植物生长发育所必需的大量营养元素,施用化学氮肥是实现玉米高产稳产的关键措施之一。近几十年来,氮肥的单位面积施用量越来越大,在一些地区已经超过玉米生长的需氮量<sup>[3-5]</sup>。据报道,云南省28个县市2002年平均氮肥施用量高达294 kg/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>,华北平原的不少地区施氮量甚至高达300~350 kg/hm<sup>2</sup><sup>[7-8]</sup>。然而,高强度的土地集约化利用和不合理的施肥方式导致玉米氮肥利用率较低<sup>[9]</sup>。增加的氮肥投入对作物增产效应越来越低,反而引发陆地、淡水和近岸海洋生态系统的富营养化,造成前所未有的环境和生态退化,威胁人类生存<sup>[10-12]</sup>。因此,稳定玉米产量的同时提高氮肥利用率是未来农业可持续发展的关键。

大量统计数据表明,由于气候特征、土壤性质和种植类型等因素的影响,玉米氮肥利用率存在显著的区域性差异<sup>[13-16]</sup>。如何在保证玉米稳产乃至增产的同时提高氮肥利用率,减少化肥施用量是我国科学家关注的重要课题。尽管先前已有研究对我国2000—2005年<sup>[13]</sup>、2002—2005年<sup>[14]</sup>以及2004—2014年<sup>[17]</sup>玉米氮肥利用率进行了系统的统计分析,但由于时间跨度较小或全国试验数据收集不全,无法准确分析我国玉米氮肥利用率的时空变化特征及其变化的驱动因素。进入21世纪以来,我国氮肥种类、用量和施用方法及玉米品种、配套栽培技术有了很大改进。此外,我国相继实施了一系列政策措施,包括2005年启动的测土配方施肥项目、2015年制定的《到2020年化肥使用量零增长行动方案》、2022年制定的《到2025年化肥减量化行动方案》等,旨在优化氮肥管理、促进氮肥的高效利用、降低化肥的负面效应。在此背景下,近20年我国玉米氮肥利用率在时间和空间上有什么变化?这些变化的驱动因素是什么?为

了回答这些问题,本文利用已发表的近20多年的中英文文献资料(2000—2023年),研究了近20年我国玉米氮肥利用率的时空变化特征及驱动因素,以期为我国玉米氮肥施用的优化管理和政策制定提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本文基于已发表的文献数据进行统计分析,从Web of Science、中国知网、万方和百度学术等文献数据库,通过设置“玉米(maize/corn)”“氮肥利用率(nitrogen use efficiency/nitrogen recovery efficiency)”“产量(yield)”“施氮量(nitrogen application rate)”以及“植株吸氮量(plant nitrogen uptake)”5个关键词检索了2000—2023年期间发表的文章。然后,根据以下条件进行文献筛选:①施肥试验必须在田间条件下进行(不包含盆栽试验和室内试验),且研究对象必须是玉米;②植株氮含量、吸氮量或者地上部氮肥利用率必须是在成熟期获得的数据;③试验中必须包含不施氮处理作为对照,施氮处理(化学氮肥)是对照与处理之间的唯一区别;④文中还需提供试验前耕作层(0~20 cm)的基础理化性质(如pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、土壤黏粒含量)、施氮量、产量;⑤对每个独立试验还应获得以下相关信息:试验地点的经纬度、年均气温、降水量等。在进行文献数据收集时,表格数据直接提取,图形数据则采用GetData Graph Digitizer 2.26软件进行数据提取。在数据处理过程中,本研究排除了一些氮肥增效处理措施,如控释氮肥、硝化抑制剂、有机肥配施等处理,以获得常规化学氮肥处理(主要为尿素和复合肥)下玉米实际氮肥利用率的结果。经过筛选,符合条件的文献共172篇(英文36篇,中文136篇),有效数据1 216组,涉及21个省(区、市),具体研究地点及文献数量见表1(个别文献包含多个地点)。

根据我国玉米种植的区域分布特征,参考任科宇等<sup>[15]</sup>的研究,将收集的文献数据分为5个研究区域,即东北、华北、华东、西北以及南方种植区。从表1数据可以看出,研究地点的分布与我国玉米的主要种植区基本一致<sup>[16]</sup>,表明数据具有较高的代表性和可

靠性,可以较为准确地反映不同区域玉米产量和氮肥利用率的实际情况。

表 1 研究获取的文献数量及研究地点的分布

| 研究区域   | 研究地点分布                              |
|--------|-------------------------------------|
| 东北(40) | 吉林(13)、黑龙江(10)、辽宁(9)、内蒙古(8)         |
| 华北(60) | 河南(21)、河北(20)、北京(11)、山西(5)、天津(3)    |
| 华东(38) | 山东(25)、安徽(8)、江苏(5)                  |
| 西北(29) | 陕西(17)、甘肃(7)、新疆(5)                  |
| 南方(15) | 四川(6)、贵州(3)、重庆(2)、湖南(2)、湖北(1)、广东(1) |

表 2 研究获取的各参数样本量

| 研究区域 | 施氮量   | 产量    | 氮肥表观利用率 | 氮肥偏生产力 | 氮肥农学利用率 | 氮肥生理利用率 |
|------|-------|-------|---------|--------|---------|---------|
| 东北   | 250   | 235   | 250     | 235    | 235     | 187     |
| 华北   | 363   | 363   | 363     | 363    | 363     | 240     |
| 华东   | 291   | 291   | 291     | 291    | 291     | 248     |
| 西北   | 181   | 179   | 181     | 179    | 181     | 137     |
| 南方   | 131   | 119   | 131     | 119    | 119     | 68      |
| 全国   | 1 216 | 1 189 | 1 216   | 1 189  | 1 189   | 880     |

