

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.040 CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.040

黄进,赖诗琪,安敏,等.极端气候对长江中游地区农田氮盈余的影响分析[J].水土保持学报,2025,39(6):152-167.

HUANG Jin, LAI Shiqi, AN Min, et al. Analysis of impact of extreme climate on farmland nitrogen surplus in middle reaches of Yangtze River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):152-167.

极端气候对长江中游地区农田氮盈余的影响分析

黄进^{1,3}, 赖诗琪^{1,2}, 安敏^{1,3}, 安慧^{1,2}

(1.水电工程施工与管理湖北省重点实验室,三峡大学,湖北宜昌443002; 2.三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌443002; 3.三峡大学经济与管理学院,湖北宜昌443002)

摘要: [目的] 极端气温与降水抑制土壤活性和作物生长,干扰作物对氮素的吸收利用,在农业持续施氮但吸收受阻的情况下,引发农田氮盈余,进而威胁粮食稳产安全。明确极端气候和农田氮盈余的变化情况并分析二者之间的关系,对于优化农田氮素管理具有重要意义。[方法] 基于长江中游地区2010—2022年气象数据和年鉴统计数据,采用气候倾向率分析法、MK突变检验法,从气温、降水2个角度分析极端气候的时空变化特征;利用氮收支估算方法对氮素的输入、输出及氮盈余进行解析;最后使用地理时空加权回归模型探讨极端气候对农田氮盈余的影响。[结果] 1)气候指数中,极端高温天数呈上升趋势,极端低温天数、极端降水频率和强度则呈下降趋势。空间分布上,极端高温主要集中在东南部,极端低温多见于湖北省边缘,而东部地区则更易出现极端降水。2)2010—2022年,研究区农田氮素输入和输出总量均呈下降型趋势,其中氮输入主要来自合成化肥氮和粪肥氮,分别占比68.32%和16.70%。在农田氮盈余强度方面,研究区整体表现为缓慢下降趋势,湖南省和湖北省年均农田氮盈余强度较高,分别达88.08、131.76 kg/hm²,明显高于中国平均氮素负荷(62.8 kg/hm²)。相比之下,江西省的农田氮盈余强度较低。3)极端高温、极端低温对农田氮盈余的影响的正向效应主要集中在南部地区,平均关联系数分别为0.36、0.33,在湖北省地区则负向效应较多。而极端降水对农田氮盈余整体影响较小,在极端降水频发的东部地区具有明显正相关效应,而在湖南省地区则有负相关效应。[结论] 研究结论客观分析极端气候变化及其对农田氮盈余的影响,所得结果可为长江中游地区区域差异化氮素管理策略提供建议。

关键词: 极端气候; 农田; 氮盈余; 相关性; 长江中游地区

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0152-16

Analysis of Impact of Extreme Climate on Farmland Nitrogen Surplus in Middle Reaches of Yangtze River

HUANG Jin^{1,3}, LAI Shiqi^{1,2}, AN Min^{1,3}, AN Hui^{1,2}

(1.Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3.College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] Extreme temperature and precipitation inhibit soil biological activity and crop growth, disrupt crop nitrogen uptake and utilization, and lead to farmland nitrogen surplus under conditions of continuous nitrogen application but impeded absorption, thereby threatening stable grain production and security. Understanding the dynamics of extreme climate and farmland nitrogen surplus, and analyzing their relationship, is crucial for optimizing farmland nitrogen management. [Methods] Based on meteorological data and yearbook statistics from 2010 to 2022 from the middle reaches of the Yangtze River, this study analyzed the spatiotemporal variation characteristics of extreme climate from the perspectives of temperature and precipitation using the climate tendency rate analysis and

收稿日期:2025-08-21 修回日期:2025-09-28 录用日期:2025-10-07 网络首发日期(www.cnki.net):2025-10-13
资助项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(24YJC790002);国家自然科学基金项目(72004116);2024年度宜昌市社会科学研究项目(ysk24ybkt146);湖北省重点实验室开放基金项目(2023KSD10)

第一作者:黄进(1988—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事生态环境管理与生态系统服务研究。E-mail:huangjin@ctgu.edu.cn

通信作者:安敏(1991—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事资源与环境管理研究。E-mail:anmin@ctgu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

Mann-Kendall (MK) abrupt change test. Nitrogen budget estimation was employed to quantify nitrogen inputs, outputs, and surpluses, while the geographically and temporally weighted regression (GTWR) model was used to explore the impact of extreme climate on farmland nitrogen surplus. [Results] 1) Among climate indices, the number of extreme high-temperature days exhibited an increasing trend, while the number of extreme low-temperature days, as well as the frequency and intensity of extreme precipitation, showed decreasing trends. Spatially, extreme high temperatures were concentrated primarily in the southeastern region, extreme low temperatures were more common in the edge areas of Hubei Province, and extreme precipitation was more likely to occur in the eastern region. 2) Total farmland nitrogen inputs and outputs in the study area showed a declining trend from 2010 to 2022. Nitrogen inputs were mainly derived from synthetic fertilizer nitrogen (68.32%) and manure nitrogen (16.70%). In terms of farmland nitrogen surplus intensity, the study area showed a slow increasing trend. The average annual surplus intensity in Hunan and Hubei Provinces was relatively high, reaching 88.08 kg/hm² and 131.76 kg/hm², respectively, significantly exceeding China's average nitrogen load (62.8 kg/hm²). In contrast, Jiangxi Province had a lower surplus intensity. 3) Extreme high and low temperatures mainly exerted positive impacts on farmland nitrogen surplus in the southern region, with average correlation coefficients of 0.36 and 0.33, respectively, while negative impacts were more pronounced in Hubei Province. In contrast, extreme precipitation exerted relatively small overall impact. It showed a positive correlation in the eastern region where extreme precipitation was frequent, but a negative correlation in Hunan Province. [Conclusion] This study objectively analyzes extreme climate change and its impact on farmland nitrogen surplus, and the findings can provide recommendations for developing regionally differentiated nitrogen management strategies in the middle reaches of the Yangtze River.

Keywords: extreme climate; farmland; nitrogen surplus; correlation; middle reaches of Yangtze River

Received: 2025-08-21

Revised: 2025-09-28

Accepted: 2025-10-07

Online(www.cnki.net): 2025-10-13

氮素不仅是作物生长不可或缺的主要营养物质,也是导致水体富营养化的关键因素^[1]。在农田生态系统中,农田土壤养分的输入与输出直接影响着土壤养分库的盈亏及土壤肥力的发展方向,其中氮素平衡是维持土壤健康和保障作物生长的关键环节,一旦氮素平衡遭到破坏,产生过量农田氮盈余,会对环境造成潜在威胁。随着农业经济的发展,为保障粮食生产的稳定与安全,农业生产中氮肥的投入量不断上升^[2]。但受限于养分管理水平和施肥技术^[3],投入量常超出作物需求与土壤承载,使得氮素收支失衡,引发农田氮盈余问题,已在全球范围内引发广泛关注。自上世纪中叶以来,已有研究^[4]表明,在农业系统中氮素的利用和损失是陆地生物地球化学、大气表面交换、水温和土地管理相互作用的最终产物,其中气候因素的频率和强度是主要驱动因素。如较高温度会加剧土壤水分蒸发,阻碍降水或灌溉水下渗,进而抑制氮素随水流失;而降水增加则通过加剧土壤侵蚀和土壤压实破坏土壤结构,导致土壤中原本固定的氮素释放,同时使作物根系受损,降低其对氮素的吸收能力,促使土壤中氮素积累增加^[5]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第六次评估报告^[6]中指出,全球变暖导致极端气候条件发生剧烈变化,这些变化可能对

农业中的氮收支平衡产生深远影响。在此背景下,本文在农田氮素输入和输出的测算基础上,分析农田氮盈余的时空分布情况。同时,引入极端气候因子,探讨气候变化对农田氮盈余的影响,并量化其影响程度。这将为改进农业氮素管理提供更具针对性的建议,并有助于制定有效的应对策略。

近年来众多学者围绕氮收支平衡展开大量研究,分析维度主要有2个方面:一是横向比较,聚焦同一年份不同区域的氮收支情况,研究范围涵盖长江三角洲^[7]、内蒙古河套灌区^[8]等多个区域,通过对特定年份的氮素平衡估算与环境影响分析,揭示不同区域间的氮收支差异。二是纵向比较,着眼于某一区域不同年份的氮收支变化,时间跨度从几年到数十年不等,研究区域包括湛江市辖区^[9]、江苏省淮安市^[10]及全国范围^[11]的农田等,通过长期数据测算,清晰呈现氮收支随时间的演变规律。梳理上述文献可知,现有研究多局限于单一维度,横向研究虽能展现区域差异却忽视时间因素影响。如长期施肥习惯对土壤氮素累积的影响,无法揭示农田氮盈余动态趋势;纵向研究虽能捕捉区域内时间变化却可能忽略区域间显著差异。如不同地区的气候条件、种植面积和作物种类的差异对农田氮盈余的影响,难以得出普遍适用结论。

同时,气候变化对农业生产影响深远且复杂,围绕这一主题,众多学者展开了广泛研究。现有研究主要聚焦于普通气候因子(如降水、气温)对农业灌溉用水^[12]、作物产量^[13]、种植结构^[14]及农作物敏感性^[15]的影响。然而,现有研究仍存在明显不足。一方面,在维持粮食生产和水资源供给过程中,农田氮盈余问题已然凸显,可目前针对气候变化对农田氮盈余影响的研究却十分欠缺。实际上,气候变化又通过提高气温、改变降水模式,抑制土壤活性和作物生长,降低作物对氮素的吸收利用,进而破坏氮收支平衡,加剧农田氮盈余问题^[16-17]。另一方面,现有研究多关注于年平均气温和年总降水量等常规气候因子。在一定程度上能够衡量气候变化的影响,但这些常规的气候因子带来的变化通常较为平稳,且大多为逐渐变化,难以直观呈现对农田氮盈余的关键影响,不利于针对性地开展氮素管理。相比之下,极端气候变化具有突发性和破坏性,如作物死亡、养分流失等,直接加剧农田氮盈余的程度。具体而言,极端高温会加速作物蒸腾失水,迫使根系优先维持水分平衡,显著降低对土壤氮素的主动吸收效率,未被吸收的氮素易留存于土壤中;极端低温会抑制作物生长速率,减缓对氮素的需求,同时降低土壤中氮素的释放速度,导致氮素供应与作物需求不匹配。而极端降水则是通过 2 种路径影响氮循环:短时强降水易加剧土壤淋溶作用,使移动性强的氮素随径流流失;持续降水导致土壤水分过饱和,阻碍作物根系呼吸,降低氮素吸收能力,未被吸收的氮素或留存土壤形成盈余,或随积水排出系统^[18]。

