

何宁波, 苏欣悦, 柏凯栋, 王恒飞, 李建华, 徐明岗. 褐土区典型县域农田全氮和氮素利用率的时空变化[J]. 土壤学报, 2025,

HE Ningbo, SU Xinyue, BAI Kaidong, WANG Hengfei, LI Jianhua, XU Minggang. Spatio-Temporal Variations of Soil Total Nitrogen and Nitrogen Use Efficiency in Farmland of A Typical County in Cinnamon Soil Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

褐土区典型县域农田全氮和氮素利用率的时空变化*

何宁波^{1,2}, 苏欣悦^{1,2}, 柏凯栋^{1,2}, 王恒飞^{1,2†}, 李建华^{1,2}, 徐明岗^{1,2†}

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; 2. 山西农业大学生态环境产业技术研究院, 土壤健康山西省实验室, 太原 030031)

摘要: 优化农田氮素管理水平是实现减肥增效战略和农业绿色发展的重要举措, 探明褐土区典型县域近四十年来农田全氮(TN)和氮素利用率(NUE)的时空变化特征, 可为提升褐土区农田氮素管理水平提供科学依据。基于山西省寿阳县 1983、2010、2023 年农田土壤性质(土壤养分等)和 1980—2023 年农业生产统计数据(种植面积、作物产量、施肥类型及用量、家畜养殖量等), 运用经典统计学、地统计学等方法分析土壤全氮时空演变特征, 采用氮平衡模型计算农田 NUE 及氮盈余, 利用随机森林等方法探究土壤全氮变化的主要影响因素。结果表明: 1983—2023 年寿阳县农田土壤全氮含量由 $0.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升至 $1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中平头镇、尹灵芝镇以及朝阳镇东部土壤全氮含量提升显著。40 年间, 寿阳县农田 NUE 呈先降低后升高的变化趋势, 由 48.63% (1980s) 降至 33.08% (2000s), 之后在 2010s 升至 43.75%。空间上, 1980s—2000s 寿阳县各区域的农田 NUE 无显著差异; 2010s 时期北部(45.52%)的 NUE 显著高于中部(36.84%)和南部(36.80%)。随机森林结果表明, 土壤有机碳和施氮量是影响寿阳县农田土壤全氮变化的关键因子, 二者对农田土壤全氮含量变化影响的相对重要性分别为 33.95% 和 10.57%。当前寿阳县农田 NUE 与氮盈余量分别为 45.78% 和 $97.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 未达到最佳氮素管理水平。其中, 北部 NUE 相对较高且氮盈余量较大, 南部的景尚乡与西洛镇 NUE 偏低且氮盈余量较高。总体而言, 40 年来寿阳县农田氮素管理水平有所提升, 但仍未达到最佳状态。建议寿阳县全域尤其是北部地区的解愁乡、中部地区的朝阳镇及南部的景尚乡和西洛镇, 需要注意氮肥合理施用, 进一步提高农田 NUE 并降低氮盈余, 以期达到最佳农田氮素管理水平。

关键词: 褐土区; 寿阳县; 全氮; 氮素利用率; 时空变化

中图分类号: S151.9

文献标志码: A

Spatio-Temporal Variations of Soil Total Nitrogen and Nitrogen Use Efficiency in Farmland of A Typical County in Cinnamon Soil Area

HE Ningbo^{1,2}, SU Xinyue^{1,2}, BAI Kaidong^{1,2}, WANG Hengfei^{1,2†}, LI Jianhua^{1,2}, XU Minggang^{1,2†}

* 山西省重大科技专项计划“揭榜挂帅”项目(202201140601028)和山西省重点研发计划项目(202102140601010) Supported by the Major Science and Technology Special Plan "Open Bidding for Selecting the Best Candidates" Project of Shanxi Province, China (No. 202201140601028) and the Key Research and Development Project of Shanxi Province, China (No. 202102140601010)

† 通讯作者 Corresponding author, Email: hfwang@sxau.edu.cn; xuminggang@caas.cn

作者简介: 何宁波(1999—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为耕地质量演变。E-mail: 2549741790@qq.com

收稿日期: 2025-04-13; 收到修改稿日期: 2025-09-22; 网络首发日期(www.cnki.net):

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. Institute of Eco-Environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University/Soil Health Laboratory in Shanxi Province, Taiyuan 030031, China)

Abstract: 【Objective】 Optimizing nitrogen management of the farmland is critical to achieve the strategy of reducing fertilizer input and improving efficiency, as well as advance the agricultural green development. This study aims to explore the spatio-temporal variations of soil total nitrogen (TN) and nitrogen use efficiency (NUE) in typical county of cinnamon soil region over the past four decades, which can provide the scientific basis for enhancing farmland nitrogen management. 【Method】 Based on the farmland soil properties (soil nutrients, etc.) in Shouyang County, Shanxi Province in 1983, 2010, and 2023, and the agricultural production statistical data (planting area, crop yields, fertilizer types and application rates, livestock breeding quantity, etc.) from 1980 to 2023, classical statistics and geostatistics were employed to analyze the spatiotemporal dynamics of TN. The farmland nitrogen balance model was used to estimate nitrogen use efficiency (NUE) and nitrogen surplus. Random-forest analysis was applied to identify the key factors that affected the variations of TN. 【Result】 From 1983 to 2023, the farmland TN content in Shouyang County increased significantly, rising from $0.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The most notable increase in TN occurred in Pingtou Town, Yinlingzhi Town, and the eastern part of Chaoyang Town. Over the past four decades, the NUE showed a pattern of first decreasing and then increasing, which declined from 48.63% in the 1980s to 33.08% in the 2000s and subsequently rose to 43.75% in the 2010s. Spatially, the farmland NUE value ranged from 30.66% to 50.99% among various regions during the 1980s to 2000s, which showed no significant difference. While in the 2010s, the NUE in the northern region (45.52%) was significantly higher than that in the central (36.84%) and southern regions (36.80%). The Random-forest analysis identified that soil organic carbon and nitrogen fertilizer amount were the key influencing factors to the changes of TN, with the relative importance of 33.95% and 10.57%, respectively. Currently, the farmland NUE and nitrogen surplus in Shouyang County were 45.78% and $97.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, which were still outside the optimal nitrogen management level. The northern region exhibited a relatively high NUE but a substantial nitrogen surplus, while Jingshang Town and Xiluo Town in the southern region recorded extremely low NUE and high nitrogen surplus. 【Conclusion】 Overall, although the farmland nitrogen management in Shouyang County has been improved over the past four decades, it still falls short of the optimal level. It is recommended that the entire Shouyang County, especially the Jiechou Town in the northern region, the Chaoyang Town in the central region, and the Jingshang Town and Xiluo Town in the southern region should prioritize rational nitrogen fertilizer amount to enhance farmland NUE, reduce nitrogen surplus, and ultimately achieve the optimal nitrogen management level.