氮肥表观利用率(Nitrogen recovery efficiency, NRE)直接反映了作物对施入土壤中的肥料氮的回收效率。计算公式为:

$$NRE = \frac{N_t - N_0}{F_t} \times 100\% \quad (1)$$

氮肥偏生产力(Partial factor productivity from applied nitrogen, PFPN)表征的是单位肥料氮投入所能生产的作物籽粒产量。计算公式为:

$$PFPN = \frac{Y_t}{F_t} \quad (2)$$

氮肥农学效率(Agronomic efficiency of applied nitrogen, AEN)表征的是单位施氮量所增加的作物籽粒产量。计算公式为:

$$AEN = \frac{Y_t - Y_0}{F_t} \quad (3)$$

氮肥生理利用率(Physiological efficiency of applied nitrogen, PEN)表征的是地上部每吸收单位肥料氮所能够获得的籽粒产量的增加量。计算公式为:

$$PEN = \frac{Y_t - Y_0}{N_t - N_0} \quad (4)$$

式中:  $N_t$  为施氮处理下作物地上部的吸氮总量;  $N_0$  为不施氮处理下作物地上部的吸氮总量;  $F_t$  为施氮总量;  $Y_0$  表示不施氮处理下的作物籽粒产量;  $Y_t$  表示施氮处理下获得的作物籽粒产量。

## 1.2 研究方法

本研究收集的文献数据包括玉米基础籽粒产量(不施氮肥)、玉米施氮籽粒产量、化学氮肥施用量、氮肥利用率以及相关研究地点的气候与土壤条件。作物利用氮肥效率的表征方法较多,常用的指标包括氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥生理效率<sup>[13,17]</sup>。本研究主要聚焦于玉米氮肥表观利用率的时空变化,同时结合氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥生理效率等指标,对我国玉米氮肥利用效率进行系统分析和评价。具体参数的样本量如表 2 所示。

氮肥增产效应:在氮肥效应试验中,作物产量通常在一定范围内随着氮肥施用量的增加而增加,但这种增产趋势仅在施肥量未超过某一最佳水平时有效。当氮肥施用量达到或超过这个最佳水平后,作物产量可能不再增加,甚至出现下降的趋势。为了减少由于不同地区的地力、作物品种以及不同年份的气候条件等因素造成的试验结果差异,本文将作物产量随施氮量变化过程中出现的最高产量设定为 100%。在此基础上,其他施肥量条件下的产量被表示为相对于最高产量的相对值。这种相对产量的计算方法能够更直观地比较不同施氮量对作物产量的影响,从而帮助确定最适宜的氮肥施用量,实现作物产量的最大化和氮肥利用率的优化<sup>[17]</sup>。

## 1.3 数据分析

采用 Excel 2019 处理数据。采用 R 软件 random forest 程序包进行因子重要性分析,以揭示影响我国玉米氮肥利用率的主要因素;采用 ggplot2 程序包进行数据拟合与可视化。

## 2 结果与分析

### 2.1 近 20 年我国玉米施氮量、产量和氮肥利用率随时间的变化

近 20 年我国玉米施氮量、产量和氮肥利用率随时间变化存在较大波动(表 3)。自 2000 年以来,玉米

施氮量和产量均呈现先大幅提升、后趋于稳定, 2015年后出现下降的趋势; 玉米氮肥表观利用率、农学效率、生理利用率呈现先降低后回升的变化趋势, 而偏生产力一直在降低, 但下降速度在逐年放缓(表 3)。总体来看, 自 2015 年后, 我国玉米产量趋于稳定, 施氮量有所降低, 氮肥表观利用率、农学效率、生理利用率明显回升, 偏生产力一直在下降。

## 2.2 我国玉米施氮量、产量和氮肥利用率的区域性差异

我国不同种植区玉米的施氮量、产量及氮肥利用率存在明显的区域性差异(表 4)。氮肥施用量以华

东地区最高, 东北地区最低, 华北和南方地区略低于全国平均水平, 而西北地区则与全国平均水平相当。从玉米产量和氮肥利用率来看, 东北地区的施氮产量, 氮肥表观利用率、偏生产力、农学效率、生理利用率均明显高于全国平均水平。相比之下, 华北和南方地区的玉米施氮产量、氮肥表观利用率及偏生产力均低于全国平均水平, 尤其是氮肥表观利用率与东北地区分别相差 5.72 和 6.27 个百分点。华东和西北地区的施氮产量和氮肥表观利用率接近全国平均水平(32.60%), 但与东北地区仍相差 3.41 和 4.35 个百分点。

