

DOI: 10.11766/trxb202505200230

CSTR: 32215.14.trxb202505200230

张熙伦, 王萍, 刘亚龙, 汪景宽. 东北地区化肥投入下农业环境成本的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2026, 63(4): 1180–1190.

ZHANG Xilun, WANG Ping, LIU Yalong, WANG Jingkuan. Spatiotemporal Variation Characteristics of Agricultural Environmental Costs Under Fertilizer Input in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63(4): 1180–1190.

东北地区化肥投入下农业环境成本的时空变化特征*

张熙伦, 王萍, 刘亚龙[†], 汪景宽

(沈阳农业大学土地与环境学院/土肥高效利用国家工程研究中心, 沈阳 110866)

摘要: 东北作为我国重要粮仓与化肥消费市场, 长期过量施肥导致农业生态问题凸显。核算化肥施用的环境成本, 对区域农业可持续发展和国家粮食安全至关重要。利用能值分析和伤残调整生命年评估相结合的方法, 分析东北地区 1990—2022 年化肥施用所引起不同类型潜在污染的环境成本、综合环境成本和环境成本负荷的时空分布特征, 评估不同省市化肥施用环境成本的差异及其潜在原因。结果表明, (1) 1990—2022 年, 东北地区化肥施用综合环境成本逐步增加, 从 4 212 万 yuan 增长至 320 055 万 yuan, 增长了 75 倍, 年均增长率达 14.49%。(2) 2022 年东北地区化肥施用引起大气、水体和土壤污染的总环境成本分别为 54 237 万 yuan、74 936 万 yuan 和 190 881 万 yuan。其中, 氨气和硝酸盐分别在大气、水体/土壤污染中的贡献最大, 两者合计达到总成本的 82.64%。(3) 化肥施用的农业环境成本增幅最大区域主要集中在佳木斯市-赤峰市一线, 而延边朝鲜族自治州-大连市一线变化较小。环境成本负荷高值区集中在辽宁大部及通辽市、双鸭山市和鸡西市周边地区, 而低值区主要在四平市、伊春市、大兴安岭地区和锡林郭勒盟等地。此外, 化肥施用环境成本负荷总体呈现“南强北弱”的空间特征。未来需持续推广科学施肥与合理轮作, 提高化肥利用效率, 实现减量与环境友好目标, 保障东北农业可持续发展。

关键词: 环境成本; 能值; 东北地区; 化肥; 环境污染

中图分类号: S158.9 文献标志码: A

Spatiotemporal Variation Characteristics of Agricultural Environmental Costs Under Fertilizer Input in Northeast China

ZHANG Xilun, WANG Ping, LIU Yalong[†], WANG Jingkuan

(National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: [Objective] Northeast China is an important grain production base, and it is also one of the largest fertilizer consumption markets. Over the years, the application of many chemical fertilizers has led to increasingly prominent negative impacts on the agricultural ecological environment. Using the application rate of chemical fertilizer in Northeast China in the past three decades, it was estimated environmental cost (EC) from different potential pollution, and their comprehensive environmental cost(CEC)and

* 国家重点研发计划项目(2024YFD1501800, 2023YFD1501200, 2022YFD1500800)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2024YFD1501800, 2023YFD1501200 and 2022YFD1500800)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuyalong@syau.edu.cn

作者简介: 张熙伦(2002—), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤肥力与耕地保育。E-mail: zhangxilun@aliyun.com

收稿日期: 2025-05-20; 收到修改稿日期: 2025-09-05; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-11

environmental cost load (ECL). This research will provide a scientific basis for realizing agricultural sustainable development in Northeast China and ensuring China's food security. 【Method】Combining energy analysis and disability-adjusted life year assessment, the spatial and temporal distribution characteristics of EC from different potential pollution sources, and their CEC and ECL were analyzed in Northeast China from 1990 to 2022. The EC in different provinces and cities and their potential causes were evaluated, and countermeasures and suggestions for reducing EC were put forward. 【Result】(1) From 1990 to 2022, the CEC of fertilizer application in Northeast China gradually increased, from 42.12 million yuan to 3 200.55 million yuan, an increase of 76 times, with an average annual growth rate of 14.49%. The growth rates of the 1990s, 2000s, and 2010s were 22.69%, 16.67%, and 7.78%, respectively, which gradually slowed down. (2) In 2022, the total EC of air, water, and soil pollution caused by chemical fertilizer application was 542.37 million yuan, 749.36 million yuan, and 190.88 million yuan, respectively. Ammonia and nitrate, respectively, contributed the most to air, water, and soil pollution. Their ECs respectively were 467.92 million yuan, 691.76 million yuan, and 1 485.17 million yuan, reaching 82.64% of the total EC. (3) The largest change in CEC was mainly concentrated in the line from Jiamusi to Chifeng, while the smaller change was concentrated in the line from Yanbian to Dalian. The largest changes in ECL were mainly concentrated in most areas of Liaoning Province, Tongliao, Shuangyashan and the surrounding areas of Jixi, while the smaller changes were mainly in Siping, Yichun, Daxing'anling, and Xilinguole. 【Conclusion】In the past three decades, the CEC of chemical fertilizer application in Northeast China has increased year by year, but the growth rate has gradually slowed down, indicating that the impact of chemical fertilizer application on the environment has been significantly alleviated. In addition, the EC and ECL showed obvious spatial distribution characteristics, which indicates that the impact intensity of the southern and southern coastal areas was stronger than the northern inland areas. In future research, it is recommended that the focus should be directed towards typical black, brown, and other types of soil in Northeast China, as well as typical cultivated areas such as the corn belt and miscellaneous grain area in Northeast China, to further explore the spatial differences of CEC. Although chemical fertilizer input can increase grain yield, it also brings high EC, which requires scientific fertilization measures according to local conditions. It is necessary to continue to promote scientific fertilization and reasonable intercropping/rotation to improve the utilization efficiency of chemical fertilizers. Finally, the effect of reducing fertilizer application and being environmentally friendly will be realized to ensure the sustainable development of agricultural production in Northeast China.