综上所述,针对极端气候对农田氮盈余的影响分析,现有研究中存在的不足之处包括:1)多局限于横向或纵向单维度,难以综合捕捉氮收支的时空变化规律。2)聚焦极端气候对农田氮盈余的影响研究较少,且未结合区域特征展开,难以支撑气候频发背景下的农田氮素管理。而长江中游作为极端气候频发、化肥氮投入量高的粮食主产区,其相关研究缺口尤为突出。

长江中游地区是长江经济带核心与“中三角城市群”所在地,也是国家生态安全战略关键区域,维护着长江流域生态平衡。长江中游属亚热带季风气候,年平均降水量 1 200~1 800 mm,且集中在夏季,东南部年平均极端高温日数 15~25 d,北部冬季极端低温可降至-5℃以下,东部汛期强降水年平均 3~5 次,极端气候对农业系统干扰强度突出。作为重要粮食生产基地,其水稻种植面积占耕地的 62.3%,湖南、湖北农田年平均化肥氮投入量分别达 285、312 kg/hm²,远超全国平均水平。在极端气候频发且化肥使用量较高的背景下,区域农田氮盈余问题逐渐凸显,而现有氮

素管理措施较少考虑到极端气候特征。

因此,本文以长江中游地区 36 个地级市 2010—2022 年数据为基础,针对上述研究缺口开展创新研究:1)综合考虑横向维度和纵向维度解析农田氮盈余的演变趋势,为全面把握长江中游地区农田氮素情况提供更系统的视角;2)填补区域内极端气候与农田氮盈余关联研究的空白,重点探究极端气候变化对农田氮盈余的影响及其空间异质性;3)结合区域气候与农业特征提出针对性氮素管理策略,为有效应对极端气候风险、优化氮素管理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江中游地区横跨湖北、湖南、江西三省,承东启西、连南接北,面积约 56.46×10⁴ km²,占长江经济带的 27.5%。由于恩施土家族苗族自治州、湘西土家族苗族自治州、天门市地区的数据缺失较多,存在连续 5 a 及以上的核心数据缺失,采用插值法所得长时间序列数据与实际省份年鉴中数据差距较大,难以满足研究精度要求;同时,该区域山地丘陵较为集中,耕地碎片化且占比低,合计耕地面积约占湖北、湖南两省耕地总面积的 8.2%,对长江中游地区整体研究的代表性影响有限。因此,将这几个地级市剔除,研究区共包含 36 个地级市(图 1)。长江中游地区自然环境多样,涵盖山地、丘陵、平原和湖泊。其中山地和丘陵主要集中在西部和南部,而平原和湖泊主要分布在东部和北部。其气候整体属于亚热带湿润气候,年降水量丰沛,有利于农作物的生长。在土地利用方面,该地区主要以耕地为主,年均耕地面积达到 16.22×10⁴ km²,主要农作物包括小麦、稻谷、玉米等,是中国关键的粮食生产区域。

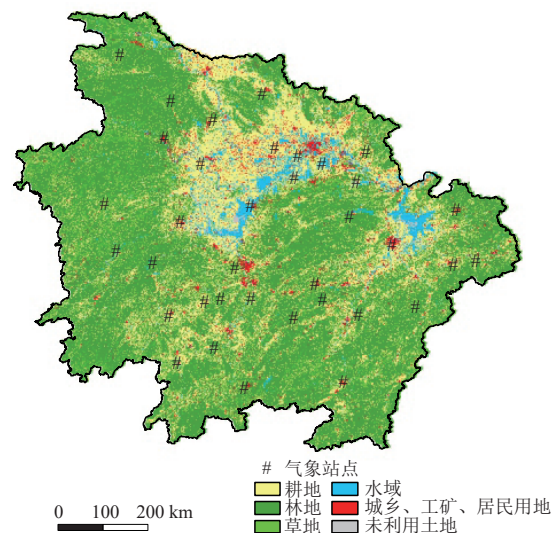


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源 气象数据:长江中游地区 36 个气象站点逐日降雨量、最高气温、最低气温数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)及美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的国家环境信息中心(NCEI)发布的逐日气象数据(<https://www.noaa.gov/>)。

农业数据:复合肥用量、人和畜禽数量、农作物产量数据来源于 36 个地级市各年的统计年鉴和统计公报(<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>)。耕地面积数据(包括水田、旱地)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的多时期土地利用数据集(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>),空间分辨率为 1km,缺失年份采用插值法补充。玉米、小麦、水稻的种植面积来源于国家生态科学数据中心(<https://nesdc.org.cn/>),具体为 1 km 种植分布栅格数据提取

所得各地级市种植面积。

1.2.2 数据处理 对气象数据的缺测值和异常值进行插值、剔除处理,采用 ClimDex 软件计算长江中游地区 36 个地级市的极端气候指数。其中,极端气候指数的选取采用的是世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)(<https://wmo.int/>)气候委员会推荐使用的气候变化与监测指数专家团队(ETCCDI)构建的 27 个核心指数,本文选取其中的 7 个极端气候指标,包括 3 个与气温有关的极端气候指数(日最高气温极大值 TXx、日最低气温极小值 TNn、霜冻日数 FD)及 4 个与降水有关的极端气候指数(年总降水量 PRCPTOT、5 d 最大降水量 Rx5day、大雨日数 R20、降水强度 SDII)。在此基础上增加极端气候指数高温日数 HD,该指数来源于中国气象局的监测标准,在中国已有广泛应用,尤其在长江经济带地区的适用性已得到证实^[19],具体定义见表 1。

表 1 极端气候指数定义

Table 1 Definition of extreme climate indices

气候指数	指数名称	符号	指数定义	单位
极端气温强度指数	日最高气温极大值	TXx	每月内日最高气温的最大值	°C
	日最低气温极小值	TNn	每月内日最低气温的最小值	°C
极端气温频率指数	霜冻日数	FD	每年日最低气温<0 °C的全部日数	d
	高温日数	HD	每年日最高气温>35 °C的全部日数	d
极端降水强度指数	大雨日数	R20	每年日降水量≥20 mm 的日数	d
	降水强度	SDII	年总降水量与湿日数量的比率	mm/d
极端降水频率指数	年湿润日降水总量	PRCPTOT	每年全部雨(雪)日降水量之和	mm
	5 d 最大降水量	Rx5day	每年最大的连续 5 d 降水量	mm

2 研究方法

2.1 极端气候分析法

1)气候倾向率分析法

气候倾向率用以描述气候变量的长期线性变化趋势,一般以气候变量随时间变化的线性趋势线回归系数的 10 倍表示^[20]。计算公式为:

$$Y = a + bt \tag{1}$$

式中:Y 为极端气候指数;a 为常数;t 为年份;b × 10 为气候倾斜率,d/a。气候倾斜率>0 时,表示极端气候指数随时间变化呈上升趋势;气候倾斜率<0 时,表示极端气候指数随时间变化呈下降趋势。

2)Mann-Kendall 突变检验法

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法^[21],可以反映出序列的变化趋势,同时也可以确定出序列中发生突变的开始时间。该方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少量异常值的干扰,适用于

气象等非正态分布的数据。

假设时间序列为 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, M_k 表示第 i 个样本 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的累计数,定义统计量:

$$M_k = \sum_{i=1}^k s_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

$$s_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \tag{3}$$

$$UF_k = \frac{M_k - E(M_k)}{\sqrt{\text{var}(M_k)}} \tag{4}$$

$$\begin{cases} UB_{k'} = -UF_k \\ k' = n + 1 - k \end{cases} \tag{5}$$

式中: $E(M_k)$ 、 $\text{var}(M_k)$ 分别为统计量 M_k 的平均值和方差。在进行突变检验时,选取显著水平 α 进行编程计算,该文给定显著水平为 0.05,临界值为 $U_{0.05} = \pm 1.96$,得到 UF 和 UB 2 组数据,并以此进行分析。

当 $UF > 0$ 时,说明极端气候指数在时间序列上表现为上升趋势;反之,则表现为下降趋势。若 UF

超出临界线时,则表明极端气候指数上升或下降趋势显著。当UF和UB曲线出现交点时,若交点位于临界线之间,并且确定交点具体年份,则表明该交点通过显著性检验,为突变的开始时间。