Key words: Cinnamon soil area; Shouyang County; Total nitrogen; Nitrogen use efficiency; Spatio-temporal variation

土壤全氮是衡量农田氮素状况的重要指标,其含量和分布受到气候条件、土壤属性以及人为管理等多重因素的共同影响^[1]。已有众多学者基于地统计学和地理信息系统(GIS)技术对不同时间和空间尺度农田土壤全氮的时空变化及影响因素进行了深入研究。例如,熊杏等^[2]发现成土母质是引起南方丘陵区农田土壤全氮空间变异的主要因素。全思懋等^[3]的研究指出,在氮肥低投入及超高投入下,气候显著影响江苏省农田土壤全氮含量的时空变化。Guo和Jiang^[4]的研究表明,农田土壤全氮含量的变化受海拔、土壤类型、氮肥施用量等的影响。然而,目前对于褐土区长时间尺度下农田土壤全氮的时空变化及其影响因素仍不十分清楚。

氮素利用率是衡量农田氮素管理状况的重要指标。通常,基于差减法或¹⁵N标记的方法可用于研究投入农田化学氮肥的氮素利用率^[5],多基于长期定位试验点开展。而基于农田氮素平衡模型的方法,通过计算农田系统的氮输入和氮输出,进而评估农田氮素利用率及氮盈

余状态,可用于衡量不同区域尺度或生产体系的氮素管理水平^[6]。近年来,已有相关学者采用农田氮平衡模型对氮素利用率展开研究。例如,Shen 等^[7]研究发现,我国农田氮素利用率从 1979 年的 44% 降至 21 世纪初的 33%,此后缓慢上升至 2018 年的 44%。Chen 等^[8]对 2017 年我国县域尺度的农田氮素利用率进行了分析,发现中国大多数县域的氮素利用率在 20%~40% 之间,此外,东北地区的氮素利用率相对较高,而南方地区的氮素利用率相对较低。上述研究大多是从国家和省域大尺度或特定年份县域尺度的角度来分析我国农田氮素利用率的变化,对科学指导农田氮素管理具有重要意义。然而,目前聚焦长时间尺度下县域及乡镇中小尺度农田氮平衡及氮素利用率的研究还相对较少,而探明县域及乡镇尺度农田氮素利用率(NUE)的变化,对科学精准指导县域合理施肥、优化氮素管理水平具有重要意义。

褐土区是我国重要的玉米和小麦等粮食作物的生产基地,对保障国家粮食安全具有重要意义^[9]。随着高强度农业生产以及氮肥投入等农田管理措施的改变,褐土区农田土壤全氮含量显著提高^[10],且氮素利用率发生明显变化。然而,目前关于褐土区长时间尺度下农田全氮含量与氮素利用率的时空变化规律尚不清楚。寿阳县地处褐土典型区域,明确该县近四十年农田土壤全氮的时空变化及影响因素,厘清农田氮素利用率的变化规律,可为全国褐土区农田氮素科学管理提供参考。本研究基于寿阳县 1983、2010 和 2023 年的土壤养分数据,以及 1980—2023 年的农业生产统计数据资料,运用经典统计学、地统计学和随机森林等方法,定量分析农田土壤全氮及 NUE 的时空变化特征及其主要影响因素,以期优化褐土区农田氮素管理,实现区域农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区寿阳县地处褐土典型区域,位于黄土高原东部潇河流域中上游地区(37°34'—38°5'N, 112°6'—113°28'E),四周环山,地形复杂多样,属温带大陆性气候,年平均气温 7.4℃,年均降水量 518.3 mm,无霜期约 140 d。农业种植为一年一熟制,主要有玉米、马铃薯和小杂粮作物。本研究根据地形地貌及农业生产习惯,将寿阳县划分为三个区域:北部(平头镇、平舒乡、宗艾镇、解愁乡、温家庄乡)、中部(南燕竹镇、朝阳镇、尹灵芝镇、马首乡)和南部(羊头崖乡、上湖乡、西洛镇、景尚乡、松塔镇),定量分析不同区域农田 NUE 及氮盈余的变化。

1.2 样品采集

1983 年寿阳县农田土壤养分数据来源于第二次土壤普查资料,共计 485 个耕层(0~20 cm)土壤样本。2010 年和 2023 年,在寿阳县选取具有代表性的耕地,采用五点采样法分别采集 513 个和 109 个耕层土壤样品,不同时期采样点均覆盖所有乡镇,具体分布如图 1 所示。不同年份间土壤样品采集虽不是原位采样,但均具有较强的代表性。将采集的土样带回实验室风干,剔除动植物残体及石块等杂质,分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛,用于土壤理化性质的测定。其中,土壤全氮测定采用凯氏定氮法,土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化—外加热法,有效磷测定采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,速效钾测定采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法,pH 采用水土比为 2.5:1 的玻璃电极法进行测定^[11]。

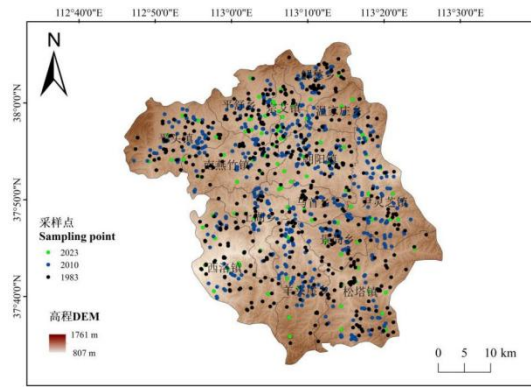


图 1 1983、2010 和 2023 年寿阳县耕地土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points at Shouyang County in 1983, 2010 and 2023

1.3 农田系统氮平衡及氮素利用率的计算

1.3.1 农田系统氮输入量 农田系统氮输入量 ($N_{\text{输入}}$) 由式 (1) 计算:

$$N_{\text{输入}} = N_{\text{化肥}} + N_{\text{有机肥}} + N_{\text{秸秆}} + N_{\text{生物固氮}} + N_{\text{大气沉降}} \quad (1)$$

式中, $N_{\text{输入}}$ 表示农田氮的总输入量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $N_{\text{化肥}}$ 、 $N_{\text{有机肥}}$ 、 $N_{\text{秸秆}}$ 分别表示化肥氮、有机肥氮以及秸秆氮的输入量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $N_{\text{生物固氮}}$ 表示生物固氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $N_{\text{大气沉降}}$ 表示氮沉降量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

化肥氮的输入量 ($N_{\text{化肥}}$) 由式 (2) 计算:

$$N_{\text{化肥}} = N_{\text{单一氮肥}} + N_{\text{复合肥}} \times R \quad (2)$$

式中, $N_{\text{单一氮肥}}$ 与 $N_{\text{复合肥}}$ 分别为 1980—2023 年寿阳县统计年鉴中氮肥折纯量与复合肥折纯量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 其中复合肥中的氮投入比例 (R) 参考解文艳等^[12]提出的 1985—2017 年山西省复合肥中的氮磷钾养分为 1:1:1 的比例折算得到。

有机肥氮的输入量 ($N_{\text{有机肥}}$) 主要包括家畜粪尿和人粪尿两部分: 可由式 (3)~式 (5) 计算得到:

$$N_{\text{有机肥}} = N_{\text{家畜粪尿}} + N_{\text{人粪尿}} \quad (3)$$

$$N_{\text{家畜粪尿}} = \frac{(S_i \times P_i \times M_i \times M_N + S_i \times P_i \times U_i \times U_N) \times R_i}{A} \quad (4)$$

$$N_{\text{人粪尿}} = \frac{(H \times M_i \times 365 \times M_N + H \times U_i \times 365 \times U_N) \times R_i}{A} \quad (5)$$