Key words: Environmental cost; Energetic value; Northeast region; Chemical fertilizer; Environmental pollution

改革开放以来，我国城市化进程加快导致耕地资源稀缺，叠加人口增长带来的粮食需求增加，推动化肥用量激增，使我国成为全球最大的化肥生产与消费国^[1]。东北地区作为重要的粮食生产基地和粮仓，对维护我国粮食安全具有巨大的战略意义^[2-3]。然而，该地区典型的冻融交替破坏土壤结构，影响水分运动并加剧水土流失，加之种植结构单一，共同降低了化肥利用率^[4]。气候变暖进一步加剧了氮素流失与温室气体排放，使东北农田对环境成本更为敏感^[5]。因此，尽管近几十年化肥用量持续增加，但不合理施肥等因素导致土壤养分流失、结构破坏严重，加剧了土壤侵蚀、肥力下降和产量波动，使肥沃黑土面临“薄、瘦、硬”等退化问题，威胁粮食产能^[6-7]。然而，目前对于化肥施用对农田环境影响的认识仍然有限，尤其是缺少化肥施用环境成本评估的相关研究。开展相关研究，量化化肥投入的环境影响，是制定科学减施措施、推动农业绿色转型

的关键基础。因此，系统分析并准确评估东北地区化肥施用的环境成本，对指导合理施肥、保障黑土地可持续利用至关重要。

著名生态学家 Odum 于 1987 年首次提出能值概念，将不同属性或种类的能量投入统一量度，并于 1996 年出版了首部能值分析理论与方法的著作。该分析法将农业系统视为复合生态经济系统进行分析，可得出反映农业生态与经济效率的能值指标体系，揭示系统自然属性与经济特征间的关系^[8]。20 世纪 90 年代，蓝盛芳等^[9]率先采用能值分析全面评估农业生态系统中能量流动、物质循环和价值流转之间的定量变化关系。在此之后，赖力等^[10]估算 1990—2005 年全国化肥环境成本，发现其年均增长 7.3%，但 2000 年后增速明显放缓，环境恶化趋势缓解。刘建霞等^[11]核算 2000、2005、2010 年全国粮食作物化肥环境成本，指出秋粮成本约为夏粮的两倍，并同样发现 2000—2010 年间成本持续上升。秦

婵元等^[12]利用能值分析研究稻鱼种养模式的能值投入产出,为该模式的推广提供理论基础。Lyu 等^[13]结合能值核算与生命周期评估,确定了尿素等农用品的环境成本,为量化全球化肥环境影响提供依据。综上,能值与环境成本分析方法在农业生态系统中应用广泛,对农业环境保护和可持续发展发挥关键作用。

前人针对我国化肥环境成本的研究多集中于部分省域尺度的汇总分析,对于东北这一重要粮食产区 and 化肥消费区,其化肥环境成本的相对贡献、演变规律及时空分布特征仍不明确。本研究引入能值分析法,突破传统局限,将化肥施用导致的土壤酸化、水体富营养化及温室气体排放等环境问题统一核算为能值,为科学评估东北农业环境影响提供新依据。本研究通过整合 1990—2022 年东北地区化肥施用量等数据,旨在分析不同类型污染对环境成本的贡献程度,揭示市级尺度下综合环境成本及其负荷的时空变化特征,从而减轻不合理施肥对黑土地的潜在影响,保障国家粮食安全,促进农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究的东北地区为黑龙江省、辽宁省、吉林

省和内蒙古东五盟(呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市、锡林郭勒盟)。化肥折纯量和实物量数据来源为 1991—2023 年的《黑龙江统计年鉴》《黑龙江垦区统计年鉴》《辽宁统计年鉴》《吉林统计年鉴》《内蒙古统计年鉴》等。吉林省年鉴中无化肥折纯量的统计数据,因此,根据实物量和折纯率进行折算,氮磷折纯率分别取值 0.35 和 0.2(黑龙江、辽宁和内蒙古东五盟的平均折纯率)。黑龙江省化肥折纯量将垦区统计年鉴数据并入所在行政市区。

1.2 数据分析

通过能值分析法对东北地区化肥施用的生态环境成本进行核算。施用化肥所引发的环境污染可划分为大气污染、土壤污染和水体污染三个主要类别^[10](表 1)。

结合东北地区农田施用化肥后产生污染物的流转比例,计算影响环境的污染物剂量:

$$D_i = M \times C_i \times (W_c / W_f) \quad (1)$$

式中, D_i 为污染物 i 的产生剂量, t ; M 为施用氮肥或磷肥的折纯量, t ; C_i 为化肥养分的流转系数(表 1); W_c 为所产生污染物的分子量; W_f 为 N 或 P_2O_5 的分子量。

表 1 东北地区污染物流转系数及生命损害年数 (Y_i)

Table 1 Pollutant transfer coefficient and Y_i in Northeast China

污染物类型 Type of pollutant	污染物 Contaminant	流转系数 Circulation coefficient/ %	$Y_i^{[10]}$ ($\times 10^{-5} \text{ a} \cdot \text{kg}^{-1}$)
大气污染 Atmosphere pollution	氨气 NH_3	8.1 ^[14]	5.1
	氧化二氮 N_2O	1.15 ^[14]	0.4
	氮氧化物 NO_x	0.45 ^[14]	6.79
土壤污染 Soil pollution	硝酸盐 Nitrate	7.35 ^[14]	4.9
	硫酸盐 Sulphate	39 ^[15]	0.17
	镉 Cd	0.000 089 ^[16]	60.9
水体污染 Water pollution	硝酸盐 Nitrate	5.5 ^[14]	3.05
	铵态氮 NH_4^+-N	2.75 ^[10]	1.67
	磷酸盐 Phosphate	1.35 ^[17]	0.36

注: Y_i : 单位污染物剂量引致的生命损害年数。Note: Y_i : Years of life damage caused by unit pollutant dose.