3) 克里金插值法

克里金插值法通常应用于GIS空间分析中,在数据网格化的过程中考虑描述对象的空间相关性,使得插值结果更接近于实际情况^[22]。计算公式为:

$$\hat{Z}(X_0) = \sum_{i=1}^n \mu_i Z(X_i) \quad (6)$$

式中: $\hat{Z}(X_0)$ 为研究区域内变量在 X_i 处的取值; μ_i 为权重系数; $Z(X_i)$ 为观测点 X_i 所对应的观测值。

2.2 氮收支估算方法

研究区内农田氮收支情况,主要涉及输入、输出和氮盈余3个方面。根据质量守恒原理,对长江中游地区氮收支进行估算^[23]。计算公式为:

$$NI_{crop} = NI_{dep} + NI_{fer} + NI_{am} + NI_{BN} + NI_{se} + NI_{st} \quad (7)$$

$$NO_{crop} = NO_{CMP} + NO_{NH_3} + NO_{De} + NO_{le} \quad (8)$$

$$N_{surp} = NI_{crop} - NO_{crop} \quad (9)$$

式中: NI_{crop} 为农田系统氮输入总量,t; NI_{dep} 为大气沉降氮,t; NI_{fer} 为合成化肥氮,t; NI_{am} 为粪肥氮,t; NI_{BN} 为生物固氮,t; NI_{se} 为种子氮,t; NI_{st} 为秸秆还田氮,t; NO_{crop} 为农田系统氮输出总量,t; NO_{CMP} 为农作物收获氮,t; NO_{NH_3} 为挥发氮,t; NO_{De} 为反硝化氮,t; NO_{le} 为水体输出氮,t; N_{surp} 为农田系统氮输入总量与农田氮输出总量的差值,t。氮收支各组成部分计算方法为:

$$NI_{dep} = S_{cul} \times F_{dep} \quad (10)$$

$$NI_{fer} = M_{comp} \times r \quad (11)$$

$$NI_{am} = M_{pop} \times \alpha \times 40\% \quad (12)$$

$$NI_{BN} = (S_{paddy} + S_{dry}) \times \eta \quad (13)$$

$$NI_{se} = S_{sow} \times I_N \quad (14)$$

$$NI_{st} = Y_{crop} \times k \times \varphi \times c \quad (15)$$

$$NO_{CMP} = Y_{crop} \times \beta + M_{rem} \times \gamma \quad (16)$$

$$NO_{NH_3} = (M_{pop} + M_{comp}) \times \lambda \quad (17)$$

$$NO_{De} = (M_{comp} + M_{pop}) \times \lambda \quad (18)$$

$$NO_{le} = (NI_{fer} + NI_{BN}) \times 30\% + M_{pop} \times \omega \quad (19)$$

式中: S_{cul} 为耕地面积, hm^2 ; F_{dep} 为大气氮沉降通量, kg/hm^2 ; M_{comp} 为尿素、复合肥使用量,t; r 为平均含氮比例,%; M_{pop} 为人、畜禽数量,人、头; α 为排泄系数, kg/a ; S_{paddy} 、 S_{dry} 分别为水田、旱地面积, hm^2 ; η 为固氮率, $kg/(hm^2 \cdot a)$; S_{sow} 为农作物播种面积, hm^2 ; I_N 为单位面积的种子氮输入强度, $kg/(km^2 \cdot a)$; Y_{crop} 为农作

物产量,t; k 为谷草比系数, kg/kg ; φ 为秸秆还田率,%; c 为秸秆含氮量, kg/t ; β 为作物含氮系数, g/kg ; M_{rem} 为秸秆离田量, kg ; γ 为挥发系数, kg/kg ; λ 为反硝化损失系数, kg/kg ; ω 为水体输出损失系数, kg/a 。

需特别说明的是,本研究在估算长江中游地区36个地级市的农田氮素输入和输出时,虽然试图尽可能全面地考虑相关要素并将其纳入计算,但由于部分地级市的指标系数尚未有合理的监测数据及某些数据的获取存在实际困难,研究中不得已参考和借鉴了相关文献中的处理方法和数据,这可能导致估算结果与实际情况之间存在一定误差。但是,本研究借鉴的文献参数均经过“区域适配性筛选与验证”以规避省域间系统性偏差:针对大气沉降氮、生物固氮率等区域敏感性参数,直接采用长江中游3省的专项研究数据(表2),如区分湖北、湖南、江西的大气氮沉降通量实测值;生物固氮率按水田、旱地类型选取长江流域普遍使用的固氮率;对于粪肥排泄系数、秸秆还田率等通用性参数,优先选取南方稻作区及长江流域相关文献成果,结合3省农业统计公报微调,如秸秆还田率38%与区域平均水平一致。经与已有研究比对,湖北省、江西省氮盈余强度估算值与对应区域研究结果偏差在5%以内,证实参数在3省间无系统性偏差,可满足研究精度要求。因此,本研究的结果仍能较好地反映长江中游地区2010—2022年农田氮收支的整体态势。

2.3 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归模型(GTWR)是在普通最小二乘法(OLS)、地理加权回归模型(GWR)的基础上,同时考虑时间和空间的平稳性,以此来分析区域观测值,使回归结果更加有效。在本研究中,将极端气候分析法所确定的极端气候相关变量,如特定区域内不同时间点的日最大气温极大值、降水强度等作为核心自变量。这些变量能够直接且敏锐地反映极端气候状况,对农田氮盈余可能产生关键影响。同时,依据氮收支估算方法获取氮素投入量与氮素输出量,经计算得到农田氮盈余量,将其纳入模型作为因变量。计算公式为:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (20)$$

式中: Y_i 为观测值; u_i 、 v_i 、 t_i 分别为第 i 个观测值的经度、纬度和时序; x_{ik} 为解释变量; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为回归常数; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为回归系数; ϵ_i 为第 i 个观测值的随机误差。

表2 氮收支各组成部分参数取值
Table 2 Parameter values of each component of nitrogen budget

氮收支组成部分	类别	系数	氮收支组成部分	类别	系数
大气氮沉降通量 ^[24]	湖北省	29.89	秸秆还田率	农作物	38
	湖南省	32.8	秸秆含氮系数 ^[30]	小麦	5.2
	江西省	33.39		水稻	7.5
平均含氮比例 ^[25]	尿素	46	玉米	5.8	
	复合肥	13	农作物含氮量 ^[31]	小麦	17.9
排泄系数 ^[26]	人	4	水稻	11.8	
	猪	8	玉米	14.1	
	牛	42	挥发系数 ^[32]	水田	0.20
	羊	7	旱地	0.25	
	家禽	0.3	有机肥	0.09	
还田比例 ^[27]	人畜粪便	40	反硝化损失系数 ^[33]	水田	0.32
固氮率 ^[28]	水田	45	旱地	0.15	
	旱地	15	有机肥	0.13	
种子氮输入强度 ^[29]	小麦	227	水体输出损失系数	合成化肥氮	30
	水稻	69.2	农田固氮	30	
	玉米	25.9	水体输出损失系数 ^[34]	人	3.3
谷草比系数	小麦	1.2			
	水稻	1.0			
	玉米	1.5			

3 结果与分析

3.1 长江中游地区极端气候指数变化特征

3.1.1 极端气候指数年际变化特征 由图2可知,长江中游地区极端高温的发生频率呈上升趋势,倾向率达到0.89 d/a,而极端低温的发生频率则下降0.46 d/a。说明在2010—2022年,该地区极端高温的持续时间整体呈增加趋势。暖指数TXx与HD在2013年、2016年、2019年、2022年均呈现明显上升趋势,表明研究区每隔约3 a会经历1次明显的气候变暖现象。对于冷指数,在2010—2014年,TNn指数保持在平均值-4℃以下,同时FD指数稳定在平均值19 d以上,表明该时间段内冬季极端低温现象较为普遍且霜冻天数较多。然而,从2015—2022年,TNn指数和FD指数在平均值附近出现较大波动,显示出极端低温现象的不稳定性。尽管冬季偶有低温,强度和持续时间却明显变化,这种波动性可能与全球气候变暖趋势密切相关。

2010—2022年长江中游地区极端降水频率和强度总体呈减少趋势。具体到各个指数,PRCPTOT、R20与Rx5day指数的年变化趋势大体一致,气候倾向率分别为-5.39 mm/a、-0.23 d/a和-1.18 mm/a,表明该地区整体降水量和极端降水发生的频率在缓慢下降。相对而言,SDII指数显示出微小增加,其多年平均值为14 mm/d,且有61.5%的年份降水强度

低于平均值。表明在大多数年份中,该地区的降水量未能达到长期平均水平。此外,2019年降水强度显著上升,达到峰值28 mm/d,可能意味着该年发生了强降雨事件。

为进一步研究长江中游地区极端气候的年际突变特征,采用Mann-Kendall方法进行突变检验。由表3可知,在2010—2022年,极端气温指数中的TXx和FD在2013年发生显著突变,突变后分别降低2.3℃和5 d,且变化趋势在突变前后呈现出一致的阶段性特征,可能是由于2013年长江流域干旱事件频发^[35],研究区内降水比多年平均偏少,其余极端气温指数无显著突变。此外,在2016—2017年FD指数通过0.05显著性检验,呈明显下降趋势。

对于极端降水指数而言,除PRCPTOT指数外,其余极端降水指数的突变点所在年份存在较大差异。R20指数、Rx5day指数和SDII指数分别在2018年、2015年、2012年发生显著突变,且突变前后2个阶段均呈下降趋势。

3.1.2 极端气候指数空间分布特征 由图3可知,长江中游各地级市极端气温指数空间分布特征差异较大。从空间分布上来看,暖指数在地级市间的分布整体上显示出相对均匀的特征,表现为自东向西逐渐减少的空间分布格局,且高值区主要集中在中游东南部。具体来说,TXx和HD指数值分别从中游地

区东南部的 39.3 °C 和 50.3 d 减少到西北部的 35.0 °C 和 13.1 d, 且最大值出现在江西省。冷指数 TNn 和 FD 的空间分布呈“互补型”的分布特征, 且中游地区

