

薛志伟,陈 杰,郭海斌,等. 基于主成分和相关分析的土壤肥力和小麦籽粒营养元素综合评价[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):210-218.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.027

基于主成分和相关分析的土壤肥力和小麦籽粒营养元素综合评价

薛志伟¹, 陈 杰², 郭海斌², 贡 超¹, 杨春玲¹

(1. 安阳市农业科学院, 河南安阳 455000; 2. 驻马店市农业科学院, 河南驻马店 463000)

摘要:河南省为我国重要的小麦种植区,研究其土壤肥力和小麦籽粒营养含量状况,能够为农田土壤培肥管理和科学施肥提供理论依据。通过采集和检验分析 2020—2022 年安阳市和驻马店市典型农田土壤和小麦籽粒样品,测定土壤肥力指标(pH 值、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾)和小麦籽粒的营养元素(氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌、硼、钼、硒)含量,运用主成分和相关分析方法,综合客观评价农田土壤肥力水平和小麦籽粒的营养水平。结果表明,安阳市农田耕层土壤 pH 值平均值为 8.21,有机质和全氮平均含量分别为 22.77 g/kg 和 1.32 g/kg,硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾平均含量分别为 17.07、3.53、26.07、218.62 mg/kg;小麦籽粒营养元素氮、磷、钾、铁、锰、铜平均含量分别 22.16、3.57、4.15、35.24、36.56、3.35 g/kg,小麦籽粒钙、镁、硫、锌、硼、钼、硒平均含量分别为 406.73、1 220.60、1 616.40、25.80、0.66、0.46、0.03 mg/kg。驻马店市耕层土壤 pH 值平均值为 5.28,有机质和全氮平均含量分别为 21.36、1.35 g/kg,硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾平均含量分别为 33.27、28.80、60.33、259.49 mg/kg;小麦籽粒营养元素氮、磷、钾、铁、锰、铜平均含量分别 22.31、3.67、4.33、38.97、60.33、4.16 g/kg,小麦籽粒钙、镁、硫、锌、硼、钼、硒平均含量分别为 355.13、1 141.73、1 529.60、29.85、0.63、0.18、0.02 mg/kg。总体观察,安阳市农田土壤偏碱性,速效钾含量年际间均值变化幅度很大;驻马店市农田土壤偏酸性,硝态氮、铵态氮含量年际间变化幅度很大。安阳市小麦籽粒营养元素氮、磷、钾、铁、锰、铜、锌含量水平低于驻马店市小麦籽粒水平,钙、镁、硫、硼、钼、硒含量水平高于驻马店市小麦籽粒水平,小麦籽粒营养元素含量年际间变化幅度很小。采用主成分分析将土壤肥力指标提取为 2 个主成分,第 1 主成分以硝态氮、铵态氮、速效磷贡献大,pH 值载荷较高但为负向影响;第 2 主成分以有机质、全氮、速效钾贡献大。采用主成分分析将小麦籽粒营养元素指标提取为 4 个主成分,第 1 主成分以铁、锰、铜、锌、钼元素贡献大,第 2 主成分以钙、硒元素贡献大,第 3 主成分以氮、磷、钾、镁、铁、钼元素贡献大,第 4 主成分以钾、硫、硼元素贡献大。相关性分析结果表明,农田土壤 pH 值降低会抑制小麦籽粒钙、镁、钼元素的吸收,促进小麦籽粒锰、铜元素的吸收;农田土壤肥力指标与小麦籽粒营养元素含量变化存在复杂的促进和抑制关系。

关键词:土壤肥力;小麦籽粒;营养元素;主成分分析;相关性分析

中图分类号: S512.106 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2025)08-0210-09

土壤作为作物的基本生存环境,在适宜的光、温、水、热情况下,氮、磷、钾等营养元素以一定的存在形态和数量,最终被作物生长发育吸收利用^[1-2]。土壤肥力具有较强的时空变异特性,肥力高低直接影响到植株的生产状况、作物产量和品质等^[3-4]。土壤肥力包括物理肥力、化学肥力和生物肥力^[5]。化学肥力是构成土壤肥力的核心要素,为作物生长