采用伤残调整生命年法,核算东北地区近 30 年施用化肥所产生的大气污染、水体污染和土壤污染

对环境质量的影响:

$$\text{DALY}_i = D_i \times Y_i \quad (2)$$

式中, $DALY_i$ 为某种污染造成的生命损害年累计数, a ; Y_i 为单位污染物剂量引致的生命损害年数, $a \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)。

计算化肥环境影响的总能值^[18]:

$$U = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (DALY_i \times C_m) \quad (3)$$

式中, U 为化肥环境影响总能值成本, sej ; E_i 为污染物 i 的能值成本, sej ; C_m 为单位劳动力的年能值消费量, 即每年总能值与当年人口总数的比值, sej 。

计算化肥施用的综合环境成本:

$$V = U / C_g \quad (4)$$

式中, V 为化肥环境影响的宏观经济价值, yuan ; C_g 为单位宏观经济价值的能值载荷, 即单位时间内使用的能值与 GDP 的比值, $\text{sej} \cdot \text{yuan}^{-1}$ 。

计算东北地区化肥施用的环境成本负荷:

$$B = V / M_i \quad (5)$$

式中, B 表示单位粮食种植面积化肥环境成本负荷, $\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$; M_i 表示各市粮食种植面积, hm^2 。

2 结 果

2.1 东北地区化肥施用的农业环境成本

1990—2022 年东北地区化肥施用综合环境成本总体呈现持续上升趋势, 其中黑龙江省由 798 万

yuan 增至 143 082 万 yuan ; 吉林省由 1 696 万 yuan 增至 60 218 万 yuan ; 辽宁省由 1 522 万 yuan 增至 59 785 万 yuan ; 内蒙古东五盟由 194 万 yuan 增至 56 970 万 yuan (图 1a)。近三十年东北地区化肥施用的农业环境成本增长率由高到低依次为内蒙古东五盟 (19.42%)、黑龙江省 (17.60%)、辽宁省 (12.15%)、吉林省 (11.80%)。农业环境成本增长率总体上呈现下降趋势, 20 世纪 90 年代平均增长率为 22.69%, 21 世纪 00 年代为 16.67%, 21 世纪 10 年代仅为 7.78% (图 1b)。

2.2 东北地区化肥施用引起不同类型污染的农业环境成本

2022 年东北地区化肥施用引起大气、水体和土壤污染的总环境成本分别为 54 237 万 yuan 、74 936 万 yuan 和 190 881 万 yuan 。其中, 氨气 (大气) 和硝酸盐 (水体/土壤) 是主要贡献者, 大气、水体和土壤污染的环境成本分别为 46 792 万 yuan 、69 176 万 yuan 和 148 517 万 yuan , 达到总成本的 82.64%。黑龙江省化肥施用引致污染的环境成本最大, 为 143 082 万 yuan , 占东北地区 44.71%; 之后依次为吉林省 (60 218 万 yuan , 18.81%)、辽宁省 (59 785 万 yuan , 18.68%) 和内蒙古东五盟 (56 970 万 yuan , 17.8%) (表 2)。

2.3 东北地区化肥施用农业环境成本区域特征

21 世纪 00 年代东北地区各市化肥施用农业环境成本与 20 世纪 90 年代相比平均增长 3.31 倍, 21 世纪 10 年代与 00 年代相比平均增长 3.55 倍 (图 2)。20 世纪 90 年代高值区主要位于长春、松原及周边;

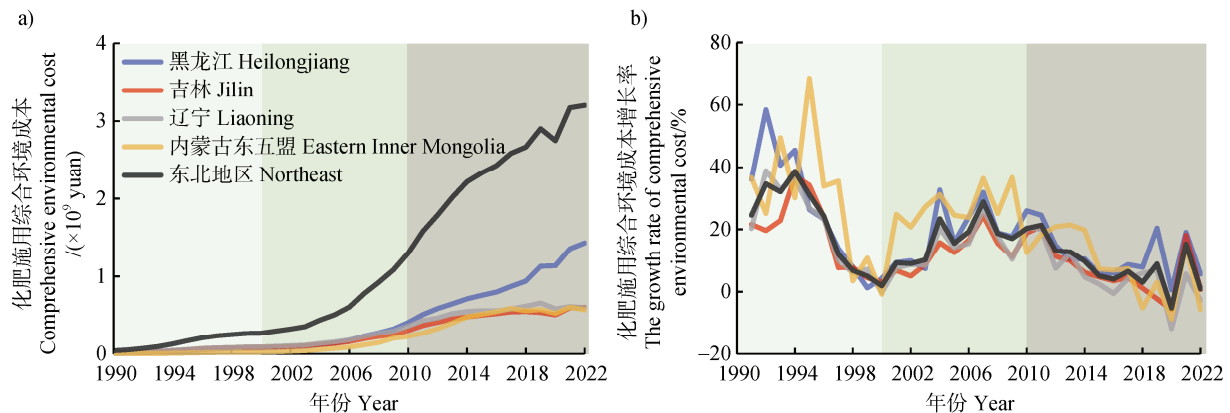


图 1 东北地区化肥施用综合环境成本 (a) 及其年均增长率 (b) 的变化

Fig. 1 The change of comprehensive environmental cost (a) and its annual growth rate (b) of chemical fertilizer application in Northeast China from 1990 to 2022

表 2 2022 年东北地区化肥施用环境成本核算

Table 2 Environmental cost estimation of chemical fertilizer application in Northeast China in 2022

地区 Region	大气污染 Atmosphere pollution/ ($\times 10^4$ yuan)			水体污染 Water pollution/ ($\times 10^4$ yuan)			土壤污染 Soil pollution/ ($\times 10^4$ yuan)			总计 Total/ ($\times 10^4$ yuan)
	氨气 NH ₃	氧化亚 氮 N ₂ O	氮氧化 物 NO _x	硝酸盐 Nitrate	磷酸盐 Phosphate	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝酸盐 Nitrate	硫酸盐 Sulphate	镉 Cd	
	黑龙江 ^①	20 910	602	2 725	30 913	173	2 457	66 369	18 930	
辽宁 ^②	8 745	252	1 140	12 928	22	1 028	27 755	7 916	0.29	59 785
吉林 ^③	8 809	254	1 148	13 023	13	1 035	27 960	7 975	0.18	60 218
内蒙古东五盟 ^④	8 328	240	1 085	12 312	53	978	26 433	7 539	0.70	56 970
东北地区 ^⑤	46 792	1 347	6 099	69 176	262	5 498	148 517	42 360	3.46	320 055

①Heilongjiang, ②Liaoning, ③Jilin, ④Eastern Inner Mongolia, ⑤Northeast.