式中, S_i 为家畜 (牛、猪、羊) 年末存栏数 (head); P_i 为饲养周期 (d), 若饲养周期大于 1 年, 则以 365 d 进行计算; M_i 为粪排泄系数 ($\text{kg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); M_N 为粪含氮量 (%); U_i 为尿排泄系数 ($\text{kg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); U_N 为尿含氮量 (%); R_i 为粪尿还田率 (%); A 为作物总播种面积 (hm^2); H 为人口数。相关系数取值见表 1^[13-14]。

表 1 有机肥含氮量 ($N_{\text{有机肥}}$) 计算相关参数

Table 1 Parameters related to nitrogen calculation in organic fertilizer

来源 Source	饲养周期 Feeding cycle/d				排泄系数 Excretion coefficient/($\text{kg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)		含氮量 Nitrogen content/%		还田率 Return rate/%			
					粪 Fecal	尿 Urinary	粪 Fecal	尿 Urinary	1980s	1990s	2000s	2010s
	1980s	1990s	2000s	2010s								
人 Person					0.36	1.38	1.16	0.53	55	45	33	33
牛 Cattle	365	358	252	196	24.87	11.70	0.38	0.51	55	45	30	30

猪 Pig	192	180	151	152	2.71	3.86	0.55	0.18	55	45	65	65
羊 Sheep	365	345	241	195	2.09	0.64	1.01	0.70	55	45	33	33

注：1980s 指 1980—1989 年，1990s 指 1990—1999 年，2000s 指 2000—2009 年，2010s 指 2010—2023 年。下同。Note: The 1980s is 1980 to 1989, the 1990s is 1990 to 1999, the 2000s is 2000 to 2009, and the 2010s is 2010 to 2023. The same below.

秸秆氮的输入量 ($N_{\text{秸秆}}$) 可由式 (6) 计算:

$$N_{\text{秸秆}} = Y_i \times R_i \times N_c \times R_r \quad (6)$$

式中, Y_i 表示不同作物的经济产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 来源于 1980—2023 年寿阳县统计年鉴中主要作物产量数据; R_i 表示不同作物的草谷比; N_c 表示不同作物的秸秆含氮量 (%); R_r 表示不同作物的秸秆还田率 (%). 相关参数取值见表 2^[13].

表 2 寿阳县主要作物草谷比、秸秆含氮量及秸秆还田率

Table 2 Ratio of grass to grain, nitrogen content of straw and return rate of straw for the main crops in Shouyang County

作物类型 Crop type	草谷比 Grass-grain ratio	秸秆含氮量 Nitrogen content of straw/%	秸秆还田率 Straw return rate/%			
			1980s	1990s	2000s	2010s
玉米 Corn	1.23	0.89	26.80	41.99	34.30	77.29
谷子 Millet	1.45	0.58	18.52	9.87	35.75	58.26
高粱 Sorghum	1.85	1.20	18.52	45.93	35.75	58.26
大豆 Soybean	1.53	0.89	18.52	45.93	35.75	58.26
马铃薯 Potato	0.50	2.35	18.52	45.93	35.75	58.26
胡麻 Flax	2.25	1.13	18.52	45.93	35.75	58.26
其他油料作物 Other oil crops	2.16	0.81	18.52	45.93	35.75	58.26

生物固氮量 ($N_{\text{生物固氮}}$) 可由式 (7) 计算:

$$N_{\text{生物固氮}} = \frac{A_i \times F_i + A_j \times F_j}{A} \quad (7)$$

本研究将生物固氮分为农田共生固氮和非共生固氮两个部分, 式 (7) 中 A_i 表示大豆播种面积 (hm^2), 通过寿阳县统计年鉴大豆播种面积数据获得; F_i 表示大豆氮固定系数, 取值为 $113.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[15]; A_j 表示除大豆外的其他旱地作物播种面积 (hm^2), 可通过寿阳县统计年鉴中作物播种面积数据获得; F_j 表示农田非共生固氮系数, 由于寿阳县为旱作农业区, 所以仅考虑旱地非共生固氮, 该系数取值为 $15.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[15]; A 表示作物总播种面积 (hm^2).

氮沉降量 ($N_{\text{大气沉降}}$) 可由式 (8) 计算, 以单位面积沉降量表示:

$$N_{\text{大气沉降}} = A \times R \quad (8)$$

式中, A 表示作物总播种面积 (hm^2); R 表示单位面积氮沉降量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 基于 Gao 等^[16]的 1980—2013 年中国氮沉降数据集, 通过 ArcGIS 10.8 计算寿阳县逐年单位面积氮沉降量, 并进行线性推算将单位面积氮沉降量数据扩展至 2023 年.

1.3.2 农田系统氮输出量 农田系统氮总输出量 ($N_{\text{输出}}$) 包括作物收获的氮输出和氮损失输出两部分, 可由式 (9) 计算:

$$N_{\text{输出}} = N_{\text{作物收获}} + N_{\text{损失}} \quad (9)$$

其中, 作物收获氮量 ($N_{\text{作物收获}}$) 可由式 (10) 计算:

$$N_{\text{作物收获}} = Y_i \times \text{AN}_i \times 10^2 \quad (10)$$

式中, Y_i 表示作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); AN_i 表示作物经济产量所需氮量 ($\text{kg} \cdot 100 \text{ kg}^{-1}$), 玉米、谷子、高粱、大豆、马铃薯、胡麻以及其他油料作物分别为 2.03、2.66、2.45、7.56、0.51、

6.22、4.91 kg·100 kg⁻¹[13]。

农田氮素损失主要考虑氮挥发 ($N_{\text{氮挥发}}$) 和氮素淋溶 ($N_{\text{淋溶}}$) 两部分, 由式 (11) 计算:

$$N_{\text{损失}} = N_{\text{氮挥发}} + N_{\text{淋溶}} \quad (11)$$

其中, 氮挥发氮损失 ($N_{\text{氮挥发}}$) 主要包括化肥氮挥发和有机肥氮挥发两部分, 可由式 (12) 计算:

$$N_{\text{氮挥发}} = N_{\text{化肥}} \times R_i + N_{\text{有机肥}} \times R_j \quad (12)$$

式中, R_i 为化肥氮挥发系数, 取值为 11%^[17]; R_j 为有机肥氮挥发系数, 采用联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 推荐的默认值 20%^[18]。