提供基本的营养环境^[6-7]。充分了解土壤肥力要素是合理调控土壤肥力和实施精准施肥的基础,对于改善农田管理,提高粮食综合生产能力具有重要意义。

自从 1840 年科学界提出植物营养元素以来,经过科学技术的发展和分析水平的提高,人们对植物矿质营养的认识越来越清晰明了^[8]。近年来,随着经济社会的发展和生活水平的提高,人们越来越多关注谷类作物中营养元素含量的变化。小麦作为中国第二大粮食作物,是我国居民的主要的口粮食物,同时也是营养价值最高、加工种类最多的粮食作物^[9-10]。小麦籽粒中含有多种矿质元素,包括氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)等常量元素和铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、硼

收稿日期:2024-03-11

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-3)。

作者简介:薛志伟(1987—),女,河南浚县人,硕士,助理研究员,主要从事小麦新品种选育和相关技术研究。E-mail:958303066@qq.com。

通信作者:杨春玲,研究员,主要从事小麦新品种选育和相关技术研究。E-mail:ay252935@163.com。

(B)、钼(Mo)、硒(Se)等微量元素,这些元素含量与小麦营养品质关系密切。

近年来,不少学者对河南省小麦玉米轮作区域土壤肥力和小麦籽粒养分进行了调查报道和试验研究^[11-14]。郭成士等分析了豫东潮土区 14 年长期定位试验农田土壤肥力和作物产量的监测数据,结果发现,耕作层土壤 pH 值无明显变化,有机质和土壤的氮磷钾含量总体变现逐渐增加,作物产量的增加幅度明显小于化肥投入量的增加幅度^[15]。刘站东等对豫北水浇地 62 个样点进行了抽样调查,发现作物产量与耕层土壤有机质、速效磷、速效钾含量均呈显著正相关关系,与深层土壤 pH 值为显著负相关关系^[16]。黄邵敏等依据 1991—2008 年大田施肥试验探索了河南省不同类型小麦氮、磷、钾的吸收和分配规律,结果发现,小麦植株吸收的氮和磷元素主要分配到籽粒中,且品种间差异较小^[17]。姜丽娜等对河南省 5 个地区 17 个小麦品种(系)籽粒中铁、锰、铜、锌含量进行调查分析,结果表明,小麦籽粒中营养元素含量与作物产量为正相关关系,在育种目标中可同步提高作物籽粒产量和营养元素含量^[18]。目前,基于多指标评价的方法已广泛应用于土壤肥力和小麦籽粒营养元素,像是较常用的相关分析法、聚类分析法、灰色关联度法、因子分析法等统计分析方法均使数据问题得到简化,提高了分析效率和准确性^[19-22]。主成分分析方法(PCA)可以对相关变量进行归类,采用少数几个综合变量替代多个原始变量,通过降低数据维度,消除多种共线性,提取主成分,在农作物数据分析中广受好评^[23-25]。

合理施肥是保证小麦高产的重要措施,土壤肥力水平状况可影响土壤供给能力和肥料利用率,小麦籽粒营养元素含量则在一定程度上可反映小麦植株对土壤中养分的吸收利用情况。目前,采用主成分和相关分析综合评价土壤肥力和小麦籽粒品质的研究鲜见报道,本研究以 2020—2022 年安阳市和驻马店市土壤肥力的常规指标和小麦籽粒的营养元素为研究对象,通过采集分析不同区域农田土壤 pH 值、有机质含量、全氮含量、硝态氮含量、铵态氮含量、速效磷含量、速效钾含量及小麦籽粒氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌、硼、钼、硒含量变化状况,采用主成分和相关分析综合评价农田土壤肥力水平和小麦籽粒的营养水平,以期因地制宜科学管理农田土壤资源,进一步提升土壤肥力管理水

平,进而为农业提质增效和可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点选取河南省安阳市和驻马店市不同县(区)的典型农田,两地作物种植模式均为冬小麦夏玉米一年两熟制。冬小麦于每年 9 月下旬到 10 月下旬播种,次年 5 月下旬到 6 月上旬收获。夏玉米于小麦收获后播种,同年 9 月下旬到 10 月上中旬收获。安阳市位于河南省北部,地处半湿润地区,属暖温带大陆性季风气候,四季分明、雨热同期,土壤类型主要为黄棕壤土。1981 年以来,年平均气温 14.3 ℃,年平均降水量 585.2 mm,年平均本站气压 1 005.2 hPa,年平均相对湿度 64%,年平均风速 2.2 m/s,年平均无霜期 219 d。驻马店市位于河南省南部,地处亚热带与暖温带的过渡地带,具有亚热带与暖温带的双重气候特征,是典型的大陆性季风型半湿润气候,阳光充足,四季分明,全市年平均气温为 14.7 ~ 15.0 ℃,年平均日照时数 1 900 ~ 2 100 h,年平均降水量为 850 ~ 980 mm。