21 世纪 00 年代转移至长春、哈尔滨、通辽及周边；21 世纪 10 年代除大兴安岭、锡林郭勒盟外，普遍较高（图 2a~图 2c）。近三十年成本变化量最大的区域集中在佳木斯至赤峰一线，变化最小的区域主要在延边至大连一线，以及伊春、大兴安岭和锡林郭勒盟（图 2d）。

21 世纪 00 年代东北地区各市化肥施用的农业环境成本负荷较 20 世纪 90 年代平均增长 2.85 倍，21 世纪 10 年代与 00 年代相比平均增长 2.42 倍。20 世纪 90 年代高负荷区集中在南部营口、辽源及周边；21 世纪 00 年代扩展至营口、盘锦、鞍山、辽阳、丹东、通化等市及周边；10 年代高负荷区主要覆盖辽宁省大部、吉林省大部、鹤岗、双鸭山、赤峰、通辽，其中辽宁省沿海地区负荷尤为突出（图 3a~图 3c）。近三十年负荷变化量最大的区域集中于辽宁省大部、通辽、双鸭山和鸡西周边，变化最小的区域主要在四平、伊春、大兴安岭和锡林郭勒盟（图 3d）。

3 讨论

3.1 东北地区化肥施用的农业环境成本时间变化特征

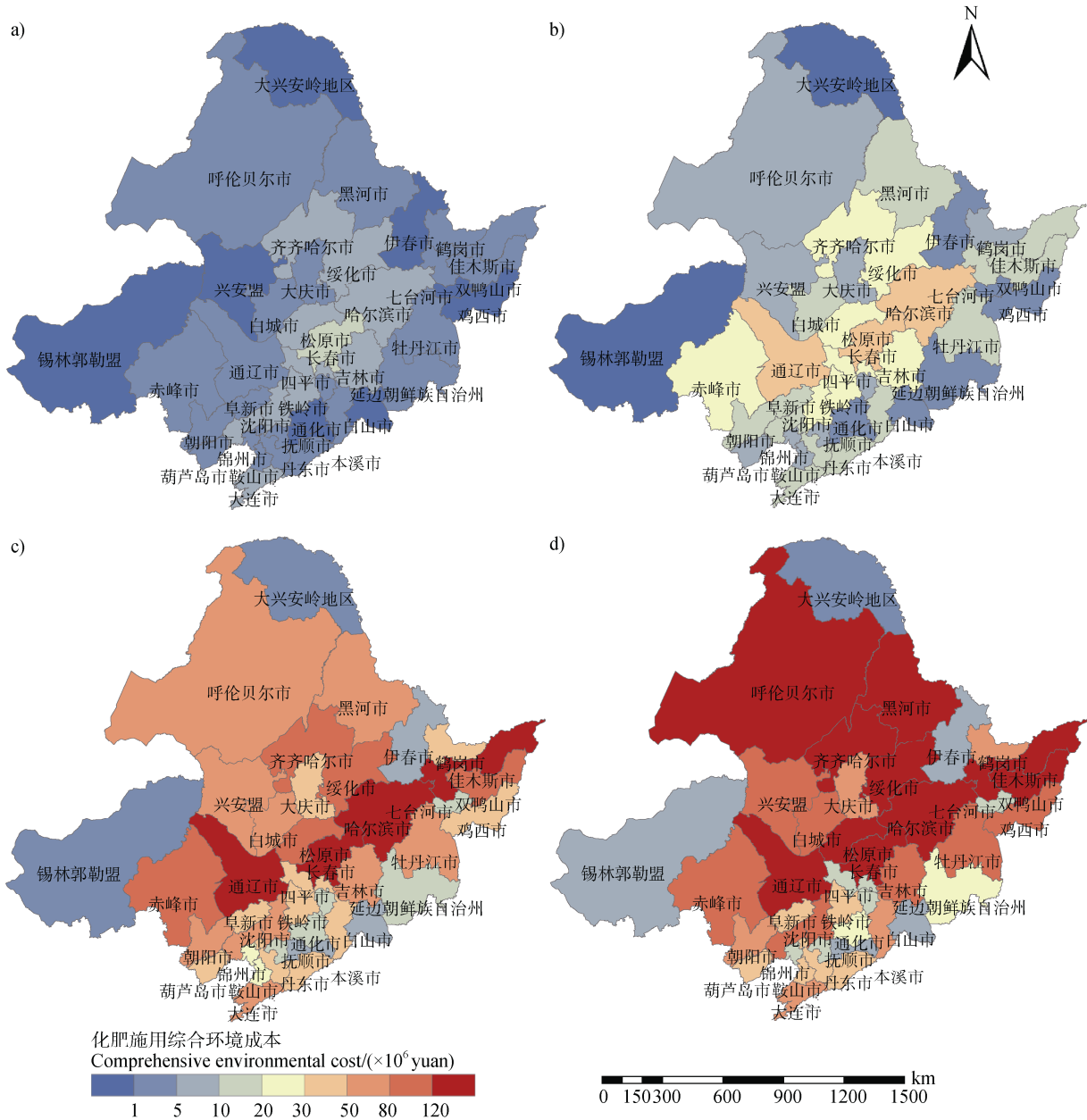
近三十年我国人口增长 2.69 亿，粮食需求持续攀升。同期，东北地区主要农产品产量由 1990 年的