表 3 近 20 年我国玉米施氮量、产量和氮肥利用率的变化  
Table 3 Changes of maize N application rate, yield and N use efficiency in China over past 20 years

| 年份区间               | 施氮量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 基础产量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 施氮产量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 氮肥表观<br>利用率(%) | 氮肥偏<br>生产力(kg/kg) | 氮肥农学<br>效率(kg/kg) | 氮肥生理<br>利用率(kg/kg) |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 2000—2005 年(n=156) | 172.58                       | 4 976.69                      | 7 412.93                      | 37.39          | 50.79             | 14.88             | 38.90              |
| 2006—2010 年(n=348) | 243.80                       | 7 968.71                      | 9 969.15                      | 28.29          | 48.54             | 10.20             | 31.84              |
| 2011—2015 年(n=420) | 249.23                       | 7 286.72                      | 10 004.32                     | 32.01          | 47.08             | 13.46             | 41.39              |
| 2016—2023 年(n=292) | 234.68                       | 6 383.31                      | 9 660.06                      | 37.12          | 46.68             | 14.62             | 42.57              |

注: 表中  $n$  为样本量; 下同。

表 4 不同区域玉米施氮量、产量及作物氮肥利用效率  
Table 4 N application rates, grain yields, and various N use efficiencies of maize in different regions

| 区域   | 施氮量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 基础产量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 施氮产量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 氮肥表观利用率<br>(%) | 氮肥偏生产力<br>(kg/kg) | 氮肥农学效率<br>(kg/kg) | 氮肥生理利用率<br>(kg/kg) |
|------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 东北   | 210.86                       | 7 197.55                      | 10 304.20                     | 36.68          | 58.06             | 15.75             | 41.06              |
| 华北   | 225.40                       | 7 015.06                      | 9 015.38                      | 30.96          | 45.75             | 10.12             | 31.10              |
| 华东   | 274.22                       | 7 268.31                      | 9 780.72                      | 32.33          | 41.34             | 11.47             | 32.87              |
| 西北   | 237.12                       | 6 154.50                      | 9 779.13                      | 33.27          | 46.93             | 17.18             | 50.91              |
| 南方   | 223.73                       | 5 515.62                      | 8 536.90                      | 30.41          | 42.89             | 13.73             | 52.73              |
| 全国平均 | 235.50                       | 6 844.44                      | 9 513.37                      | 32.60          | 47.03             | 13.01             | 38.50              |

## 2.3 我国玉米产量和氮肥利用率随施氮量的变化

利用二次函数模型分别对玉米的氮肥施用量与玉米施氮产量及相对产量进行模型拟合(图 1), 结果表明, 玉米产量随着施氮量的增加呈递增的变化趋势(图 1A), 玉米相对产量则随施氮量的增加呈现先增加后降低的变化趋势(图 1B)。通过玉米相对产量与施氮量的二次拟合关系, 可以得出在施氮量为 221.54 kg/hm<sup>2</sup> 时, 玉米能够获得最高产量。

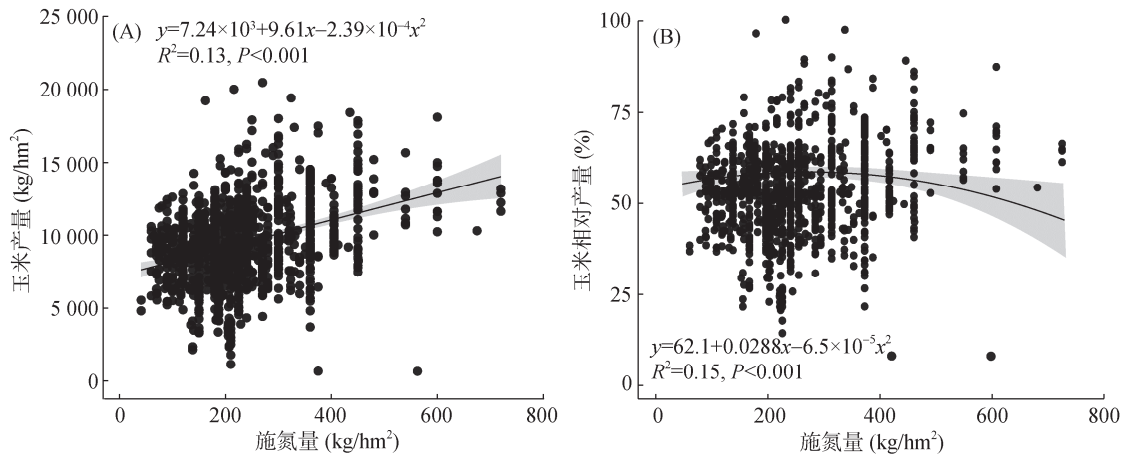
进一步探究氮肥表观利用率、偏生产力、农学效率及生理利用率随施氮量的变化关系(图 2), 结果显示, 随着施氮量的增加, 我国玉米氮肥表观利用率、偏生产力、农学效率及生理利用率均呈下降趋势, 其中以氮肥表观利用率和偏生产力下降速度最快(图 2), 说明氮肥表观利用率和偏生产力对于施氮量变化

的响应更敏感。进一步通过划分不同施氮区间, 研究施氮量对玉米氮肥利用率的影响(表 5), 结果表明, 当施氮量小于 100 kg/hm<sup>2</sup> 时, 玉米氮肥表观利用率和偏生产力均处于最高水平; 当施氮量为 100~180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 玉米氮肥表观利用率变化不大, 但偏生产力大幅降低, 且玉米产量提升不明显; 当施氮量为 180~240 kg/hm<sup>2</sup> 时, 玉米氮肥表观利用率、农学效率、偏生产力出现小幅下降, 但玉米产量得到显著提升; 而当施氮量为 240~360 kg/hm<sup>2</sup> 时, 尽管产量有小幅提升, 但氮肥表观利用率、偏生产力、农学效率大幅下降; 当施氮量大于 360 kg/hm<sup>2</sup> 时, 氮肥表观利用率、偏生产力、农学效率进一步降低。