南北指数值差距较大。TNn 指数和 FD 指数高值区均出现在湖北省以北的地区。同时, TNn 和 FD 指数值最大差值达到 5.9 °C 和 43.8 d。

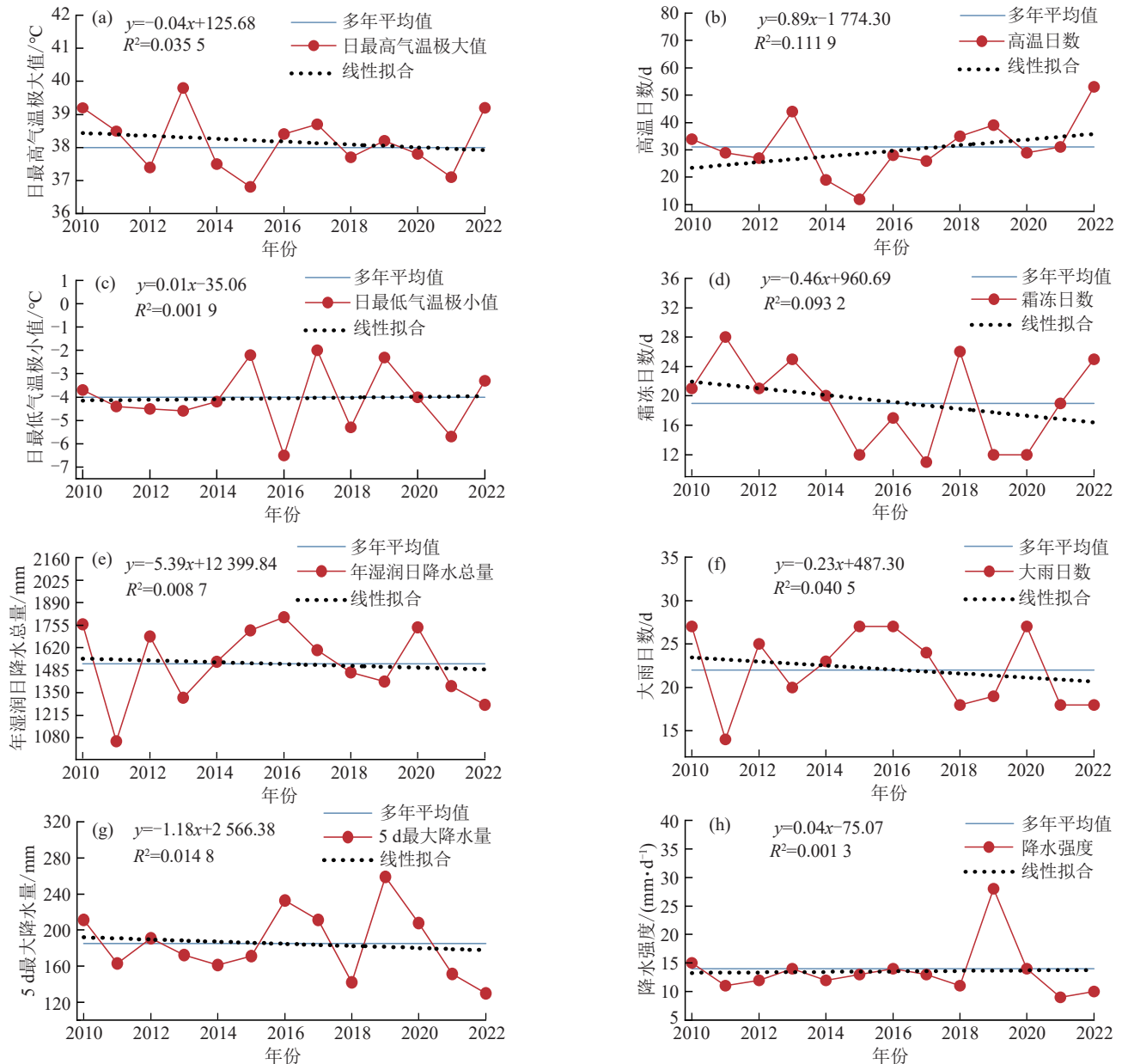


图 2 极端气候指标年际变化

Fig.2 Interannual variations in extreme weather indicators

表 3 极端气候指标突变分析

Table 3 Analysis of abrupt changes in extreme weather indicators

指标	序列长度	突变点	是否通过显著性检验
日最高气温极大值	2010—2022年	2013 ↓	是
高温日数	2010—2022年	无	-
日最低气温极小值	2010—2022年	无	-
霜冻日数	2010—2022年	2013 ↓	是
年湿润日降水总量	2010—2022年	无	-
大雨日数	2010—2022年	2018 ↓	是
5 d 最大降水量	2010—2022年	2015 ↓	是
降水强度	2010—2022年	2012 ↓	是

长江中游地区各极端降水指数整体上存在区域性差异。PRCPTOT和R20指数的空间分布格局具有一致性,呈“南高北低,东高西低”趋势。其中PRCPTOT指数从中游东部得2176.1mm递减到中游北部的

863.9mm;而R20指数则是从32.5d递减到9.4d,高值区集中在江西省。Rx5day与SDII指数差异较大,Rx5day表现为以三省交界处为中心,向四周逐渐递减的趋势;SDII则表现出“自南向北”递减趋势。

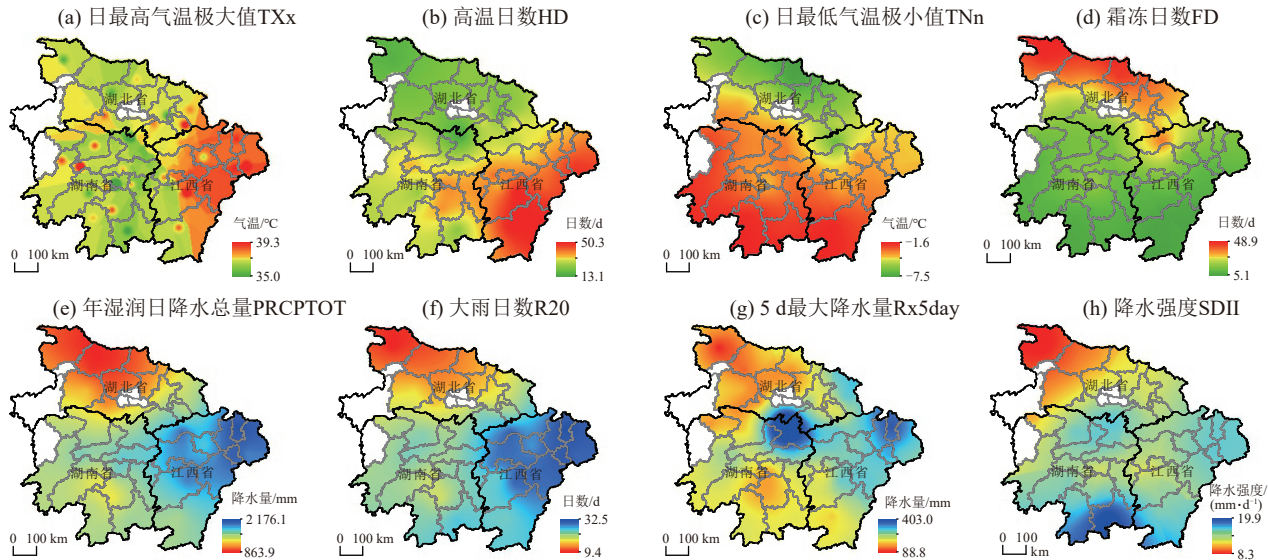


图 3 极端气候指标空间分布

Fig.3 Spatial distribution of extreme weather indicators

3.2 长江中游地区农田氮素变化特征

3.2.1 农田氮素输入、输出整体变化特征 根据2010—2022年长江中游地区的基本统计数据,选取并确定计算所需相关参数,按照前述的计算方法,计算2010—2022年长江中游地区农田氮素平衡情况,结果见表4。

表 4 长江中游地区农田氮收支状况

Table 4 Nitrogen budget of farmland in middle reaches of Yangtze River

输入项	数量/(10 ⁴ t)	输出项	数量/(10 ⁴ t)
大气氮沉降	1.99	农作物收获氮	124.55
合成化肥氮	371.27	挥发氮	119.83
粪肥氮	90.74	反硝化氮	128.80
生物固氮	57.54	水体输出氮	47.56
种子氮	0.87	输出总量	420.74
秸秆还田氮	20.99	总盈余量	122.66
输入总量	543.40		

由表3和图4可知,农田氮养分输入总量多年平均值为543.40×10⁴t,在不同输入项中,合成化肥氮输入的占比最大,年平均输入氮量为371.27×10⁴t,占总输入量的68.32%,其次是人畜禽产生的粪肥氮,相比之下,种子氮等其他途径的氮素输入,对总氮输入量的贡献相对较小。从年际变化来看,2010—2022年长江中游地区农田生态系统中各氮输入源的氮输入量整体呈下降的趋势,年平均降幅达2.47%。其中,合成化肥氮输入随年度变化总体趋势与氮素总量一致,且2013年总量和占比均达到峰值;粪肥氮输

入量为78.08×10⁴~101.18×10⁴t,不同年份占比为14.23%~20.36%。主要是归咎于研究区的耕地面积不断扩大及畜禽养殖业的发展,化肥和有机肥的使用量随之增加。合成化肥氮和粪肥氮这类人为氮素来源已远超大气氮沉降、生物固氮等天然来源,进一步说明大量人为氮源的输入打破原始农业氮平衡,重新构建区域农田氮循环模式,人类活动必然会干扰农田生态系统的氮循环。

在农田氮素不同输出项中,各输出途径的比例相对稳定,反硝化氮、农作物收获氮、挥发氮为主要输出项,年平均占比分别为30.61%、29.60%、28.48%,水体输出氮远小于前三者。与各项氮输入源的年际变化一样,2010—2022年4项氮输出源也呈缓慢下降的趋势。这一现象可能与氮输入量及气候有关。因为高的氮输入会增加氮流失风险,地表输入氮素绝大部分经反硝化、氮挥发和生物质燃烧排入大气,仅约20%进入水体。而高降水量和高温促进反硝化和氮气体的产生和释放。因此,在未来的农田氮素管控和治理中,应重点关注这3种主要输出项。

对于农田氮盈余而言,长江中游地区农田氮盈余量总体下降,年平均盈余量达122.66×10⁴t。具体来看,研究前期变化有所波动;在2015—2021年下降趋势明显,年平均降幅为4.7%;但2022年氮盈余量有回升趋势,且上升速度较快,达到20.95%,表明在未来几年可能会出现农田氮盈余加重的现象。