6 506 万 t 增至 2022 年的 17 289 万 t，其增幅（165.72%）远高于种植面积增长率（72.22%），表明单产提升是关键。合理施肥作为增产的有效手段，对保障粮食安全和农民收入至关重要^[19]。尽管化肥价格持续上涨，粮价提升与补贴政策维持了农户施肥积极性^[20]。因而，为保障粮食安全增加的化肥用量，导致东北地区化肥环境成本持续上升（图 1a）。

东北地区环境成本增长率呈三阶段变化，即 20 世纪 90 年代高增长（22.69%），21 世纪 00 年代中等增长（16.67%）和 21 世纪 10 年代低增长（7.78%）。20 世纪 90 年代，市场自由化下政府参与减少^[21]，虽存在施肥盲目性与结构问题^[22]，东北地区粮食产量仍增长 33%^[23]，化肥与产量显著相关，推高环境成本^[24]。2005 年，东北三省粮食、大豆及玉米种植面积分别占全国的 12.1%、38.4%和 25.8%^[22]，规模化种植模式促进了化肥需求。2000—2007 年间，全国玉米播种面积增长 27.9%，单产提高 7.9%，但化肥施用总量却激增 64.8%，化肥效率下降 17%，凸显农业生产对化肥的过度依赖^[1, 25]。尽管 21 世纪初我国氮、磷肥产量已可满足甚至超过国内需求，但精准施肥与秸秆还田的推广，部分抑制了化肥过量施用及环境污染^[26-27]。2015 年，出台《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》应对施肥不合理及成本攀升问题，这些农业补贴政策通过提升规模效益与肥料效率减少了化肥施用^[28]。2016 年国家推行鼓

励绿色高产技术的补贴政策,使化肥施用量减少约 7.2%^[29]。同时,对化肥增产效应边际递减、价格上涨的认知,以及政府推动精准施肥与减施措施,共同促使近十年化肥施用量增速持续放缓^[19]。2017 年,《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)》要求

完善灌溉系统,推广水肥一体化等技术以提升肥料利用率。2015 年后在政策推动下,2015—2022 年东北化肥折纯量从 797 万 t 降至 765 万 t (年均-0.58%),相比 2000—2015 年(年均 5.09%)显著下降,其“先增后降”趋势与环境成本增长率变化(图 1b)一致。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作，底图无修改。下同。
Note: The map is based on the standard map of GS (2024) 0650 downloaded from the standard map service website of the National Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, and the base map is not modified. The same below.

图 2 东北地区化肥施用综合环境成本 (a. 1990—1999 年, b. 2000—2009 年, c. 2010—2022 年, d. 33 年间的变化量)
Fig. 2 The comprehensive environmental cost of chemical fertilizer application in Northeast China (a. 1990-1999, b. 2000-2009, c. 2010-2022, d. the variation in 33 years)