## 2.4 玉米产量和氮肥利用率差异的主要驱动因素 利用随机森林模型分析评估土壤因子和气候因

子对玉米产量和氮肥利用率的重要性(图 3)，对比发现，尽管气候因子对玉米产量与氮肥表现利用率均具有显著影响，但土壤因子对两者的作用更强。玉米产

量和氮肥利用率的差异性变化主要受土壤 pH 和有机质的影响。其次，还受土壤有效磷、黏粒、碱解氮、速效钾含量以及温度和降水的影响。



(图中阴影部分表示 95% 置信区间；下同)

图 1 玉米产量(A)和相对产量(B)随施氮量的变化

Fig. 1 Relationships between N application rate, maize yield (A) and relative maize yield (B)

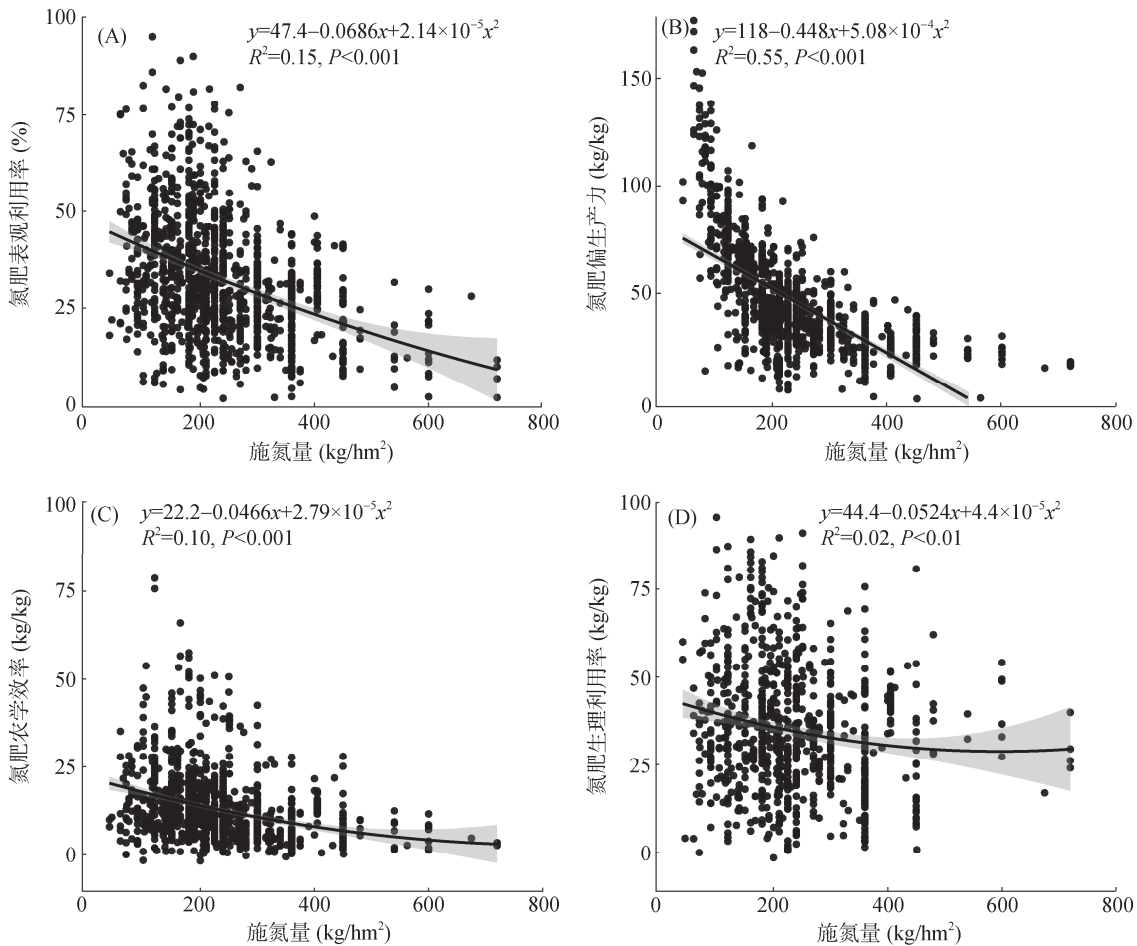
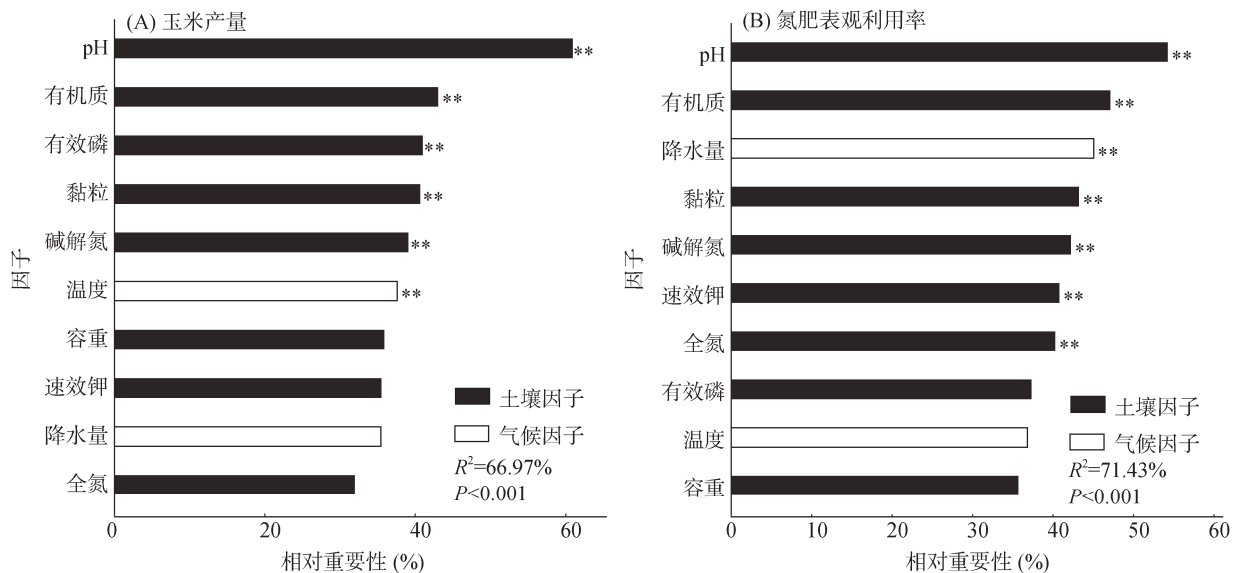