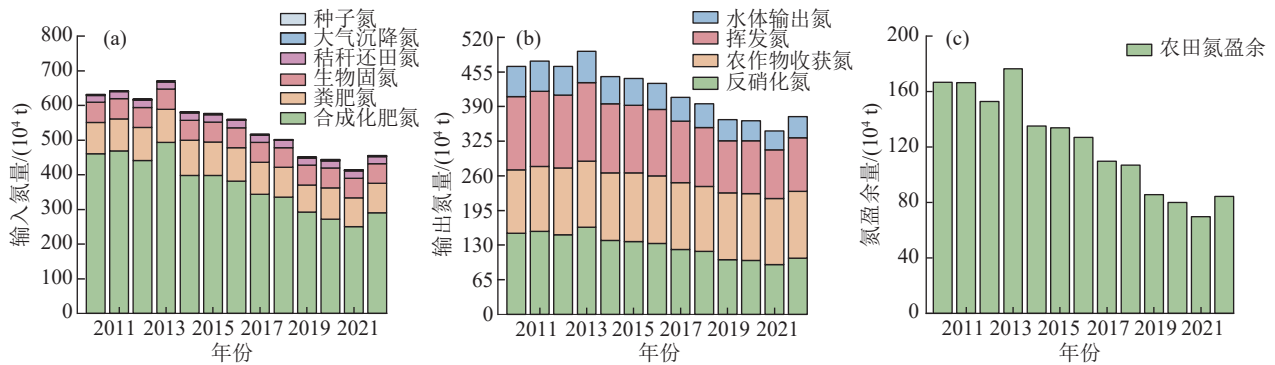


图 4 氮素总体变化特征

Fig.4 Characteristics of overall changes in nitrogen

3.2.2 农田氮盈余强度时空特征 单位耕地面积的氮盈余水平,即强度水平,能够直观反映农田氮素负荷状态,也是评价氮素管理成效的重要依据。基于长江中游地区 2010 年、2016 年和 2022 年农田氮盈余强度的数据,按 100 kg/hm² 等间距将农田氮盈余强度从低到高划分为 4 级,以此来反映长江中游地区农田氮盈余强度的区域分化情况。

从省域和市域尺度上来看,长江中游地区的农田氮盈余强度呈湖南省>湖北省>江西省的趋势(图 5)。具体变化趋势可大致分为 2 类:1)湖南省和湖北省的农田氮盈余强度虽整体上呈缓慢下降趋势,但部分地级市农田氮盈余强度在研究中后期有所上升。以永州市、益阳市为代表,在 2016 年农田氮盈余强度分别增长到 188.35、104.06 kg/hm²。进一步分析数据可知,这两地耕地面积分别下降 1.06%、1.17%,然而农户为保证作物产量,增加化肥施用量,使作物收获量却分别增长 4.24%、1.99%。此外,在化肥施用量下降且作物收获量相对稳定的背景下,

十堰市、宜昌市和鄂州市的农田氮盈余强度却仍常年处于 98.85~203.69 kg/hm²,多年变化较小。其中,十堰市和宜昌市主要是农村人口和生猪养殖量偏高,农村人口平均值分别为 218.24×10⁴、272.62×10⁴ 人,生猪养殖量平均值为 169.44×10⁴、556.10×10⁴ 头,粪肥过量使用导致农田氮盈余;而鄂州市则由于整体耕地面积较小,土地承载压力较大。

2)江西省各地级市的农田氮盈余强度整体处于较低水平,普遍在 15.15~60.85 kg/hm²,多年变化幅度较小。主要是由于江西省总体耕地面积较小,各市年平均耕地面积为 41.67×10⁴ hm²,使得单位耕地面积的农田氮盈余产生量较小。值得注意的是,上饶市、宜春市及吉安市,该区域年平均耕地面积均高于 64.26×10⁴ hm²,但农田氮盈余强度仅在 13.27~21.93 kg/hm²,可见,该区域在农田氮素管理上表现较好,不仅减少肥料的使用,同时实现作物产量的提升,体现科学施肥和可持续农业发展的成效。

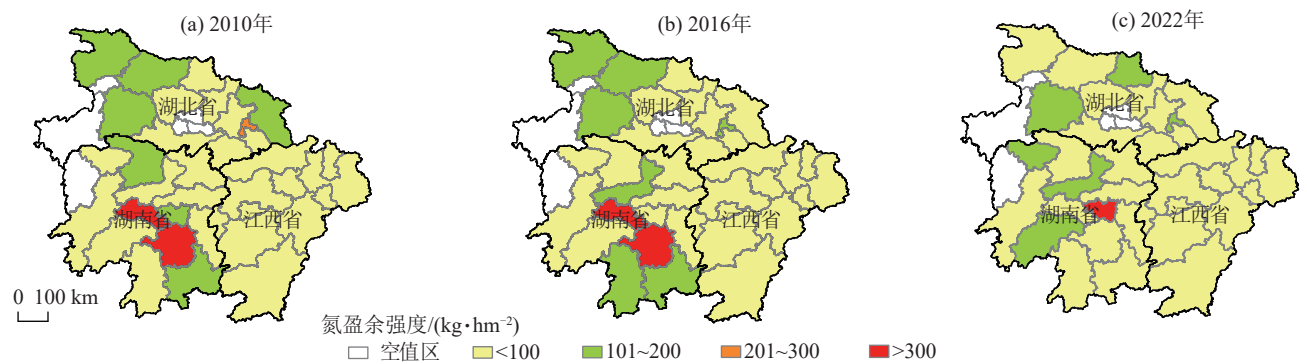


图 5 氮盈余强度分布

Fig.5 Distribution of nitrogen surplus intensity

3.3 极端气候对农田氮盈余的影响分析

3.3.1 极端气温对农田氮盈余的影响 在进行 GTWR 模型拟合之前,需考虑变量之间可能存在的相关性,可能导致多重共线性,从而影响模型的估计精度。因此,采用方差膨胀因子(VIF)对极端气候指标进行检验。根据表 5 的结果,所有变量的 VIF 值均低

于 10,表明指标之间没有显著的多重共线性,单个变量之间的贡献估计准确,可以构建 GTWR 模型。

进一步通过模型计算,由表 6 可知,考虑空间非平稳性的 GWR 模型和考虑时空非平稳性的 GTWR 模型的 R² 和调整 R² 显著高于 OLS 模型,模型拟合效果较好。其中,GWR 模型和 GTWR 模型的 R² 分别为

0.62、0.70,二者相差不大,均能解释60%以上的因变量变化,同时,GTWR模型的AICc值略低于GWR,可见GTWR模型拟合情况最好。同时,GTWR所呈现相关性数据 $p < 0.05$,通过显著性检验,表明模型的拟合效果较好,能够支持后续的深入分析。

表5 极端气候指标共线性检验结果

Table 5 Collinearity test results of extreme climate indicators

气温指数	VIF	降水指数	VIF
TXx	1.51	PRCPTOT	4.37
TNn	2.44	Rx5day	1.19
HD	2.71	R20	4.44
FD	1.41	SDII	1.74

表6 GTWR拟合优度检验

Table 6 Goodness of fit test for GTWR

回归模型	R^2	调整 R^2	AICc
OLS	0.11	0.09	2 738.05
GWR	0.62	0.61	2 593.94
GTWR	0.70	0.70	2 592.23

为检验个别年份农田氮盈余的空间自相关性对回归结果是否带来影响,对2010—2022年的GTWR残差进行Moran's I 检验。如果年残差之间不存在空间自相关性,则GTWR模型的回归结果存在有效性。这是由于预测值和观察值之间的差异(残差)必须是随机不可预测的,若可以使用一个残差来预测得到下一个残差,则说明存在一些模型还未捕捉到的可预测信息。残差空间相关性检验结果见表7。由表7可知,2010—2022年,莫兰指数值均接近于0, Z 的绝对值均在1.65以下, $p > 0.1$,表明所有年份的残差都是随机分布的,GTWR模型回归结果的可靠性高,能够支撑后续分析。

表7 GTWR回归残差的Moran's I 指数

Table 7 Moran's I index of GTWR regression residuals

年份	莫兰指数	Z	p
2010	-0.10	-0.61	0.54
2011	-0.10	-0.70	0.49
2012	0.03	0.69	0.49
2013	0.05	0.66	0.51
2014	-0.08	-0.49	0.62
2015	-0.04	-0.14	0.89
2016	0.07	0.86	0.39
2017	-0.02	0.08	0.94
2018	0.06	0.85	0.40
2019	0.04	0.57	0.57
2020	0.05	0.68	0.49
2021	-0.02	0.06	0.95
2022	-0.15	-1.11	0.27

根据GTWR模型估计结果,对各因素的回归系数进行可视化处理,得到各极端气候指数回归系数的空间分布(图6)。每个极端气候指数的回归系数均呈现不同的正负和数值变化。其中,回归系数的正负表明极端气候指数对农田氮盈余的影响方向,回归系数的数值表明影响程度。

从回归系数来看,长江中游地区极端气温暖指数中气温极大值对农田氮盈余普遍具有正相关效应,集中分布在湖南省和江西省地区,仅在少数地区呈负相关效应,零星分布在湖北省境内。其中,娄底市、衡阳市、永州市和郴州市的极端高温对农田氮盈余的正向影响力较大,其回归系数分别达0.64、0.63、0.49、0.96。相较于TXx指数而言,HD对农田氮盈余的影响程度较小,绝大部分地级市呈负相关效应。

极端气温冷指数对农田氮盈余的回归系数存在显著的空间差异性,在研究区南部主要为显著正相关效应,而显著负相关则集中分布在北部地区。在南部地区(如衡阳、株洲、赣州、吉安、抚州、新余)的氮盈余受TNn指数影响出现波动,回归系数为0.08~0.78。在北部地区,TNn与氮盈余的回归系数主要在-0.61~-0.05波动。表明极端低温对该区域农田氮盈余的产生起到负向作用。此外,霜冻日数FD对农田氮盈余的影响与TNn指数的影响大体相似,进一步印证极端气温冷指数在不同区域对农田氮盈余影响的差异性。

3.3.2 极端降水对农田氮盈余的影响 由图7可知,以2010年、2016年和2022年为例,长江中游地区除降水总量PRCPTOT外,其余极端降水指数对氮盈余的影响在区域分布上存在一致性。

整体而言,极端降水对农田氮盈余的正相关效应集中分布在研究区北部和东部地区,而显著负相关则主要分布在湖南省地区。分析其原因可得:在北部和东部地区,极端降水对农田氮盈余具有正相关效应。例如,孝感市、武汉市、十堰市、黄冈市,与降水强度的相关性年平均为0.30~0.59,在夏季汛期常常出现强降雨,极端降水过程中,土壤容易发生淋溶,特别是表层土壤中的氮素被淋洗到地下水或河流中,导致有效氮素减少。而对于江西省(如九江、宜春、新余),该地区属于亚热带季风气候,年降水量均高于1 830.6 mm,且降水持续时间较长。极端降水发生时,土壤水分易过度饱和。在湖南省,尤其是衡阳、永州、郴州等地,降水分布较为均匀,年均降水量达1 438.1 mm,极端降水的频率和强度相对较低,使得农田有足够的时间来适应降水变化,进而避免农田氮盈余的大幅波动。