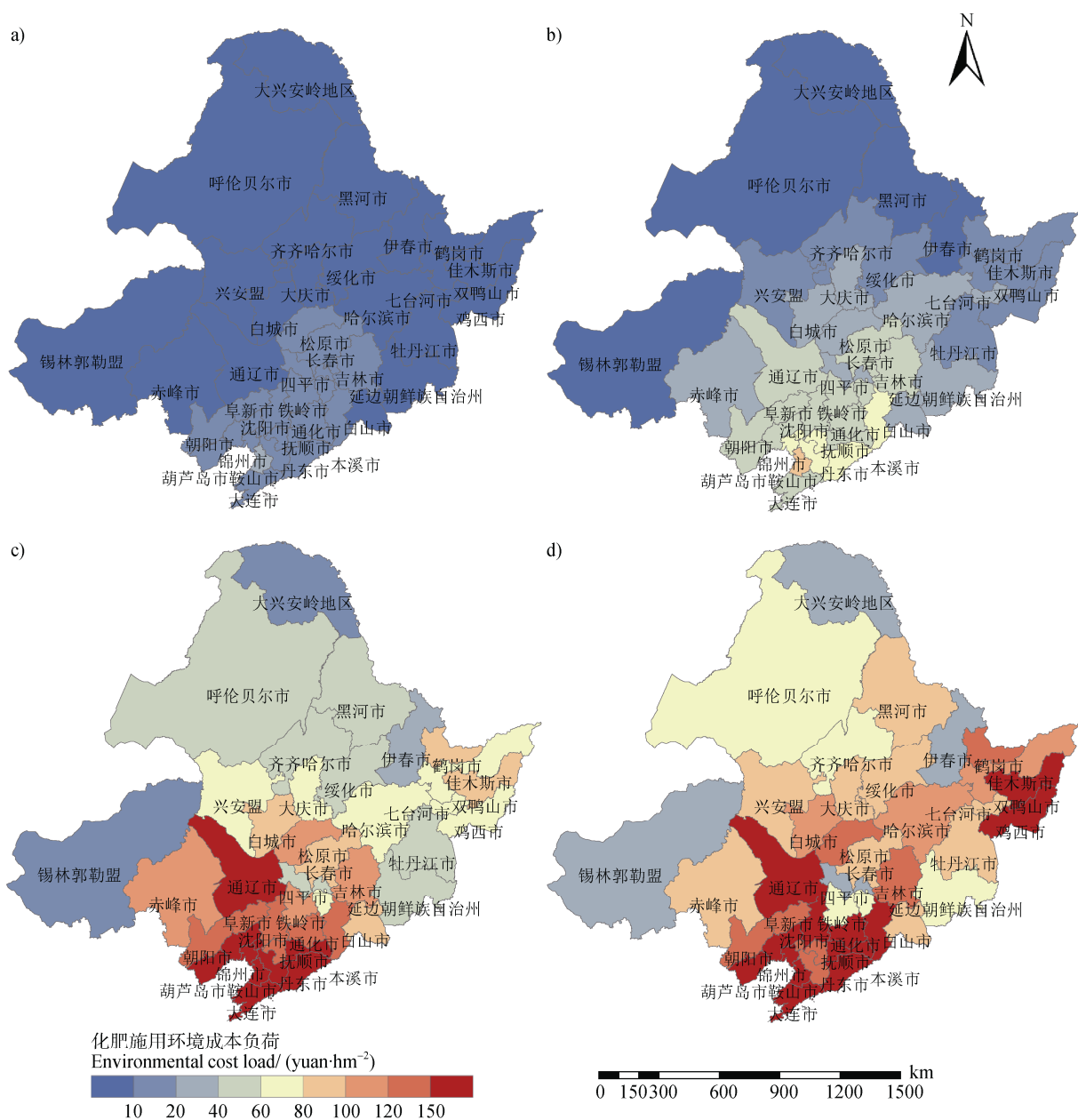


图3 东北地区化肥施用环境成本负荷 (a.1990—1999年, b.2000—2009年, c.2010—2022年, d.33年间的变化量)
Fig. 3 The environmental cost load of chemical fertilizer application in Northeast China (a.1990-1999, b.2000-2009, c.2010-2022, d. the variation in 33 years)

东北氮肥大量施用导致氨气(大气)、硝酸盐(土壤/水体)污染突出^[30](表2)。我国氮素利用率仅20%~40%，施氮产生的NH₃导致大气污染，并可形成细颗粒物或引起土壤酸化^[31]。黑土区尿素施用导致的氨挥发损失平均达12.8%，居氮损失首位^[32]。此外，过量施氮导致硝酸盐在土壤积累并迁移，污染水体/土壤^[33]。东北地区冬季冻土使硝酸盐以离子态向冻层迁移，低温抑制微生物转化，导致其富集

于表层。春季冻融期，融水携高浓度硝酸盐下渗淋溶，且冻融作用使土壤疏松，加剧污染^[34-35]。

3.2 东北地区化肥施用的农业环境成本空间分布特征

20世纪90年代，长春、四平、松原三市粮食播种面积和产量分别占吉林省的61.93%和70.07%，占东北地区的12.57%和19.18%；哈尔滨、齐齐哈尔、绥化三市粮食播种面积和产量则分别占黑龙江

的 45.41% 和 58.81%，占东北的 20.34% 和 24.85%^[36]。上述粮食主产区需要更多的化肥投入，导致更高的化肥施用环境成本。进入 21 世纪以后，东北地区粮食作物播种面积和主要农产品总产量分别增长了 58.84% 和 115.61%，同时施肥量增加了 107.26%，并且东北典型农作物玉米和大豆的播种面积分别增长了 98.18%、108.15%^[37]，导致整个东北地区环境成本处于较高水平。

东北地区单位种植面积化肥施用环境成本负荷的区域分布呈现以下特征：一是在中南部及其沿海

地区的负荷明显高于北部与内陆地区。负荷最高值（营口市 134.32 $\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）与最低值（大兴安岭 7.16 $\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）差异显著。近三十年，中南地区负荷持续高位，从 20 世纪 90 年代的 10~20 $\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增至 21 世纪 10 年代的大于 80 $\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ （图 3）。辽宁省环境成本占比降幅大于播种面积占比降幅，内蒙古东五盟环境成本占比上升而播种面积稳定，故南部负荷高；吉林省环境成本占比下降，播种面积稳定；黑龙江省两者同时上升但播种面积增幅更大，故北部负荷相对较低（表 3）。二是部分地区的环境

表 3 1999—2022 年东北地区环境成本、粮食播种面积变化和平均环境成本负荷

Table 3 Changes in environmental costs, grain sown area and environmental cost loads in Northeast China from 1999 to 2022

地区 Region	20 世纪 90 年代 1990 s		21 世纪 00 年代 2000 s		21 世纪 10 年代 2010 s	
	环境成本 Environmental cost/ ($\times 10^4$ yuan)	占比 Proportion/%	环境成本 Environmental cost/ ($\times 10^4$ yuan)	占比 Proportion/%	环境成本 Environmental cost/ ($\times 10^4$ yuan)	占比 Proportion/%
辽宁 ^①	5 244	34.42	16 843	30.17	54 537	22.92
吉林 ^②	4 977	32.67	14 859	26.61	49 021	20.60
黑龙江 ^③	3 935	25.83	15 980	28.62	86 782	36.47
内蒙古东五盟 ^④	1 079	7.08	8 152	14.60	47 586	20.00
东北地区 ^⑤	15 235	-	55 834	-	237 926	-
地区 Region	20 世纪 90 年代 1990 s		21 世纪 00 年代 2000 s		21 世纪 10 年代 2010 s	
	粮食播种面积 Grain sown area/ ($\times 10^4$ hm^2)	占比 Proportion/%	粮食播种面积 Grain sown area/ ($\times 10^4$ hm^2)	占比 Proportion/%	粮食播种面积 Grain sown area/ ($\times 10^4$ hm^2)	占比 Proportion/%
辽宁 ^①	312	17.77	299	15.17	342	12.38
吉林 ^②	356	20.29	376	19.08	554	20.05
黑龙江 ^③	786	44.80	970	49.26	1 411	51.04
内蒙古东五盟 ^④	300	17.13	325	16.49	457	16.53
东北地区 ^⑤	1 753	-	1 970	-	2 765	-
地区 Region	20 世纪 90 年代 1990 s		21 世纪 00 年代 2000 s		21 世纪 10 年代 2010 s	
	环境成本负荷 Environmental cost load/ ($\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)	占比 Proportion/%	环境成本负荷 Environmental cost load/ ($\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)	占比 Proportion/%	环境成本负荷 Environmental cost load/ ($\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)	占比 Proportion/%
辽宁 ^①	17	42.89	56	41.00	159	38.55
吉林 ^②	14	35.67	40	28.76	88	21.39
黑龙江 ^③	5	12.27	16	11.98	61	14.88
内蒙古东五盟 ^④	4	9.16	25	18.26	104	25.19
东北地区 ^⑤	9	-	28	-	86	-

①Liaoning, ②Jilin, ③Heilongjiang, ④Eastern Inner Mongolia, ⑤Northeast.