氮素淋溶 ($N_{\text{淋溶}}$) 仅考虑化肥氮的淋溶, 根据张玉树等^[19]的研究, 我国北方旱地的反硝化损失量不到施氮量的 2%, 而寿阳县属于旱作农业区, 所以本研究不考虑化肥氮反硝化损失。由式 (13) 计算:

$$N_{\text{淋溶}} = N_{\text{化肥}} \times R_i \quad (13)$$

式中, R_i 为氮淋溶损失系数, 取值 18.6%^[20]。

1.3.3 农田系统氮盈余和氮素利用率 采用农田系统氮平衡模型来计算农田系统氮盈余量及 NUE。农田系统氮盈余量指农田氮总输入量减去氮总输出量后的剩余氮量; NUE 指农田系统中作物收获氮量与氮总输入量的比值^[21]。二者分别由式 (14)、式 (15) 计算:

$$N_{\text{盈余}} = N_{\text{输入}} - N_{\text{输出}} \quad (14)$$

$$\text{NUE}(\%) = \frac{N_{\text{作物收获}}}{N_{\text{输入}}} \times 100 \quad (15)$$

1.3.4 农田氮素管理水平的评价 采用欧盟氮专家小组 (EU Nitrogen Expert Panel) 提出的农田氮素管理综合评价体系^[22], 对寿阳县农田系统氮素管理水平进行评价。该体系提出了基于作物收获氮量、NUE 和氮盈余的农田最佳氮素管理水平量化标准, 即: 作物收获氮量 $\geq 80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $50\% \leq \text{NUE} \leq 90\%$ 以及氮盈余 $\leq 80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 作物收获氮量阈值为 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 以保障农业生产的最低氮素需求, 而 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的氮盈余上限则旨在最大限度减少氮素向环境系统的迁移损失, 以控制环境污染风险。

1.4 数据处理

采用平均值加减三倍标准差的原则对异常值进行剔除^[23]。采用 SPSS 23.0 进行描述性统计分析、LSD 显著性分析、正态分布检验和 Spearman 相关性分析。参照全国第二次土壤普查农田土壤全氮含量分级标准, 将其分为六个等级, 其中六级到一级含量分别为: <0.50 、 $0.50 \sim 0.75$ 、 $0.75 \sim 1.00$ 、 $1.00 \sim 1.50$ 、 $1.50 \sim 2.00$ 以及 $>2.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 ArcGIS 10.8 中采用普通克里金插值方法绘制不同时期土壤全氮含量空间分布图。基于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>) 下载研究区 30 m 分辨率的数字高程模型 (DEM), 利用 ArcGIS 10.8 提取采样点位的高程数据, 并计算坡度。通过资源环境科学与数据平台 (<https://www.resdc.cn/>) 获取气候数据集^[24], 并运用 ArcGIS 10.8 提取采样点位的年均气温与年降水量。通过 R 语言中的 “Random-Forest 包” 构建随机森林模型, 其中 70% 的数据用于训练集, 30% 的数据用于测试集, 进而分析各影响因子对土壤全氮含量影响的相对重要性。

2 结果

2.1 农田土壤全氮的时空变化特征

1983—2023 年寿阳县农田土壤全氮含量呈现增加趋势 (表 3)。相较于 1983 年, 2010

和 2023 年土壤全氮含量分别增加了 12.12%和 54.55%。根据全国第二次土壤普查的养分分级标准, 寿阳县农田土壤全氮含量由五级水平显著提升至三级水平。从空间上看, 1983 年寿阳县农田土壤全氮含量整体相对较低, 北部平头镇、平舒乡和宗艾镇等地区的土壤全氮含量相对较高, 南部(如羊头崖乡)土壤全氮含量相对较低(图 2)。1983—2010 年, 北部平舒乡、中部南燕竹镇和朝阳镇、南部景尚乡的农田土壤全氮含量增加显著。2010—2023 年寿阳县农田土壤全氮含量整体增加显著, 其中平头镇、尹灵芝镇及朝阳镇东部农田土壤全氮含量增加较为明显。

表 3 1983、2010 和 2023 年寿阳县农田土壤全氮统计特征

Table 3 Statistical analysis of the soil total nitrogen (TN) at Shouyang County in 1983, 2010 and 2023

年份 Year	样本数 Sample number	均值 Mean value/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	最小值 Minimum/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 Maximum/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
1983	485	0.66 c	0.14	20.36	0.30	1.08
2010	513	0.74 b	0.22	29.44	0.06	1.49
2023	109	1.02 a	0.23	22.16	0.52	1.58

注: 不同小写字母表示不同时期土壤全氮含量存在显著差异 ($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences in soil total nitrogen (TN) at different periods at 0.05 level.

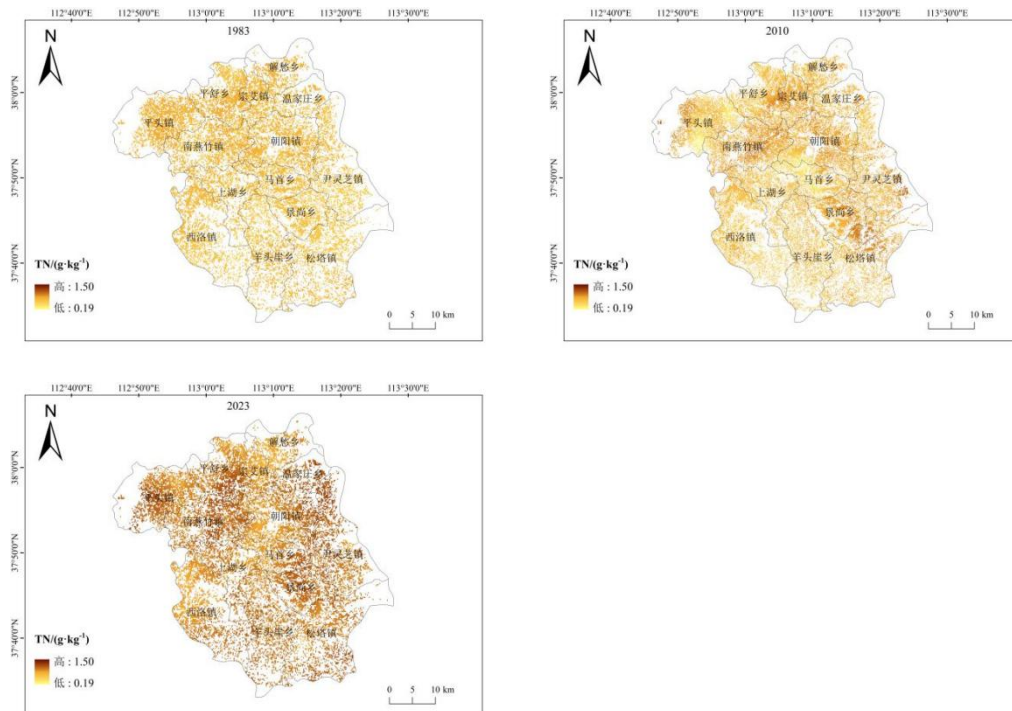


图 2 1983、2010 和 2023 年寿阳农田土壤全氮的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil total nitrogen (TN) at Shouyang County in 1983, 2010 and 2023

2.2 农田氮输入、氮输出及氮盈余的变化

1980—2023 年寿阳县农田氮输入量呈先上升后降低的趋势(图 3a)。由 1980 年的 $109.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 增至 2013 年的 $366.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 并达到峰值; 2013 年后, 寿阳县农田氮输入量显著降低, 2023 年降至 $308.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 相较于 2013 年降低了 15.79%。40 多年来, 化学氮肥输入在农田氮输入中的占比增加显著, 由 1980 年的 42.44%增至 2013 年的 71.80%; 2013 年后, 其占氮输入总量的比例虽有所下降, 但仍保持在 62.45%~65.78%之间, 化学氮肥仍是农田氮输入的主要来源。2009 年后, 秸秆氮的输入量显著增加, 由 1980—2009 年的 $3.5\sim16.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 增至 2010—2023 年的 $46.0\sim58.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