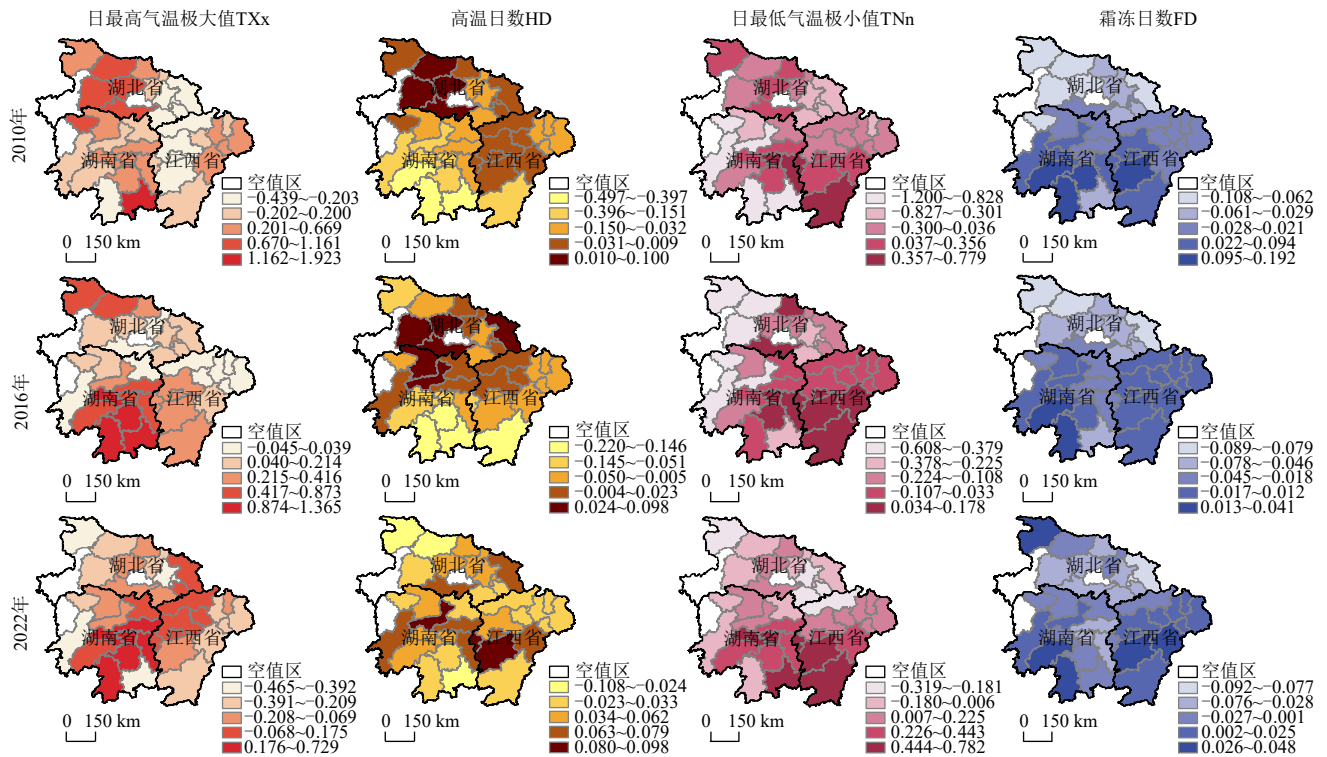


图 6 极端气温回归系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of regression coefficients of extreme temperature

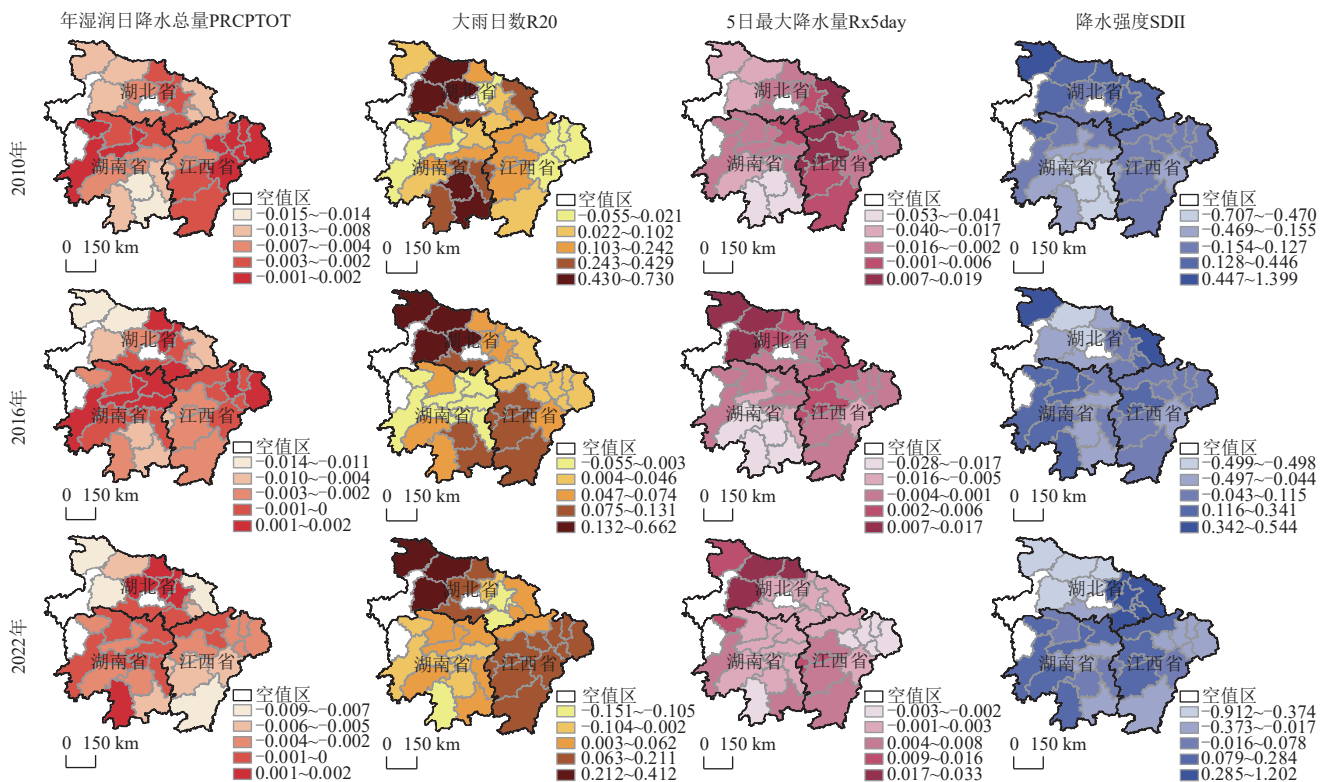


图 7 极端降水回归系数空间分布

Fig.7 Spatial distribution of regression coefficients of extreme precipitation

4 讨论

在剖析长江中游地区农田氮盈余的现状及其成因时发现,从时间维度看,研究前期农田氮素的收支和盈余有所波动,但到 2015—2022 年,下降趋势凸显,

这一现象与 2015 年中国政府发布的“化肥使用量零增长”行动计划直接相关^[36]。马朝红等^[37]的研究显示,同期长江中游地区的化肥施用量以 0.52%~4.13% 稳定下降且降速逐年加快,与本研究农田氮盈

余变化趋势契合。空间上,农田氮盈余强度呈现湖南省>湖北省>江西省的态势,与段扬等^[38]的研究结论相符。其中,湖北省、湖南省平均农田氮盈余强度分别达88.08、131.76 kg/hm²,显著高于相关研究所测算的中国平均氮素负荷(62.8 kg/hm²)。从地级市层面看,高值区集中在湖南省的永州市、益阳市及湖北省的十堰市、宜昌市、鄂州市。永州市和益阳市两地以水稻种植为主,因水稻对氮肥需求大,农民为高产普遍过量且凭经验施肥,缺乏科学理念,致农田氮盈余强度高,与何理等^[39]对长江流域氮素平衡的研究结果一致;而十堰市和宜昌市则因人口和生猪养殖量常年较高,粪肥过量输入,造成氮盈余量过多。对于江西省整体氮素管理较好,单位耕地面积氮盈余较少。

长江中游地区极端气温暖指数、冷指数与农田氮盈余关系密切且呈区域差异。在湘赣大部分地区,极端高温与农田氮盈余呈正相关,永州市、郴州市、娄底市和衡阳市表现尤为突出。主要是由于该区域水稻种植面积大,化肥施用量分别可达 22.37×10^4 、 11.93×10^4 、 16.17×10^4 、 54.16×10^4 t。极端高温加速植株蒸腾失水,根系为维持水分平衡而减弱对氮素的主动吸收能力,导致大量化肥氮未被作物利用便留存于土壤中,加之土壤氮循环相关的微生物活性通常在20°~30°内最高,而极端高温日数是指日最高气温>35°,在此情境下微生物活性显著下降,影响反硝化等氮素转化过程,加剧农田氮盈余^[40]。而极端气温冷指数对长江中游地区农田氮盈余的影响在南北部差异显著,南部如衡阳、株洲等地,极端低温使微生物繁殖速度减慢,氮素的硝化、矿化等转化过程受阻,原本可被作物吸收的氮难以形成,导致氮素在土壤中临时积累,农田氮盈余随之增加^[41]。北部则相反,且霜冻日数影响与之相似,可能源于南北农业生产结构与环境条件差异所致:北部以单季稻、旱地作物为主,作物耐低温能力较强,且土壤多为潮土,透气性好,微生物群落对低温的适应性优于南部地区,低温对氮素转化的抑制作用更弱。