1.2 样品采集和处理

本研究数据来源为国家现代农业小麦产业技术体系 2020—2022 年冬小麦收获时采集的土壤和籽粒样品。土壤样品:以小麦玉米轮作典型农田为采样区域,在每个地点采用混合 5 点采样法取表层 0 ~ 20 cm 的土壤,混合均匀成一个土壤样品,用四分法留取 1 000 g 作为土壤样品,去除作物秸秆、根系杂草等杂质,用自封袋保存,测定土壤基本理化性质。小麦籽粒样品:以小麦玉米轮作典型农田为采样区域,在每个地点采用混合 5 点随机采集约 100 穗的小麦整株,剪掉根系后将地上植株全部装入网袋中,测定小麦籽粒营养元素含量。土壤和小麦籽粒样品统一邮寄至西北农林科技大学资源环境学院进行整理和检测。

1.3 测定项目和方法

土壤和小麦籽粒样品的测定均采用常规的测定方法^[26-27]。土壤样品的测定项目为土壤 pH 值、有机质含量、全氮含量、硝态氮含量、铵态氮含量、速效磷含量、速效钾含量。小麦籽粒样品首先要进行手工脱粒、去除杂质和残缺籽粒,后称取 50 g 左右样品分别用自来水、蒸馏水快速漂洗 3 次,65 ℃烘干至恒重,接着用高通量组织研磨仪(Retsch MM 400,德国)、氧化锆研磨罐及研磨球磨细,装入自封

袋密封保存待用。测定项目为全氮、全磷、全钾、钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌、硼、钼、硒含量,其中氮和磷含量采用连续流动分析仪测定,钾含量用火焰光度计测定,钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌、硼、钼、硒含量采用 ICP-MS 分析测定。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据分析,采用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件进行数据相关性、聚类 and 主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同地区土壤肥力指标的变化分析

由表 1 可知,2020—2022 年安阳市研究区农田土壤 pH 值年际间变幅为 7.98~8.56,有机质含量年际间变幅为 11.17~36.80 g/kg,全氮含量年际间变幅为 0.71~2.00 g/kg,硝态氮含量年际间变幅为 6.90~51.00 mg/kg,铵态氮含量年际间变幅为 2.50~6.30 mg/kg,速效磷含量年际间变幅为 7.67~59.80 mg/kg,速效钾含量年际间变幅为 83.00~475.44 mg/kg,平均值分别为 8.21、22.77 g/kg、1.32 g/kg、17.07 mg/kg、3.53 mg/kg、26.07 mg/kg、218.62 mg/kg。安阳市农田土壤偏碱性,有机质、速效磷含量均值逐渐减少,全氮、铵态氮含量均值年际间变化很小,硝态氮含量均值逐渐增加,速效钾年际间均值变化幅度很大。驻马店市研究区农田土壤 pH 值年际间变幅为 4.57~6.73,有机质含量年际间变幅为 13.20~31.93 g/kg,全氮含量年际间变幅为 0.80~2.13 g/kg,硝态氮含量年际间变幅为 5.47~98.90 mg/kg,铵态氮含量年际间变幅为 5.10~112.70 mg/kg,速效磷含量年际间变幅为 18.00~114.95 mg/kg,速效钾含量年际间变幅为 85.86~542.10 mg/kg,平均值分别为 5.28、21.36 g/kg、1.35 g/kg、33.27 mg/kg、28.80 mg/kg、60.33 mg/kg、259.49 mg/kg。驻马店市农田土壤偏酸性,有机质、全氮、速效磷、速效钾含量均值逐渐减少,硝态氮、铵态氮含量年际间变化幅度很大。