图 2 玉米氮肥表现利用率(A)、偏生产力(B)、农学效率(C)以及生理利用率(D)随施氮量的变化

Fig. 2 Changes of maize N recovery efficiency (A), partial factor productivity from applied N (B), agronomic efficiency of applied N (C) and physiological efficiency of applied N (D) with applied amount of N fertilizer

表 5 不同施氮区间下玉米施氮产量及氮肥利用率  
Table 5 Maize grain yields and N use efficiencies at different N application rates

| 施氮量(kg/hm <sup>2</sup> ) | 产量(kg/hm <sup>2</sup> ) | 氮肥表观利用率(%) | 氮肥偏生产力(kg/kg) | 氮肥农学效率(kg/kg) | 氮肥生理利用率(kg/kg) |
|--------------------------|-------------------------|------------|---------------|---------------|----------------|
| <100(n=75)               | 8 609.70                | 39.33      | 106.35        | 14.10         | 33.82          |
| 100~180(n=257)           | 8 711.67                | 38.59      | 63.21         | 17.79         | 45.73          |
| 180~240(n=461)           | 9 936.08                | 34.88      | 42.71         | 13.82         | 38.95          |
| 240~360(n=313)           | 10 439.29               | 26.36      | 34.01         | 9.41          | 34.25          |
| >360(n=110)              | 11 653.67               | 22.25      | 27.50         | 8.58          | 36.21          |



(图中采用变量的均方根误差的百分比来评估因子的相对重要性, \*\*表示达  $P < 0.01$  显著水平)

图 3 玉米产量(A)和氮肥表观利用率(B)差异的驱动因素

Fig. 3 Driving factors for variation of maize yield (A) and N recovery efficiency (B)

基于土壤 pH 和有机质是影响玉米产量和氮肥表观利用率的主要影响因子,进一步探究了玉米产量和氮肥表观利用率随土壤 pH 和有机质的变化关系(图 4)。结果表明,玉米产量随土壤 pH 的升高呈现缓慢下降的趋势,而氮肥表观利用率随土壤 pH 的升高呈现先上升后降低的变化趋势,其中在土壤 pH 为 7 左右时,玉米氮肥表观利用率最高。玉米产量和氮肥表观利用率随有机质含量的增加呈现递增的趋势,当土壤有机质含量达到 39 g/kg 左右时,玉米产量和氮肥表观利用率最高。

### 3 讨论

近 20 余年我国玉米氮肥利用率发生了明显变化。2000—2005 年,全国玉米氮肥施用量较低,产量相对也较低,氮肥表观利用率保持较高水平(37.39%),高于张福锁等<sup>[13]</sup>和闫湘等<sup>[14]</sup>报道的 26.1% 和 31.0%。这可能是由于前人统计结果主要是基于华北和西北地区的试验数据,不包括氮肥利用率较高的东北地区<sup>[13]</sup>;或者因为统计结果试验点布置过于均

一(北方地区实际玉米种植范围比南方地区更广),北方地区覆盖样本少<sup>[14]</sup>,导致统计结果的差异。2006—2010 年,玉米的氮肥表观利用率出现了明显的下降(28.29%),可能是由于该时期施肥量的增加所致(表 3)。我国在 2011—2015 年间玉米产量稳定,氮肥表观利用率也出现了明显回升(32.01%),这与于飞和施卫明<sup>[17]</sup>报道的 2004—2014 年玉米氮肥表观利用率结果(29.1%)基本一致。我国在 2016—2023 年玉米施氮量下降,玉米均产稳定在 10 000 kg/hm<sup>2</sup> 左右(与 2011—2015 年高氮施用期间相当),氮肥表观利用率明显回升(37.12%)。这表明近 20 年来我国在优化氮肥管理、改良土壤条件以及推广农业施肥技术等方面取得了一定成效,在促进玉米增产、稳产的同时提高了玉米氮肥利用率,但与发达国家相比,我国玉米氮肥利用率还存在较大差距。根据 Quan 等<sup>[18]</sup>研究结果,北美和欧洲国家玉米氮肥利用率分别为 42% 和 54%。这可能是由于我国人口基数大,对粮食生产的需求量巨大,农业生产往往是采用集约化的生产模式(高投入以换取高产出),而发达国家普遍采用单季种