成本与环境成本负荷错配。部分区域环境成本小但负荷高(如营口:耕地占全省2.2%却贡献4.95%的农业产出),在有限的耕地资源上实现了相对较高的农业产出,对化肥等农业投入品要素的依赖性会更强。反之,部分区域环境成本大但负荷低(如哈尔滨市氮肥占东北6.52%,播种面积占6.87%)。哈尔滨市依托优良的农业生产环境、丰富的资源类型、较强的农业科技实力和便利的运输条件等优势,成为低成本低负荷的代表。

3.3 东北地区降低农业环境成本的建议

根据农业环境成本核算分析结果,对于化肥施用环境成本负荷高的地区,首要任务是控制化肥施用,减少环境污染。建议如下:(1)推广科学施肥:依据土壤肥力与配方施肥指导、确定化肥类型与比例,结合农机农艺,协调种肥与基肥。根据土壤墒情与作物长势动态调整施肥量与时间,春季低温择时施肥,夏季多雨采用深施防流失。(2)合理减施化肥,增施有机肥。针对黑土肥力下降问题,推行有机无机配施,增施有机肥以提升地力,改善水热条件;推广秸秆适量粉碎还田以增有机质、改良结构。(3)水肥一体化。针对降水偏少地区,通过水肥一体化实现节水节肥,提升肥料利用率。

对于化肥施用环境成本负荷低的地区,需要维持地力,防止环境成本负荷的增长。建议如下:(1)合理间作轮作:改变连作模式,推广2~3种作物交替种植,改善土壤质量与肥力,打破病虫害周期,减少化肥农药使用;(2)推行免耕少耕:减少地表蒸发,提高耕层温度(缓解春旱低温),增强黑土抗侵蚀能力(防风蚀保肥);(3)完善监测预警体系:结合地面、无人机与卫星遥感监测,精准评估与预警农田问题。

4 结 论

东北地区1990—2022年化肥施用综合环境成本增长76倍,年均增长率达14.49%,但增长速率逐步放缓,化肥施用对环境的负面影响显著下降。2022年东北地区化肥施用所引起的总环境成本为320 055万yuan,对大气、水体和土壤污染的环境成本分别为54 237万yuan、74 936万yuan和190 881万yuan。其中,氨气和硝酸盐的贡献可达到总成本的82.64%。三十年环境成本增幅最大的区域分布于

佳木斯市至赤峰市一线,延边朝鲜族自治州至大连市一线变化较小,总体呈现“南强北弱”的负荷格局。未来研究可聚焦不同土壤类型及玉米带、杂粮区等典型种植分区,深化化肥投入下环境成本的空间差异性分析。借助化肥增产会伴生高环境成本,需因地制宜推行科学施肥:完善技术体系,合理减化肥增有机肥,提升机械化水平与革新耕作制度,推动东北农业绿色发展。

参考文献 (References)

- [1] Li H L, Zhang W F, Zhang F S, et al. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (5): 1136—1143. [李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (5): 1136—1143.]
- [2] Zhang J B, Sun B, Zhu J J, et al. Black soil protection and utilization based on harmonization of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland-sandy land ecosystems and strategic construction of ecological barrier[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36 (10): 1155—1164. [张佳宝, 孙波, 朱教君, 等. 黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36 (10): 1155—1164.]
- [3] Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (6): 1341—1358. [韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (6): 1341—1358.]
- [4] Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (2): 1—12. [张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36 (2): 1—12.]
- [5] Wang Z L, Liu C X, Jiang Q X, et al. Effects of climate warming on the key process and index of black soil carbon and nitrogen cycle during freezing period[J]. *Environmental Science*, 2021, 42 (4): 1967—1978. [王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 等. 气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42 (4): 1967—1978.]
- [6] Wang J K, Xu X R, Pei J B, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52 (3): 695—701. [汪景宽, 徐香菇, 裴久渤, 等. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. *土壤通报*, 2021, 52 (3): 695—701.]
- [7] Liu Y L, Ge T D, Wang P, et al. Residence time of carbon