与氮输入的变化类似,寿阳县农田的氮输出量由 1980 年的 $49.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 增至 2013 年的 $241.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 之后有所降低 (图 3b)。作物收获氮量是农田氮素输出的主要形式, 其占比为 44.91%~83.11%。

1980—2023 年寿阳县农田氮素总体处于盈余状态 (图 3b), 40 多年来农田氮盈余量呈现先上升后趋于平稳的变化过程, 由 1980 年的 $59.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 上升至 1999 年的 $133.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 之后 (2000—2023 年), 介于 $81.4\text{--}126.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间。2023 年, 寿阳县农田氮盈余量为 $97.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 较 1980 年提升了 62.81%。

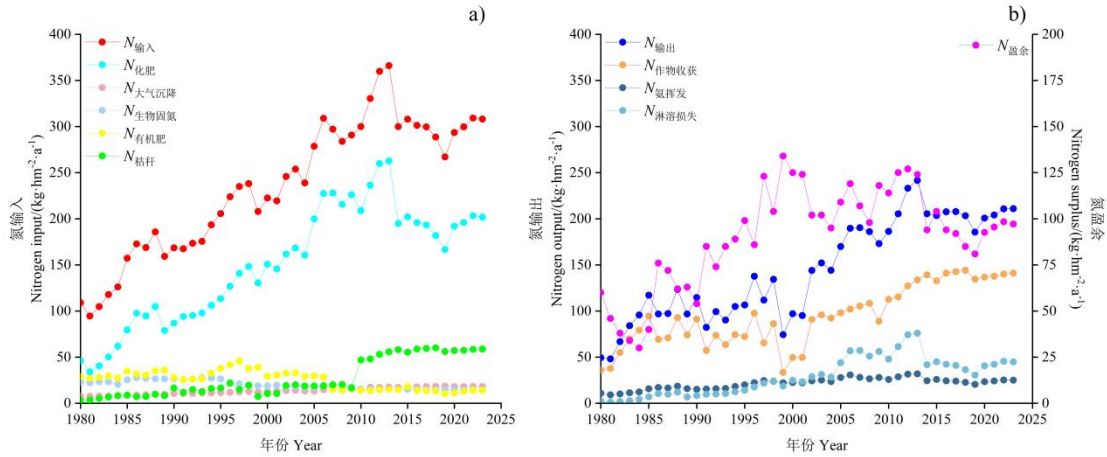


图 3 1980—2023 年寿阳县农田氮输入 (a)、氮输出及氮盈余 (b) 的变化

Fig. 3 Changes of nitrogen input (a), nitrogen output and nitrogen surplus (b) of the farmland in Shouyang County from 1980 to 2023

1980—2023 年寿阳县不同区域农田氮输入量和作物收获氮量的变化如表 4 所示。1980s 寿阳县农田的氮输入量与作物收获氮量分别为 139.7 和 $68.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。这一时期北部的氮输入量最高, 但作物收获氮量区域间无显著差异。1990s 中部和南部的氮输入量较 1980s 均显著增加, 但区域间无显著差异; 而作物收获氮量较 1980s 无显著变化。2000s 北部的氮输入量与作物收获氮量均为最高。2010s 同样是北部的氮输入量与作物收获氮量均为最高, 分别为 374.0 和 $169.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

表 4 1980—2023 年寿阳县不同区域农田氮输入及作物收获氮量的变化

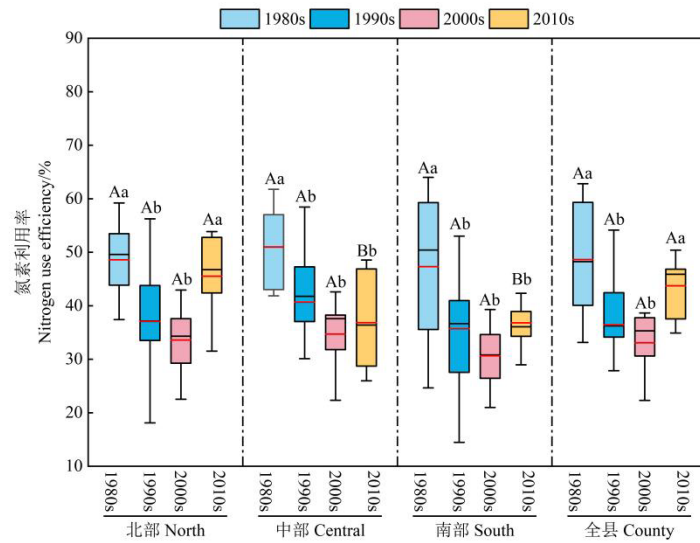
区域 Region	氮输入 Nitrogen input/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$				作物收获氮量 Crop removal nitrogen/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$			
					1)			
	1980s	1990s	2000s	2010s	1980s	1990s	2000s	2010s
北部 North	158.2Ac	191.7Ac	292.1Ab	374.0Aa	77.4Ac	66.9Ac	98.4Ab	169.7Aa
中部 Central	137.7ABd	206.0Ac	251.8Bb	363.9Aa	69.9Ab	81.8Ab	88.1ABb	131.0Ba
南部 South	125.0Bd	184.1Ac	241.9Bb	307.1Ba	59.1Ab	64.8Ab	75.2Bb	122.1Ba
寿阳县 Shouyang County	139.7d	198.9c	264.0b	309.4a	68.0c	71.5c	88.1b	134.2a

注: 不同大写字母表示同一时间不同区域的差异; 不同小写字母表示同一区域不同时间的差异 ($P<0.05$)。下同。Note: Different capital letters indicate the difference between different regions at the same time; Different lowercase letters indicate the time difference in the same area ($P<0.05$). The same below.

2.3 农田氮素利用率的变化

1980s—2010s 寿阳县农田 NUE 呈现先降低后升高的趋势 (图 4), 由 1980s 的 48.63% 降至 2000s 的 33.08%, 2010s 又上升至 43.75%。同一地区不同时间看, 北部 1980s 的 NUE 最高, 为 48.59%, 显著高于 1990s 和 2000s, 而与 2010s 差异不显著; 1980s 中部和南部的

NUE 分别为 50.99%和 47.31%，均显著高于其他三个时期。同一时间不同区域看，1980s—2000s 三个区域间的农田 NUE 无显著差异；2010s 时期，北部的 NUE 最高，显著高于中部与南部（ $P<0.05$ ），而中部与南部的 NUE 无显著差异。



注：黑色横线表示中值，红色横线表示平均值。Note: The black lines represent the median value, and the red lines represent the mean value.