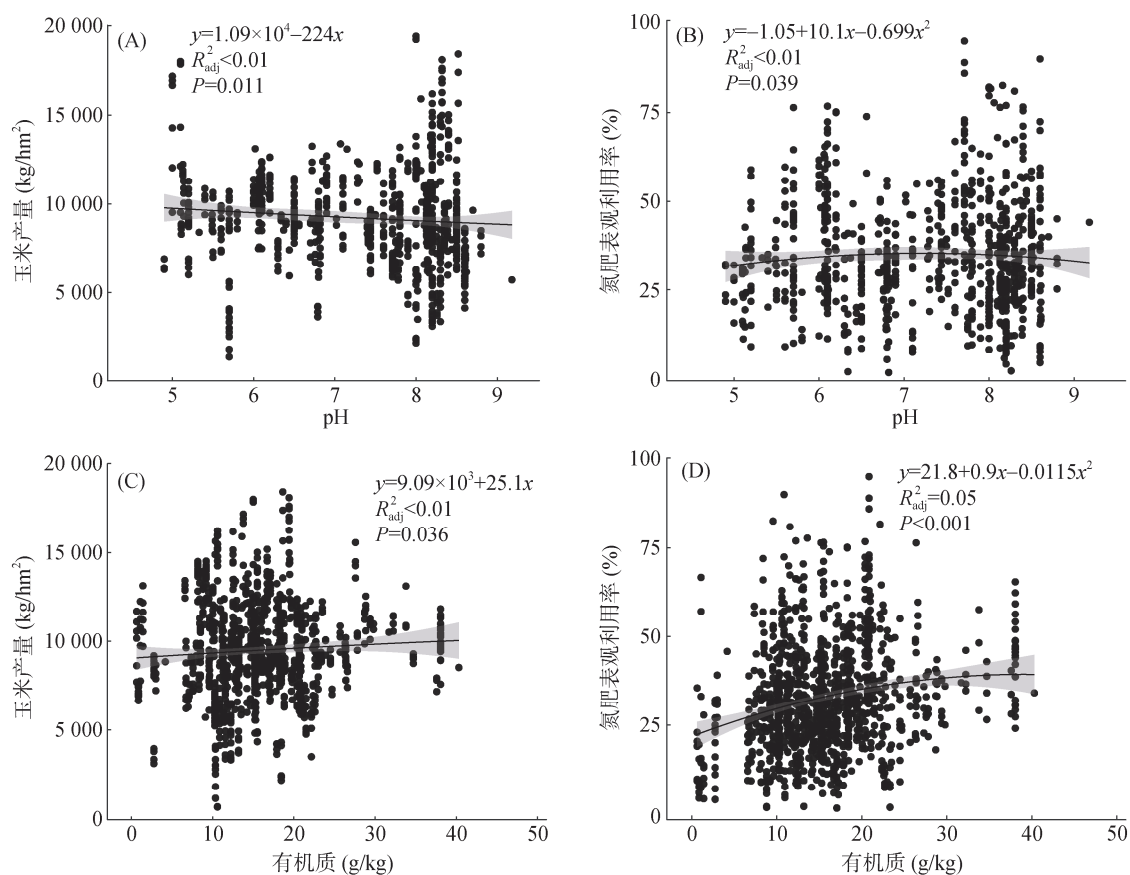


图 4 玉米产量和氮肥表观利用率随土壤 pH(A 和 B)和有机质(C 和 D)的变化

Fig. 4 Changes of maize yield and N recovery efficiency affected by soil pH(A, B) and soil organic matter (C, D)

植模式，氮肥施用量低，且辅以轮作、培肥等种养结合的养地措施，得以保持较高的地力水平，从而使得氮肥的利用率较高。

我国幅员辽阔，土壤类型丰富，气候条件各异，导致我国玉米氮肥利用率存在较大的区域性差异。本研究中，玉米表观氮肥利用率以东北地区最高(36.68%)，华东(32.33%)和西北(33.27%)地区居中，南方(30.41%)和华北(30.96%)地区偏低，这与任科宇等<sup>[15]</sup>的研究结果基本一致。一方面是由于东北地区土壤肥力较高，土壤 pH 适中，有利于玉米生长和对氮素的吸收利用；而南方地区土壤酸瘦，保水保肥能力较差，作物生长条件欠佳，导致玉米氮肥利用率较低<sup>[15,19]</sup>。范作伟等<sup>[20]</sup>的统计结果显示，东北地区土壤有机质、全氮和碱解氮含量分别平均为 30.80、1.70、165 g/kg，土壤肥力较高；土壤 pH 也大多以中性或弱酸性为主<sup>[19]</sup>。另一方面，由于华东、华北以及南方地区大多采取一年两熟的种植制度，消耗了大量的土壤养分，造成土壤肥力下降，需要提高氮肥施用量来补充土壤消耗的肥力，而东北地区采取的是一年一熟制，且土壤养分含量充足，有利于氮肥利用率的提