本研究发现,极端降水对长江中游地区不同区域农田氮盈余影响差异显著。在研究区北部和东部,如十堰、黄冈等城市,夏季汛期强降雨使得土壤淋溶作用加剧,导致大量氮素随水流失到地下水或河流中^[42];而在江西省的九江、宜春、新余等地,由于亚热带季风气候的影响,年降水量较高且降水持续时间长,极端降水时土壤水分极易过度饱和,水稻根系在缺氧环境下呼吸受阻,生长活力下降,对土壤中氮素的吸收利用能力显著减弱。此时,大量氮素因未被作物有效吸收,或留存于土壤中形成潜在盈余,

或随田间积水排出造成流失^[43-44]。这种情况不仅影响作物对氮素的有效利用,长期来看还会导致土壤肥力下降,增加施肥成本,给周边水体带来富营养化风险。反观湖南省的衡阳、永州、郴州等地,降水分布均匀,极端降水频率和强度较低,为农田适应降水变化提供有利条件,自然减少农田氮盈余的累积风险。

本文研究发现,在农田氮盈余管理工作中,不仅应该关注其成因带来的影响,还需着重强化极端气候条件下氮盈余管理的优化。基于此,针对长江中游地区的农田氮盈余管理提出以下建议。

1)从农田氮素收支情况出发,湖南省和湖北省应优化氮肥施用策略,坚持源头减量优先^[45]。永州和益阳两地,因水稻需氮量大,农民为高产普遍凭经验过量施肥、缺乏科学理念,致氮盈余强度高,建议控制化肥施用,合理施肥,同时考虑改变现有农作物耕作方式,提高不依赖施肥作物的种植比例。对于人口和畜禽养殖量较高的十堰、宜昌等地,应结合地区农田面积、环境容量等因素,制定合理养殖数量,合理调控化肥和有机肥使用比例,提高氮素利用效率。而对于江西省整体农田氮盈余较低,建议探索“种养结合”模式及合理划分各农户的耕地负责区,进一步优化农田氮素管理。

2)针对受极端气候影响较大的地区,对不同地区特征采取差异化管理。在受极端高温影响较大的地区,如永州市、郴州市等应依据土壤养分含量和作物生长需求,精确计算施肥量^[46]。合理规划施肥时间,避开7—8月极端高温时段,将穗肥提前至高温来临前,同时采用“湿润灌溉”替代传统淹灌,减少植株蒸腾失水,提升氮素吸收利用率。对于南部受极端气温冷指数影响较大区域,建议增加有机肥的施用^[47],在播种前增施腐熟的有机肥,改善土壤保温性与微生物活性,缓解低温对氮素硝化、矿化的抑制作用,为土壤微生物提供良好的生存环境。

3)针对受极端降水影响较大的区域,建议从设施优化和栽培管理2个方面应对。对于十堰市和黄冈市,因汛期强降雨易致氮素淋溶,建议按地块坡度分级规划生态缓冲沟与集雨池布局,通过植被拦截与水体暂存减少氮素随径流失;非汛期结合土壤氮素监测结果,将集雨池存水统筹用于灌溉补氮^[48],实现流失氮素的循环利用。而九江、宜春、新余等地,由于土壤过饱和影响作物养分吸收,应引入抗涝能力强的作物品种,优化水稻等作物的种植密度和行距,合理规划植株间距改善根系通气条件^[49]。同时,结合汛期预报动态调整施肥方案,在汛期前适度

削减高效氮肥用量并增加缓释肥占比,减少积水期氮素盈余风险。

本研究通过对农田氮收支情况、极端气候对农田氮盈余的影响进行讨论并提出相应农田氮素管理建议,明确后续管理需立足农田氮盈余时空特征与极端气候影响差异:时间上延续“化肥使用量零增长”政策效能,空间上针对湘鄂高值区精准发力,永州、益阳等水稻主产区强化科学施肥与耕作优化,十堰、宜昌等养殖密集区调控养殖规模与粪肥用量,江西则深化“种养结合”巩固成效。同时,针对极端气候实施靶向措施,高温区避时精准施肥,低温区增施有机肥,强降雨区分级规划生态缓冲沟,积水区引入抗涝品种并优化种植密度,兼顾粮食安全与生态保护,有利于为长江中游地区农田氮盈余管理提供具体操作方案,为守护长江流域水环境、保障区域粮食安全与推动农业可持续发展提供有力支撑。

目前,在全球变暖和种植业迅速发展的背景下,极端气候变化对农田氮收支平衡的影响日益显著。探讨长江中游地区极端气候对农田氮收支的影响及应对措施,为相关政策的制定提供科学依据。但研究主要是围绕极端气候因子对农田的影响,而在土地利用变化和 policy 影响方面仍存在不足。此外,农田系统易受人为因素影响,但研究关注的重点集中于作物种类、产量和施用化肥量方面,涉及农户的耕作技术、灌溉方式以及施肥方法考虑较少。未来仍需进一步探究农田氮盈余的影响因素及应对措施。

5 结论

1) 2010—2022 年,长江中游地区极端气温与降水情况差异显著。时间上,极端气温暖升冷降,2013 年突变;极端降水(除 SDII 外)整体呈降,且约每 3 年发生 1 次突变。空间上,极端气温区域差异明显,东南部高温、北部低温且均持续时间较长;极端降水高值区则主要集中在东部。

2) 研究区农田氮素输入输出总量年际变化均呈下降趋势,其中合成化肥氮和反硝化氮为主要的氮素输入和输出途径。从区域分布来看,湖南省和湖北省的部分地级市农田氮盈余强度较高,是农田氮素管理的重点区域,江西省情况相对稳定。

3) 极端气候显著影响长江中游地区农田氮盈余,极端气温影响强于极端降水。极端气温强度指数多与氮盈余呈正相关,仅少数地级市为负相关;极端降水指数影响因区域而异,研究区北部边缘、东部地区呈正向影响,而在湖南地区则为负向影响。应针对不同区域特征,制定差异化农田氮素管理对策。

参考文献:

- [1] 刘慧,焦岩,窦婉毓,等.减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制[J].农业机械学报,2024,55(9):391-401.
LIU H, JIAO Y, DOU W Y, et al. Compensation effect and mechanism of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility and rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 391-401.
- [2] 梁雷,张建莉,王峰源.辽宁省主要地区农田生态系统氮负荷的研究[J].水生态学杂志,2013,34(2):62-68.
LIANG L, ZHANG J L, WANG F Y. Research on nitrogen load on farmland ecosystem in main district in Liaoning Province[J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(2): 62-68.
- [3] 胡春胜,张玉铭,秦树平,等.华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1501-1514.
HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1501-1514.
- [4] SUN Y M, GAO L M, MENG X S, et al. Large-scale exploration of nitrogen utilization efficiency in Asia region for rice crop: Variation patterns and determinants [J]. Global Change Biology, 2023, 29(18): 5367-5378.
- [5] BALLARD T C, SINHA E, MICHALAK A M. Long-term changes in precipitation and temperature have already impacted nitrogen loading[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(9): 5080-5090.
- [6] KIKSTRA J S, NICHOLLS Z R J, SMITH C J, et al. The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: From emissions to global temperatures [J]. Geoscientific Model Development, 2022, 15(24): 9075-9109.
- [7] 邓美华,谢迎新,熊正琴,等.长江三角洲氮收支的估算及其环境影响[J].环境科学学报,2007,27(10):1709-1716.
DENG M H, XIE Y X, XIONG Z Q, et al. Nitrogen budgets of the Yangtse delta region and their effect on the environment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(10): 1709-1716.
- [8] 赵巴音那木拉,路战远,李斐,等.内蒙古河套灌区主要作物农田氮素平衡及潜在污染状况分析[J].农业环境科学学报,2023,42(6):1347-1354.
ZHAO B, LU Z Y, LI F, et al. Analysis of nitrogen balance and potential pollution of main crops in the Hetao Irrigation area of Inner Mongolia [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(6): 1347-1354.
- [9] 孟亚飞,陈法锦,曾珍.湛江市辖区 2002—2013 年氮收