图 4 1980s—2010s 寿阳县不同区域农田氮素利用率（NUE）的变化

Fig. 4 Changes of nitrogen use efficiency of the farmland in different regions of Shouyang County from 1980s to 2010s

2.4 土壤全氮含量变化的影响因素

表 5 为 1983—2023 年间气候条件（年均气温、年降水量）、地形因素（高程、坡度）、土壤性质（有机碳、有效磷、速效钾和 pH）以及施肥措施（施氮量）与土壤全氮含量间的 Spearman 相关性分析结果。由表可知，农田土壤全氮含量与土壤有机碳、有效磷、速效钾含量、年降水量及施氮量呈现极显著正相关关系，与 pH、坡度和年均气温呈现极显著负相关（ $P<0.01$ ）。

采用随机森林模型对土壤全氮变化有显著影响的因素进行相对重要性排序（图 5）。结果显示，土壤有机碳对土壤全氮含量变化的影响最大，相对重要性为 33.95%；速效钾、pH、有效磷对土壤全氮含量变化的相对重要性分别为 16.63%、15.68%和 3.29%。气候因子（年均气温和年降水量）对土壤全氮含量变化的相对重要性为 19.16%，其中年降水量的相对重要性为 11.20%，年均气温的相对重要性为 7.96%。施氮量对土壤全氮含量变化的相对重要性为 10.57%；坡度对土壤全氮含量变化的相对重要性较低，为 0.72%。

表 5 寿阳县农田土壤全氮与土壤性质、气候条件以及施肥之间的 Spearman 相关性分析

Table 5 Spearman correlation analysis of soil total nitrogen (TN) with soil properties, climatic condition and fertilization in

Shouyang County

指标 Index	全氮 TN	有机碳 SOC	有效磷 AP	速效钾 AK	pH	年均气温 MAT	年降水量 MAP	高程 DEM	坡度 Slope	施氮量 N fertilizer amount
全氮 TN	1									
有机碳 SOC	0.63**	1								
有效磷 AP	0.32**	0.23**	1							
速效钾 AK	0.30**	0.21**	0.11**	1						
pH	-0.18**	-0.06	0.14**	0.16**	1					
年均气温 MAT	-0.09**	-0.09**	0.02	-0.01	0.01	1				

年降水量 MAP	0.32**	0.39**	0.11**	0.40**	0.03	-0.26**	1			
高程 DEM	0.05	0.04	-0.05	0.03	0.01	-0.92**	0.28**	1		
坡度 Slope	-0.11**	-0.17**	-0.06**	-0.08**	-0.02	0.06	-0.20**	-0.01	1	
施氮量 N										
fertilizer amount	0.25**	0.38**	0.11**	0.34**	0.03	0.01	0.79**	-0.03	-0.22**	1

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)，**表示极显著相关 ($P<0.01$)。Note: * indicates the significant relationship ($P<0.05$), and ** indicates the very significant relationship ($P<0.01$).

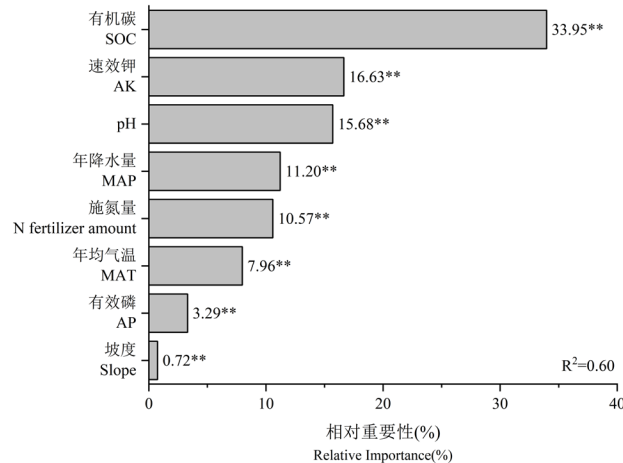


图 5 1983—2023 年各因子对寿阳县农田土壤全氮含量变化影响的相对重要性

Fig. 5 Relative importance of the influencing factors to the change of farmland soil total nitrogen(TN) in Shouyang County from 1983 to 2023

2.5 农田氮素管理水平的评价

根据欧盟氮专家小组提出的农田氮素管理综合评价体系^[22], 2023 年寿阳县农田氮素管理水平见表 6。2023 年寿阳县的作物收获氮量、农田 NUE 和氮盈余量分别为 $141.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、45.78%和 $97.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 未达到最佳氮素管理水平。从空间上看, 2023 年寿阳县不同区域均未达到最佳氮素管理水平, 尽管北部的 NUE 为 53.48%, 处于最佳范围, 但氮盈余量仍相对较高, 为 $93.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 南部的 NUE 最低, 为 35.94%, 且氮盈余较大, 为 $124.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从不同乡镇来看, 北部的解愁乡、中部的朝阳镇以及南部的景尚乡与西洛镇农田 NUE 相对较低且氮盈余较大, 分别为 37.74%和 $143.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、35.32%和 $152.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、22.17%和 $147.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以及 28.65%和 $167.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 6 2023 年寿阳县不同区域 (乡镇) 农田氮素利用率及氮盈余

Table 6 Nitrogen use efficiency and nitrogen surplus of the farmland in different regions of Shouyang County in 2023

区域 Region	氮输入 Nitrogen input/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮输出 Nitrogen output/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	作物收获氮 Crop removal nitrogen/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	NUE/%	氮盈余 Nitrogen surplus/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
解愁乡 Jiechou Town	351.5	208.5	132.7	37.74	143.0
平舒乡 Pingshu Town	300.4	235.2	179.9	59.88	65.2
平头镇 Pingtou Town	369.1	285.7	215.2	58.32	83.4
温家庄乡 Wenjiazhuang Town	269.2	171.3	117.0	43.46	97.9
宗艾镇 Zongai Town	425.9	301.5	214.9	50.45	124.4
北部 North	345.3	252.2	184.7	53.48	93.1
朝阳镇 Chaoyang Town	356.5	203.8	125.9	35.32	152.8
马首乡 Mashou Town	278.8	208.6	155.7	55.84	70.2

南燕竹镇 Nanyanzhu Town	283.4	207.4	153.2	54.08	76.0
尹灵芝镇 Yinlingzhi Town	258.7	195.1	147.7	57.11	63.5
中部 Central	299.8	205.2	145.5	48.54	94.7
羊头崖乡 Yangtouya Town	336.5	212.1	140.4	41.73	124.4
景尚乡 Jingshang Town	268.4	120.9	59.5	22.17	147.6
上湖乡 Shanghu Town	320.2	206.1	138.8	43.35	114.1
松塔镇 Songta Town	195.7	117.7	80.4	41.10	77.9
西洛镇 Xiluo Town	346.2	178.4	99.2	28.65	167.7
南部 South	291.4	167.4	104.8	35.94	124.0
寿阳县 Shouyang County	308.2	211.0	141.1	45.78	97.2