高。由此可见，不同地区玉米产量的差异受土壤、气候、种植制度以及施氮量等多种因素的影响。

适宜的氮肥施用量是兼顾作物高产和较高氮肥利用率的关键。宋红梅等<sup>[21]</sup>研究发现，自 2000 年以来，我国主要粮食作物施氮量逐年增加，随后在 2015 年达到顶峰，自 2015 年后呈现下降的变化趋势，其中化肥施用强度主要以华北和华东地区最高，而东北地区处于相对较低水平。本研究统计结果与前者类似，全国玉米平均施氮量在 2011—2015 年达到峰值，随后玉米施氮量有所降低。此外，本研究也发现，东北地区施氮量最低，华东地区施氮量最高。通过分析氮肥利用率随施氮量的变化关系，发现氮肥表观利用率和偏生产力随施氮量的增加呈现快速下降的趋势，氮肥农学效率和生理利用率下降趋势较缓，但玉米产量随施氮量的增加响应较缓，说明过量施用氮肥不能带来粮食产量的大幅增加，反而会造成资源浪费和氮肥损失到环境中的风险<sup>[22]</sup>。通过相对产量和施氮量的拟合方程，得到我国目前玉米最高产量下的施氮量为 221.54 kg/hm<sup>2</sup>。进一步划分和统计不同施氮量下的氮肥利用率，结果表明，当施氮量为 180~240 kg/hm<sup>2</sup>时，

能够在获得玉米较高产量的同时维持较高的氮肥利用率,这与 Yang 等<sup>[23]</sup>报道的 180~220 kg/hm<sup>2</sup> 及于飞和施卫明<sup>[17]</sup>报道的 180~240 kg/hm<sup>2</sup> 研究结果基本一致。因此,从全国尺度综合考虑,180~240 kg/hm<sup>2</sup> 是目前我国玉米适宜的施氮范围,但在不同玉米种植区需结合土壤地力、作物种植制度以及当地生产力水平来调节地区之间的施肥平衡。

随机森林模型分析结果表明,土壤 pH 和有机质是导致玉米产量和氮肥利用率地区间差异的主要因素。这与先前的研究结果一致,土壤 pH 和有机质是决定作物产量和氮肥利用率的关键土壤因子<sup>[24-26]</sup>。气候因子也会显著影响玉米产量和氮肥利用率,但与土壤因子相比,气候因子影响效应相对较弱<sup>[16]</sup>。土壤 pH 主要通过影响作物生长和氮肥的转化与损失,影响玉米产量和氮肥利用率。pH 过低会导致土壤有毒金属离子(铝、锰)活性增加,进而导致作物根系发育不良<sup>[27]</sup>、土壤硝化速率降低<sup>[28-29]</sup>,不利于作物生长和对氮素的吸收利用<sup>[30]</sup>;而 pH 过高会提高土壤氨挥发和反硝化速率,增加氮肥损失,最终导致氮肥利用率下降<sup>[31]</sup>。一般来说,玉米生长最适宜的土壤 pH 为中性至弱酸性<sup>[26, 32]</sup>,但在本研究中玉米产量与土壤 pH 呈现显著负相关关系,可能是由于文献计量分析得到的结果包含了多种影响因素,掩盖了玉米产量与土壤 pH 之间的确切关联。本研究中,土壤 pH 与氮肥表观利用率呈抛物线关系,土壤 pH 为 7.0 左右时,氮肥表观利用率最高。有机质是土壤的肥力指标,土壤有机质含量越高,供肥能力越强,通常含较高有机质的土壤能更有效地保证作物后期氮素吸收的供应<sup>[16]</sup>。先前的一项 Meta 分析结果也表明,作物产量随土壤有机质水平(在 34.48 g/kg 以内)呈现显著递增的关系,但当土壤有机质超过该阈值时,作物产量不仅不会继续增加,反而呈现下降趋势<sup>[33]</sup>。Xiao 等<sup>[26]</sup>通过采集我国玉米主产区 8 种土壤开展的 <sup>15</sup>N 盆栽试验也表明,土壤 pH 和有机质是影响玉米氮肥利用率的主要驱动因子,玉米氮肥利用率较高的土壤 pH 和有机质区间分别为 6.50~6.62 和 35.23~46.90 g/kg。因此,通过相应的土壤改良措施,例如调控土壤 pH 和培肥土壤,是缩小我国玉米氮肥利用率区域性差异、提高氮肥利用率的重要途径。

值得注意的是,本研究结论是基于文献计量分析方法获得的统计结果,其解析能力受限于原始文献中可提取的有效信息量。由于文献计量方法学本身存在双重局限性,即既有研究覆盖度的制约,又有原始数据可获取性的限制,可能导致研究结果存在系统性偏

差:①关键变量筛选偏倚,如未能考虑玉米遗传特性(氮高效基因型)、生育期动态特征(需氮关键期差异、生育期长短)及施肥技术差异(深施、分次施等)等其他影响因素对玉米氮肥利用率的贡献;②互作效应缺失,独立因子分析方法难以解析实际农田中品种-土壤-施肥系统的协同演化过程,致使研究结论的普适性受限。因此,未来研究应采用多维度验证策略:将文献计量结果与长期定位试验数据、多生态区田间观测网络相结合,建立融合基因型×环境×田间管理措施的全要素分析框架,从而实现对玉米氮肥利用率差异的立体化解析。