- 支演变及环境效应[J].热带地理,2015,35(5):777-784.
- MENG Y F, CHEN F J, ZENG Z. Nitrogen budget evolution in Zhanjiang municipal district and its environmental effect during 2002—2013 [J]. Tropical Geography, 2015, 35(5): 777-784.
- [10] 孟祥海,沈贵银.江淮生态经济区农田氮磷平衡与种养结合进程分析:以江苏省淮安市为例[J].江苏农业科学,2018,46(23):313-317.
- MENG X H, SHEN G Y. Analysis of nitrogen and phosphorus balance in farmland and planting-breeding combination in Jianghuai ecological economic zone: Taking Huai'an City of Jiangsu Province as an example [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(23): 313-317.
- [11] 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.
- [12] 曹丹,易秀,陈小兵,等.基于气候变化的黄河三角洲非主粮作物需水规律研究[J].土壤通报,2022,53(4):795-804.
- CAO D, YI X, CHEN X B, et al. Water requirement of non-staple crops in the Yellow River Delta based on climate change [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(4): 795-804.
- [13] 张玉松,何柳,张云云,等.不同生态区气象因子对花生产量相关性状的影响[J].中国油料作物学报,2024,46(3):676-686.
- ZHANG Y S, HE L, ZHANG Y Y, et al. Effects of meteorological factors in different ecoregions on yield-related traits of peanut production [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(3): 676-686.
- [14] 逯玉兰,李广,闫丽娟,等.气候变化对甘肃农牧交错带春小麦种植区划的影响[J].农业工程学报,2023,39(24):144-152.
- LU Y L, LI G, YAN L J, et al. Impacts of climate change on the regionalization of spring wheat planting in agro-pastoral ecotone of Gansu Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(24): 144-152.
- [15] 王孝贤,王靖,李扬,等.马铃薯发育期模型精度及其对升温的敏感性比较[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(6):1009-1022.
- WANG X X, WANG J, LI Y, et al. Comparison of simulation accuracy of potato phenology models and their sensitivity to rising temperature [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(6): 1009-1022.
- [16] 王媛,苏布达,姜彤,等.气候与社会经济变化下抚河流域氮磷负荷变化[J].人民长江,2024,55(2):65-76.
- WANG Y, SU B D, JIANG T, et al. Evolution of nitrogen and phosphorus load in Fuhe River basin under climate and socio-economic changes [J]. Yangtze River, 2024, 55(2): 65-76.
- [17] 张锦源,李彦生,于镇华,等.作物-土壤氮循环对大气CO₂浓度和温度升高响应的研究进展[J].中国农业科学,2021,54(8):1684-1701.
- ZHANG J Y, LI Y S, YU Z H, et al. Nitrogen cycling in the crop-soil continuum in response to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature: A review [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(8): 1684-1701.
- [18] 李柔珂,韩振宇,徐影,等.6.25 km 高分辨率降尺度数据对21世纪长江经济带极端气候事件及其风险的集合预估[J].气候与环境研究,2023,28(1):45-60.
- LI R K, HAN Z Y, XU Y, et al. An ensemble projection of extreme climate events and related risk exposures in the 21st century in the Yangtze River economic zone using high-resolution (6.25 km) downscaling datasets [J]. Climatic and Environmental Research, 2023, 28(1): 45-60.
- [19] 江激宇,刘嘉铭,赵勇,等.淮河流域气候变化对粮食生产用水绿色效率的影响[J].经济地理,2024,44(8):181-190.
- JIANG J Y, LIU J M, ZHAO Y, et al. Impact of climate change on green efficiency of water for food production in Huaihe River basin [J]. Economic Geography, 2024, 44(8): 181-190.
- [20] 刘兵,杨洋,郝卓.1980—2020年极端气候变化对京津冀玉米产量的影响[J].中国农业气象,2024,45(7):766-776.
- LIU B, YANG Y, HAO Z. Impact of extreme climate change on maize yield in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1980 to 2020 [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(7): 766-776.
- [21] 徐用兵,雷秋良,周脚根,等.1960—2015年云南省极端气候指数变化特征研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(11):15-27.
- XU Y B, LEI Q L, ZHOU J G, et al. Study on the change characteristics of extreme climate indices from 1960 to 2015 in Yunnan Province, China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(11): 15-27.
- [22] 韩轶才,李恒鹏,刘明亮,等.千岛湖流域主要土地利用方式氮收支平衡特征[J].环境污染与防治,2022,44(5):682-686.
- HAN Y C, LI H P, LIU M L, et al. Nitrogen budget balance characteristics of main landuse types in Qiandao Lake basin [J]. Environmental Pollution and Control, 2022, 44(5): 682-686.
- [23] MOUND J, DAVIES C, ROST S, et al. Author Correction: Regional stratification at the top of Earth's core due to core-mantle boundary heat flux variations [J]. Nature Geoscience, 2024, 17: 814-815.

- [24] 姚梦雅,胡敏鹏,陈丁江.1980—2015年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征[J].环境科学,2021,42(12):5777-5785.
YAO M Y, HU M P, CHEN D J. Dynamic of net anthropogenic nitrogen inputs and riverine nitrogen export in the Yangtze River basin in 1980—2015 [J]. Environmental Science, 2021, 42(12):5777-5785.
- [25] 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 M, YANG B Z, JIN T, 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.
- [26] 李新艳,李恒鹏.江西省陆地生态系统氮平衡的时空分布规律研究[J].环境科学学报,2011,31(6):1320-1330.
LI X Y, LI H P. Temporal and spatial changes of nitrogen mass balance in a terrestrial ecosystem of Jiangxi Province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6):1320-1330.
- [27] 杨宏伟,黄国鲜,罗艳,等.甬江流域氮素收支估算及驱动因素分析[J].环境科学研究,2024,37(7):1435-1445.
YANG H W, HUANG G X, LUO Y, et al. Estimation of nitrogen budget and its driving factors in the Yongjiang River basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(7):1435-1445.
- [28] 周杨明,于秀波,鄢帮有.1949—2005年江西省农田养分平衡动态的宏观分析[J].江西农业大学学报,2008,30(5):919-926.
ZHOU Y M, YU X B, YAN B Y. Balance and change trend of cropland soil nutrients in Jiangxi Province during 1949 to 2005 [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(5):919-926.
- [29] 徐昔保,杨桂山,李恒鹏.三峡库区1980—2005年农业用地氮平衡时空变化研究[J].环境科学,2009,30(8):2227-2233.
XU X B, YANG G S, LI H P. Spatio-temporal changes of nitrogen balance in 1980—2005 for agricultural land in Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2009, 30(8):2227-2233.
- [30] 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 H, LI H P, LI X Y, 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.
- [31] 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 J M, LI Y S, HU Y X, 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.
- [32] 马广文,香宝,银山,等.长江流域农业区非点源氮的平衡变化及其区域性差异[J].环境科学研究,2009,22(2):132-137.
MA G W, XIANG B, YIN S, et al. Budget changes and district diversity of non-point source nitrogen in agricultural fields in the Yangtze River basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2):132-137.
- [33] 谢丽纯,陈建耀.近10 a来珠江三角洲地区氮收支演变及区域差异分析[J].自然资源学报,2014,29(2):237-248.
XIE L C, CHEN J Y. Nitrogen budgets of the Pearl River Delta and its regional differences during the past decade [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(2):237-248.
- [34] 申源,邱鹏,廖梓延,等.气候变化下青藏高原农田杂草丰富度格局变化[J].应用与环境生物学报,2022,28(4):897-908.
SHEN Y, QIU P, LIAO Z Y, et al. Changes in distribution patterns of weed species richness in agricultural lands on Qinghai-Tibet Plateau under climate change [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(4):897-908.
- [35] 张存杰,肖潺,李帅,等.极端气候事件综合危险性等级指标构建及近60年来长江流域极端气候综合分析[J].地球物理学报,2023,66(3):920-938.
ZHANG C J, XIAO C, LI S, et al. Construction of multi-extreme climate events composite grade index and comprehensive analysis of extreme climate in the Yangtze River basin from 1961 to 2020 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(3):920-938.
- [36] GUO Y Z, WANG J Y. Spatiotemporal changes of chemical fertilizer application and its environmental risks in China from 2000 to 2019 [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(22):e11911.
- [37] 马朝红,胡时友,杨利,等.长江中下游地区化肥施用现状评估研究[J].农村经济与科技,2020,31(9):77-79.
MA C H, HU S Y, YANG L, et al. Evaluation and study on the present situation of chemical fertilizer application in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2020, 31(9):77-79.
- [38] 段扬,吴文俊,蒋洪强,等.长江经济带农田氮素平衡特征与污染风险评估分析[J].生态环境学报,2020,29(7):1344-1351.

- DUAN Y, WU W J, JIANG H Q, et al. Characteristics of nitrogen balance model and pollution risk assessment in Yangtze River economic zone[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7): 1344-1351.
- [39] 何理, 徐丽, 卢宏伟, 等. 1990—2018年长江经济带农田氮素平衡转变特征[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(10): 4820-4828.
- HE L, XU L, LU H W, et al. Characteristics of nitrogen balance transformation in farmland of Yangtze River Economic Belt from 1990 to 2018[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(10): 4820-4828.
- [40] 蔡丰乐, 马昕, 王帅丽, 等. 氮素对高温胁迫下玉米籽粒发育的调控效应[J]. *华北农学报*, 2022, 37(3): 119-127.
- CAI F L, MA X, WANG S L, et al. Effect regulating of nitrogen on grain development of maize under heat stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(3): 119-127.
- [41] 梁友, 王津, 王思进, 等. 稻田环境因子对水稻生长发育和产量、品质形成的影响研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(24): 1-9.
- LIANG Y, WANG J, WANG S J, et al. Research progress on influences of environmental factors in paddy field on rice growth, yield and quality formation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(24): 1-9.
- [42] 徐垦, 张芊芊, 张思毅, 等. 粤西典型村域次降雨条件下非点源氮素排放特征[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(8): 1725-1735.
- XU K, ZHANG Q Q, ZHANG S Y, et al. Characteristics of non-point source nitrogen emissions under individual rainfall events in a typical village area in western Guangdong, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(8): 1725-1735.
- [43] CALDWELL T G, YOUNG M H, ZHU J T, et al. Spatial structure of hydraulic properties from canopy to interspace in the Mojave Desert [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19): eL19406.
- [44] 苟照君, 李英年, 刘峰贵, 等. 黄河上游高寒草地土壤全氮含量分布特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2585-2594.
- GOU Z J, LI Y N, LIU F G, et al. Distribution and influencing factors of soil total nitrogen in alpine grassland of upper Yellow River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(9): 2585-2594.
- [45] 王鹏辉, 丁锐, 史文娇. 湖北省作物系统氮素利用及其环境影响综合评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(5): 634-644.
- WANG P H, DING R, SHI W J. Comprehensive assessment of nitrogen utilization of multi-crop system and its environmental impacts in Hubei Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(5): 634-644.
- [46] 陈苏, 黄怡素. 气候变化对双季稻化肥利用效率影响的实证分析: 以南方稻作区为例[J]. *农林经济管理学报*, 2023, 22(5): 582-591.
- CHEN S, HUANG Y S. Effect of climate change on fertilizer use efficiency of double-season rice: A case study of southern rice growing region[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2023, 22(5): 582-591.
- [47] 郭丽颖, 耿艳秋, 金峰, 等. 寒地水稻低温冷害防御栽培技术研究进展[J]. *作物杂志*, 2017(4): 7-14.
- GUO L Y, GENG Y Q, JIN F, et al. Research advances about low temperature, cold damage defense cultivation techniques of rice in cold region of China[J]. *Crops*, 2017(4): 7-14.
- [48] 李桂花, 张艳萍, 胡克林. 不同降雨和灌溉模式对作物产量及农田氮素淋失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3): 545-554.
- LI G H, ZHANG Y P, HU K L. Modeling the effect of rainfall and irrigation on nitrate leaching and crop yield in wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(3): 545-554.
- [49] 张亦涛, 王洪媛, 雷秋良, 等. 农田合理施氮量的推荐方法[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(15): 117-127.
- ZHANG Y T, WANG H Y, LEI Q L, et al. Recommended methods for optimal nitrogen application rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(15): 117-127.