3 讨论

3.1 农田土壤全氮含量的变化及其影响因素

土壤全氮是衡量土壤肥力的重要指标之一，其含量的高低不仅反映了土壤的供氮能力，还能指示土壤肥力水平和潜在生产力^[25]。本研究结果表明，1983—2023 年寿阳县农田土壤全氮含量呈增加趋势。40 年来寿阳县农田土壤全氮的变化与施氮量密切相关，两者存在极显著正相关关系（表 5）。本研究结果显示，1983—2023 年，寿阳县农田的氮肥施用量由 $46.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 提升至 $201.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ （图 3a），增加了 3.36 倍。因此，氮肥施用量的增加显著提高了土壤全氮含量。许多研究均表明，随着我国农业的快速发展，化学肥料尤其是氮肥投入的显著增加，直接导致了农田土壤全氮含量的增加^[26]。此外，氮肥施用量的增加有利于提高作物产量以及生物量，在寿阳县政府大力推广秸秆还田的政策引导下，也间接导致秸秆氮的输入量增加（图 3a），从而有利于农田土壤全氮含量的提高^[27]。

Spearman 相关性分析和随机森林结果表明，土壤全氮和有机碳之间存在极显著的正相关关系（表 5），有机碳对全氮含量变化影响的相对重要性为 33.95%（图 5）。这是由于土壤全氮与有机质关系密切，其动态变化受有机质含量的影响^[28]。一方面，有机碳为微生物提供碳源，从而驱动含氮有机质矿化，通过氨化和硝化作用向土壤中释放无机氮^[29]；另一方面，有机碳可转化为腐殖质，其结构中的官能团与碳骨架结合固存氮素，从而减少农田土壤氮素的损失^[30]。此外，本研究结果也发现，寿阳县农田土壤全氮含量与年均气温呈负相关关系，而与年降水量呈正相关关系（表 5），这与代子骏等^[31]的研究结果一致。这可能是因为年均气温较高的地区土壤微生物活性较高，使得氨化速率有所提高，导致有机氮向无机氮转化加剧，且温度提升会导致农田硝态氮淋溶增加，不利于土壤氮素的积累^[32-33]；而在年降水量较高的地区，土壤湿度较大，土壤微生物活动频繁，从而增加土壤中的生物固氮量^[34]。此外，年降水量的增加有利于提高大气氮的湿沉降效率，从而增加农田土壤全氮含量^[35]。

3.2 农田系统氮素利用率的变化

农田系统氮平衡模型通过估算氮输入和氮输出量，进而评估农田氮盈余和 NUE，是评价农田系统氮素管理水平随时间变化的重要手段^[8]。1980—2023 年寿阳县农田的氮输入量呈先上升后下降的趋势，其中，作为主要输入来源的化肥氮在 2013 年达到峰值后迅速下降（图 3a），这与寿阳县实施的化肥减施增效政策密切相关。解文艳等^[12]对山西省农田化肥投入量的变化进行了探究，其结果表明，山西省农田化肥投入在 1985—2013 年呈增加趋势，2013 年达到峰值，之后有所下降。受政策引导，寿阳县农田化肥氮输入量也表现出类似的变化趋势。

NUE 是衡量农田氮素管理水平的重要指标^[36]。1980s—2010s 寿阳县农田 NUE 呈先降

低后升高的趋势(图4),这主要是因为相较于1980s,2000s寿阳县农田的氮输入量提高了88.97%,而作物收获氮量仅提高了29.56%,从而导致寿阳县农田NUE降低了15.55%;2010s寿阳县农田的氮输入量较2000s提高了17.20%,而作物收获氮量提高了52.33%,导致该时期的农田NUE较2000s显著提高。本研究中,寿阳县同时期的NUE均高于Liu等^[37]在长江流域的研究结果。这一发现与He等^[14]的结论相似,他们发现1984—2014年我国华北地区农田NUE整体呈先降低后升高的趋势,且华北地区的NUE高于长江流域地区。此外,2010s寿阳县北部的NUE显著高于中部和南部,这主要是因为与北部相比,该时期中部和南部的氮输入量分别低了2.70%和17.89%,而作物收获氮量则分别低了22.80%和28.05%。因此,相较于氮输入量,作物收获氮量的降低幅度更大,从而导致中部和南部的NUE低于北部。

当前,寿阳县北部地区的解愁乡、中部地区的朝阳镇、南部地区的景尚乡与西洛镇的农田NUE相对较低且氮盈余较大,这主要是因为与全县平均水平相比,2023年解愁乡、朝阳镇与西洛镇农田氮输入量分别高了14.05%、15.67%和12.33%,但作物收获氮量则分别低了5.95%、10.77%和29.70%,导致这些乡镇的NUE低于全县平均值;而景尚乡的氮输入量与作物收获氮量较全县平均水平分别降低了12.91%和57.83%,由于作物收获氮量的降低幅度远高于氮输入量,因此景尚乡的农田NUE同样较低。此外,与全县平均水平相比,解愁乡、朝阳镇与西洛镇农田氮输入量有所增加,但氮输出量分别降低了1.18%、3.41%和15.45%,导致这些乡镇出现较大的农田氮盈余,而景尚乡氮输出量的降低幅度(42.70%)要高于氮输入量的降低幅度(12.91%),因此也导致该乡镇的农田氮盈余量较大。

综上,寿阳县农田土壤全氮和氮素利用率的变化与化肥氮投入以及秸秆还田等人为管理措施密切相关。建议寿阳县全域尤其是北部的解愁乡、中部的朝阳镇以及南部的景尚乡和西洛镇,强化氮素精细化管理:一方面推行测土配方施肥并结合分期施氮方式,根据作物需求调控施氮用量,减少冗余投入;另一方面,通过适当增施有机肥,同时配合秸秆还田等措施,以改善褐土保肥能力,降低因过量单施化肥导致的氮素流失风险,从而实现区域农田氮素高效利用与土壤肥力提升的双重目标。

4 结论

1983—2023年寿阳县农田土壤全氮含量整体呈现增加趋势,由 $0.66\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $1.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,整体由五级提升至三级。从空间上看,40年来寿阳县平头镇、尹灵芝镇和朝阳镇东部农田土壤全氮含量提升显著。土壤有机碳和施氮量是引起土壤全氮时空变异的重要因素,二者对农田土壤全氮含量变化影响的相对重要性分别为33.95%和10.57%。40年来,寿阳县农田NUE整体呈先降低后升高的趋势。当前,寿阳县全域整体尚未达到最佳氮素管理水平,其中,北部地区的NUE虽处于最佳范围但氮盈余量仍较高,南部地区的氮素利用率偏低且氮盈余量较高。建议寿阳县全域尤其是北部的解愁乡、中部的朝阳镇以及南部的景尚乡和西洛镇,应注意合理施用氮肥,并采用有机肥替代、精准施肥等方式,提高氮素利用率并减少氮盈余,以期达到最佳氮素管理水平。

参考文献 (References)

- [1] Feng B C, Ma J, Liu Y, et al. Research progress of nitrogen transport and transformation in farmland soils[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(2): 277-287. [冯冰聪, 马杰, 刘勇, 等. 氮素在农田土壤中迁移转化的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(2): 277-287.]
- [2] Xiong X, Xiong Q H, Guo X, et al. Spatial variation characteristics of total nitrogen, organic carbon and ratio of carbon to nitrogen of cultivated land in typical hilly areas in south China and its influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and