## 4 结论

2000—2023 年,我国玉米氮肥表观利用率、偏生产力、农学效率、生理利用率的均值分别为 32.60%、47.03 kg/kg、13.01 kg/kg 和 38.50 kg/kg。自 2000 年以来,我国玉米氮肥利用率呈现先降低后稳步上升的趋势,现阶段(2016—2023 年)玉米氮肥表观利用率与 2000—2005 年统计结果基本持平,较 2006—2010 年统计结果提升 8.83 个百分点,较 2011—2015 年统计结果提升 5.11 个百分点。玉米氮肥表观利用率存在显著区域性差异:东北地区的氮肥表观利用率最高,达 36.68%;西北和华东地区次之,分别为 33.27% 和 32.33%;华北和南方地区的氮肥表观利用率相对较低,分别为 30.96% 和 30.41%。土壤 pH 和有机质是导致玉米氮肥利用率区域性差异的主要因素。综合考虑玉米产量和氮肥表观利用率,本研究推荐 180~240 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量为目前我国玉米生产较为适宜的施氮范围。在合理施氮区间内,通过调控土壤 pH 和培肥土壤是进一步提高我国玉米氮肥利用率的关键。

## 参考文献:

- [1] 吴良泉,武良,崔振岭,等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-817.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [3] Chen X P, Zhou J C, Wang X R, et al. Optimal rates of nitrogen fertilization for a winter wheat-corn cropping system in northern China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(3/4): 583-597.
- [4] Cui Z L, Zhang F S, Miao Y X, et al. Soil nitrate-N levels required for high yield maize production in the North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82(2): 187-196.

- [5] Ju X T, Kou C L, Christie P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(2): 497–506.
- [6] 熊艳, 窦晓黎, 刘友林, 等. 云南省主要农作物化肥施用现状调查[J]. *云南农业科技*, 2004(1): 1–4, 7.
- [7] 谭德水, 刘兆辉, 江丽华, 等. 不同施肥模式对沿南四湖区玉米产量、效益及土壤硝态氮的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 887–890.
- [8] 衣文平, 朱国梁, 武良, 等. 不同量的包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1497–1502.
- [9] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 51–59.
- [10] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 64–71.
- [11] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *PNAS*, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [12] Hou P, Liu Y E, Liu W M, et al. How to increase maize production without extra nitrogen input[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 160: 104913.
- [13] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.
- [14] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1067–1077.
- [15] 任科宇, 段英华, 徐明岗, 等. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(17): 2983–2996.
- [16] Quan Z, Li S L, Zhang X, et al. Fertilizer nitrogen use efficiency and fates in maize cropping systems across China: Field  $^{15}\text{N}$  tracer studies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104498.
- [17] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- [18] Quan Z, Zhang X, Davidson E A, et al. Fates and use efficiency of nitrogen fertilizer in maize cropping systems and their responses to technologies and management practices: A global analysis on field  $^{15}\text{N}$  tracer studies[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(5): e2020EF001514.
- [19] 赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1248–1263.
- [20] 范作伟, 彭畅, 金荣德, 等. 东北地区主要土壤类型及其肥力指标与气象因子的相关性[J]. *玉米科学*, 2018, 26(3): 140–146.
- [21] 宋红梅, 李廷亮, 刘洋, 等. 我国近 20 年主要粮食作物产量、进出口及化肥投入变化特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 332–339.
- [22] Dong N Q, Lin H X. Higher yield with less nitrogen fertilizer[J]. *Nature Plants*, 2020, 6(9): 1078–1079.
- [23] Yang X L, Lu Y L, Ding Y, et al. Optimising nitrogen fertilisation: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014)[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 1–10.
- [24] Yu X, Keitel C, Zhang Y, et al. Global meta-analysis of nitrogen fertilizer use efficiency in rice, wheat and maize[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 338: 108089.
- [25] Zhu X J, Ros G H, Xu M G, et al. Long-term impacts of mineral and organic fertilizer inputs on nitrogen use efficiency for different cropping systems and site conditions in Southern China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 146: 126797.
- [26] Xiao X, Wang Y K, Dai W T, et al. Driving factors of variation in fertilizer nitrogen recovery efficiency in maize cropping systems across China and its microbial mechanism[J]. *Geoderma*, 2024, 451: 117083.
- [27] Zhao X Q, Chen R F, Shen R F. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils[J]. *Soil Science*, 2014, 179(10/11): 503–513.
- [28] Che J, Zhao X Q, Zhou X, et al. High pH-enhanced soil nitrification was associated with ammonia-oxidizing bacteria rather than Archaea in acidic soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 85: 21–29.
- [29] 武星魁, 施卫明, 徐永辉, 等. 长期不同化肥氮用量对设施菜地土壤氮素矿化和硝化作用的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1160–1166.
- [30] Zhao X Q, Shen R F. Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 807.
- [31] Ren B Z, Huang Z Y, Liu P, et al. Urea ammonium nitrate solution combined with urease and nitrification inhibitors jointly mitigate  $\text{NH}_3$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and improves nitrogen efficiency of summer maize under fertigation[J]. *Field Crops Research*, 2023, 296: 108909.
- [32] 孟赐福, 周俊三, 水建国. 土壤 pH 与土壤养分有效度和玉米生长之间的关系[J]. *土壤*, 1987, 19(3): 119–123.
- [33] Oldfield E E, Bradford M A, Wood S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields[J]. *Soil*, 2019, 5(1): 15–32.

(责任编辑: 于 飞)