- in paddy soils[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 400: 136707.
- [8] Shen Y, Tao Y Y, Dong L L, et al. Evaluation on construction and optimization of modern agro-pastoral circular system based on emergy analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (8): 3057—3067. [沈园, 陶玥玥, 董林林, 等. 基于能值分析评估现代农牧循环系统的构建与优化[J]. *生态学报*, 2023, 43 (8): 3057—3067.]
- [9] Lan S F, Chen F P, Liu X M. Emergy analysis of agricultural eco-economic system[J]. *Ecological Science*, 1995, 29 (2): 172. [蓝盛芳, 陈飞鹏, 刘新茂. 农业生态经济系统的能值分析[J]. *生态科学*, 1995, 29 (2): 172.]
- [10] Lai L, Huang X J, Wang H, et al. Estimation of environmental costs of chemical fertilizer utilization in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (1): 63—69. [赖力, 黄贤金, 王辉, 等. 中国化肥施用的环境成本估算[J]. *土壤学报*, 2009, 46 (1): 63—69.]
- [11] Liu J X, Xu W H, Huang H, et al. Estimation of environmental cost of chemical fertilizer usage in China's summer & autumn grain production[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20 (6): 225—232. [刘建霞, 徐卫华, 黄璜, 等. 中国夏秋粮生产化肥施用环境成本估算[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20 (6): 225—232.]
- [12] Qin C Y, Yu C, Sun A H, et al. Benefit evaluation of double cropping rice-fish breeding model based on emergy analysis[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42 (1): 218—227. [秦婵元, 喻超, 孙澳辉, 等. 基于能值分析的双季稻-鱼种养模式的效益评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42 (1): 218—227.]
- [13] Lyu Y F, Raugei M, Zhang X H, et al. Environmental cost and impacts of chemicals used in agriculture: an integration of emergy and life cycle assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 151: 111604.
- [14] Wang C, Shen Y, Fang X T, et al. Reducing soil nitrogen losses from fertilizer use in global maize and wheat production[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17 (10): 1008—1015.
- [15] Wang L, Gao X Z, Ma W Q, et al. Sulphur consumption in Chinese agriculture: situation and outlook[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (6): 1219—1226. [王利, 高祥照, 马文奇, 等. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14 (6): 1219—1226.]
- [16] Huang Q Q, Liu X, Zhang Q, et al. Evaluating the environmental risk and the bioavailability of Cd in phosphorus fertilizers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39 (2): 156—161. [黄青青, 刘星, 张倩, 等. 磷肥中镉的环境风险及生物有效性分析[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39 (2): 156—161.]
- [17] Yang W X, Xia Y Q, Jiang X S, et al. Influencing factors and estimation of total phosphorus runoff from farmlands in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (2): 319—325. [杨旺鑫, 夏永秋, 姜小三, 等. 我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (2): 319—325.]
- [18] Yang H, Shen X Y, Lai L, et al. Spatio-temporal variations of health costs caused by chemical fertilizer utilization in China from 1990 to 2012[J]. *Sustainability*, 2017, 9 (9): 1505.
- [19] Ma K, Diao G. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (4): 1113—1120. [麻坤, 刁钢. 化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (4): 1113—1120.]
- [20] Li Y X. The research on effects of fertilizer industry policy on grain production in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [李宇轩. 中国化肥产业政策对粮食生产的影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [21] Van Wesenbeeck C F A, Keyzer M A, Van Veen W C M, et al. Can China's overuse of fertilizer be reduced without threatening food security and farm incomes? [J]. *Agricultural Systems*, 2021, 190: 103093.
- [22] Zhang S D, Wang J Q, Zhang W F, et al. The status and problems of fertilizer consumption & production and the strategy for management in northeast China [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2007, 22 (5): 74—78. [张四代, 王激清, 张卫峰, 等. 我国东北地区化肥消费与生产现状、问题及其调控策略[J]. *磷肥与复肥*, 2007, 22 (5): 74—78.]
- [23] Li Q F, Chen F, Li Y Y, et al. Changes and influence factors of grain production in northeast region[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2005, 26 (5): 340—343. [李奇峰, 陈阜, 李玉义, 等. 东北地区粮食生产动态变化及影响因素研究[J]. *农业现代化研究*, 2005, 26 (5): 340—343.]
- [24] Zhao Z J, Hu X J. Research on environmental cost of fertilizer inputs in Chinese grain production[J]. *Journal of Hunan University (Social Sciences)*, 2013, 27 (6): 52—56. [赵志坚, 胡小娟. 我国粮食生产中化肥投入的环境成本研究[J]. *湖南大学学报(社会科学版)*, 2013, 27 (6): 52—56.]
- [25] Ji J H, Liu S Q, Zheng Y, et al. Changes in yield and fertilizer use efficiency of spring maize in Heilongjiang Province over a twenty year period[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39 (6): 1099—1105. [姬景红, 刘双全, 郑雨, 等. 黑龙江省春玉米近二十年产量及肥料利用率变化[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39 (6): 1099—1105.]

- [26] Yu H L, Chen G F, Zhao L P, et al. Study and application of maize precision fertilization technology in black soil of Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30 (5): 753—759, 768. [于合龙, 陈桂芬, 赵兰坡, 等. 吉林省黑土区玉米精准施肥技术研究与应用[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30 (5): 753—759, 768.]
- [27] Liu X Y, Li S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (21): 1—19. [刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1—19.]
- [28] Guo L L, Li H J, Cao X X, et al. Effect of agricultural subsidies on the use of chemical fertilizer[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 299: 113621.
- [29] Fan P F, Mishra A K, Feng S Y, et al. The effect of agricultural subsidies on chemical fertilizer use: Evidence from a new policy in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118423.
- [30] Zhang X, Zhang Y, Shi P, et al. The deep challenge of nitrate pollution in river water of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 144674.
- [31] Song X C, Du S, Shen P, et al. Analysis on the spatial distribution of agricultural ammonia emissions and PM_{2.5} in China[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39 (10): 200—207. [宋晓聪, 杜帅, 沈鹏, 等. 中国农业氨排放和 PM_{2.5} 空间分布特征分析[J]. *生态经济*, 2023, 39 (10): 200—207.]
- [32] Han X Z, Wang S Y, Song C Y, et al. Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of black soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1859—1862. [韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 等. 黑土区水田化肥氮去向的研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14 (11): 1859—1862.]
- [33] Yan L, Zhang J J, Zhang Z D, et al. Effect of different fertilization managements on nitrate accumulation in a Mollisol of Northeast China[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2016, 3: 1—8.
- [34] Juan Y H, Tian L L, Liu Y, et al. Regulation effects of freezing-thawing cycles on farmland black soil organic nitrogen components[J]. *Soils*, 2020, 52 (2): 262—270. [隽英华, 田路路, 刘艳, 等. 冻融作用对农田黑土有机氮组分的调控效应[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 262—270.]
- [35] Kong Y L, Qin H, Zhu C Q, et al. Research progress on the mechanism by which soil microorganisms affect soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (2): 331—347. [孔亚丽, 秦华, 朱春权, 等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2024, 61 (2): 331—347.]
- [36] Li B G, Liu Z, Huang F, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36 (10): 1184—1193. [李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓 保障国家粮食安全[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36 (10): 1184—1193.]
- [37] Wan X M, Wang J Y, Wang P, et al. Report on the protection and utilization of black land in Northeast China[R]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, CAS, 2023. [万小铭, 王介勇, 王鹏, 等. 东北黑土地保护与利用报告[R]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2023.]

(责任编辑: 陈荣府)