土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

- Fertilizers, 2020, 26(9): 1656-1668. [熊杏, 熊清华, 郭熙, 等. 南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(9): 1656-1668.]
- [3] Quan S M, Wang X K, Hu F. Changes of soil total nitrogen content in farmland of Jiangsu Province and its influencing factors[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, 41(6): 1078-1084. [全思懋, 王绪奎, 胡锋. 江苏省农田土壤全氮含量变化及其影响因子[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(6): 1078-1084.]
- [4] Guo X, Jiang Y F. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 263-274.
- [5] Yang X L, Lu Y L, Li R, et al. Discussion on the calculation method of nitrogen use efficiency (NUEs) in long-term field experiments under wheat and maize rotation systems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3514-3520. [杨宪龙, 路永莉, 李茹, 等. 小麦-玉米轮作体系多年定位试验中作物氮肥利用率计算方法探讨[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3514-3520.]
- [6] Ju X T, Gu B J. Indexes of nitrogen management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 281-296. [巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296.]
- [7] Shen W Z, He J, Li S S, et al. Opportunity and shift of nitrogen use in China[J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(1): 33-40.
- [8] Chen B H, Ren C C, Wang C, et al. Driving forces of nitrogen use efficiency in Chinese croplands on county scale[J]. Environmental Pollution, 2023, 316: 120610.
- [9] Chen Y H, Wang L, Zhang S X, et al. Quality change of cinnamon soil cultivated land and its effect on soil productivity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(24): 4540-4554. [陈延华, 王乐, 张淑香, 等. 我国褐土耕地质量的演变及对生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(24): 4540-4554.]
- [10] Tian Y G, Zhang S X, Liu J, et al. Change of soil fertility indices and crop yield of cinnamon soil and its affecting factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(1): 105-111. [田有国, 张淑香, 刘景, 等. 褐土耕地肥力质量与作物产量的变化及影响因素分析[J]. 植物营养与肥科学报, 2010, 16(1): 105-111.]
- [11] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [12] Xie W Y, Zhou H P, Yang Z X, et al. Regional differentiation of chemical fertilizers input and environmental risk assessment in Shanxi Province [J]. Ecological Science, 2021, 40(5): 122-128. [解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 山西省化肥投入区域分异及环境风险评价[J]. 生态科学, 2021, 40(5): 122-128.]
- [13] Liu X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. [刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.]
- [14] He W T, Jing R, He P, et al. Estimating soil nitrogen balance at regional scale in China's croplands from 1984 to 2014[J]. Agricultural Systems, 2018, 167: 125-135.
- [15] Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient Input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207-4229. [李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207-4229.]
- [16] Gao Y, Zhou F, Ciais P, et al. Human activities aggravate nitrogen-deposition pollution to inland water over China[J]. National Science Review, 2020, 7(2): 430-440.
- [17] Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778-783. [朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.]
- [18] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S, et al. Nitrogen cycling and balance in winter-wheat-summer-maize rotation system in Northern China Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(4): 684-697. [赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697.]
- [19] Zhang Y S, Ding H, Qin S J. Progress in the studies of nitrogen denitrification and N₂O emission in agro-ecosystem[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 253-259. [张玉树, 丁洪, 秦胜金. 农业生态系统中氮素反硝化作用与 N₂O 排放研

- 究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 253-259.]
- [20] Yang Z P. Integrated plant nutrient management for white-maizerotation system in Shanxi[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2012. [杨治平. 山西省小麦—玉米轮作系统养分资源综合管理研究[D]. 太原: 山西大学, 2012.]
- [21] Ren K Y, Xu M G, Li R, et al. Optimizing nitrogen fertilizer use for more grain and less pollution[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 132180.
- [22] EU Nitrogen Expert Panel. Nitrogen use efficiency (NUE): An indicator for the utilization of nitrogen in food systems[M]. Wageningen: Wageningen University & Research, 2015.
- [23] Shen T, Wang H F, Du W B, et al. Spatial-temporal variability characteristics and main controlling factors of soil fertility in Shouyang County of cinnamon soil area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(21): 4259-4271. [申桐, 王恒飞, 杜文波, 等. 褐土区典型县域耕地土壤肥力时空演变特征及主控因素[J]. 中国农业科学, 2023, 56(21): 4259-4271.]
- [24] Xu X L. Annual spatial interpolation datasets of meteorological elements in China[DB/OL]. Registration and Publication System of Resources and Environment Science Data (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI:10.12078/2017121301. [徐新良. 中国气象要素年度空间插值数据集[DB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI:10.12078/2017121301.]
- [25] Zhang G Y, Fu G. Changes in soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in 2000–2020 and their driving mechanisms in Tibetan alpine grasslands[J]. Global and Planetary Change, 2024, 239: 104484.
- [26] Zhao X M, Shao H, Shi Q H, et al. Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 723-730. [赵小敏, 邵华, 石庆华, 等. 近 30 年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 723-730.]
- [27] Huang T T, Yang N, Lu C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 214: 105171.
- [28] Muhtar·AMAT, Zhou Y, Wu Z X. Total nitrogen in plough layer soil in northwest Hubei: Spatial variability and influencing factors[J]. Journal of Agriculture, 2022, 12(1): 12-21. [木合塔尔·艾买提, 周勇, 吴正祥. 鄂西北耕层土壤全氮含量空间分异特征及其影响因素分析[J]. 农学学报, 2022, 12(1): 12-21.]
- [29] Colman B P, Schimel J P. Drivers of microbial respiration and net N mineralization at the continental scale[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 60:65-76.
- [30] Elrys A S, Uwiragiye Y, Zhang Y H, et al. Expanding agroforestry can increase nitrate retention and mitigate the global impact of a leaky nitrogen cycle in croplands[J]. Nature Food, 2023, 4(1):109-121.
- [31] Dai Z J, Zhao X, Li D C, et al. Spatio-temporal variation of soil total nitrogen in Huangshui River basin and its affecting factors in the past 30 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 338-350. [代子俊, 赵霞, 李德成, 等. 近 30 年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 338-350.]
- [32] Elrys A S, Zhu Q L, Jiang C L, et al. Global soil nitrogen cycle pattern and nitrogen enrichment effects: tropical versus subtropical forests[J]. Global Change Biology, 2023, 29(7): 1905-1921.
- [33] Wang W L, Kong W D, Zeng H. A meta-analysis of responses of soil microbes to warming[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(11): 2169-2175. [王文立, 孔维栋, 曾辉. 土壤微生物对增温响应的 Meta 分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2169-2175.]
- [34] Chen Y C, Ma S Q, Jiang H M, et al. Influences of litter diversity and soil moisture on soil microbial communities in decomposing mixed litter of alpine steppe species[J]. Geoderma, 2020, 377: 114577.
- [35] Chen L, Zeng J, Li H, et al. Research advances in the soil nitrogen cycle under global precipitation pattern change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7543-7551. [陈琳, 曾冀, 李华, 等. 全球降水格局变化下土壤氮循环研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7543-7551.]
- [36] Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 1-13. [巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1-13.]
- [37] Liu C, Watanabe M, Wang Q X. Changes in nitrogen budgets and nitrogen use efficiency in the agroecosystems of the

土壤学报
Acta Pedologica Sinica

Changjiang River basin between 1980 and 2000[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80(1): 19-37.

(责任编辑: 卢萍)