由表 1 可知,2020—2022 年安阳市研究区农田土壤 pH 值的变异系数均 <10%,属于弱变异程度;硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾含量变异系数介于 10%~100%,属于中等变异程度,其中,硝态氮、速效磷、速效钾含量个别年份的变异系数 >60%。整体来看,相比 2020 年和 2021 年,2022 年安阳市土壤肥力指标除硝态氮和速效钾含量外的变异系数

均有所减少,说明这些指标变异程度均有所降低。驻马店市研究区农田土壤 2020 年 pH 值和有机质含量的变异系数小于 10%,属于弱变异程度;2021 年硝态氮的变异系数为 101.35%,属于强变异程度;其余变异系数介于 10%~100%,属于中等变异程度。整体来看,相比 2021 年,2022 年安阳市土壤肥力指标中有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、速效钾含量的变异系数均有所减少,说明各指标程度均有所降低。

2.2 不同地区小麦籽粒常量营养元素的变化分析

与土壤肥力指标相比,小麦籽粒各营养元素含量的分析可直接反映出小麦植株对土壤和肥料养分的吸收利用情况。由表 2 可知,安阳市研究区农田小麦籽粒常量元素氮、磷、钾含量范围分别为 16.51~24.57、2.75~4.25、3.59~5.11 g/kg,氮、磷、钾平均含量分别为 22.16、3.57、4.15 g/kg。钙、镁、硫含量范围分别为 320~525、1 069~1 440、1 048~1 815 mg/kg,钙、镁、硫平均含量分别为 406.73、1 220.60、1 616.40 mg/kg。驻马店市研究区农田小麦籽粒常量元素氮、磷、钾含量范围分别为 19.98~24.00、2.26~5.00、3.09~5.60 g/kg,氮、磷、钾平均含量分别为 22.31、3.67、4.33 g/kg。钙、镁、硫含量范围分别为 300~430、940~1 350、1 220~11 806 mg/kg,钙、镁、硫平均含量分别为 355.13、1 141.73、1 529.60 mg/kg。

2.3 不同地区小麦籽粒微量营养元素的变化分析

微量元素是冬小麦生长发育必需的营养元素,小麦籽粒微量营养元素含量水平与小麦籽粒营养品质关系密切。由表 3 可知,安阳市研究区农田小麦籽粒微量元素铁、锰、铜、锌、硼、钼、硒含量范围分别为 26.77~45.25 g/kg、24.39~46.45 g/kg、2.22~46.45 g/kg、17.47~39.26 mg/kg、0.30~0.94 mg/kg、0.32~0.62 mg/kg、0.02~0.10 mg/kg,平均含量分别为 35.24 g/kg、36.56 g/kg、3.35 g/kg、25.080 mg/kg、0.66 mg/kg、0.46 mg/kg、0.03 mg/kg。驻马店市研究区农田小麦籽粒微量元素铁、锰、铜、锌、硼、钼、硒含量范围分别为 27.58~48.53 g/kg、30.09~89.92 g/kg、2.84~5.53 g/kg、21.13~39.40 mg/kg、0.49~0.80 mg/kg、0.03~0.46 mg/kg、0.01~0.04 mg/kg,平均含量分别为 38.97 g/kg、60.33 g/kg、4.16 g/kg、29.85 mg/kg、0.63 mg/kg、0.18 mg/kg、0.02 mg/kg。

2.4 土壤肥力指标的主成分分析

将对土壤肥力指标的 7 个元素进行主成分分

表 1 土壤肥力指标的描述性统计

年份 (年)	地区	指标	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)	铵态氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
2020	安阳	范围	8.22~8.56	18.80~36.80	1.00~2.00	6.90~14.70	2.90~6.30	14.60~59.80	112.80~264.60
		平均值±标准差	8.40±0.14	23.64±7.50	1.30±0.41	9.00±3.27	3.68±1.47	28.66±18.17	174.14±57.66
		变异系数(%)	1.61	31.71	31.25	36.36	40.05	63.41	33.11
	驻马店	范围	4.57~5.52	25.30~29.10	1.50~2.00	16.90~98.90	26.70~112.70	38.90~107.90	255.60~542.10
		平均值±标准差	4.95±0.38	26.58±1.49	1.76±0.23	55.08±31.11	67.04±39.89	66.40±30.70	391.51±131.50
		变异系数(%)	7.69	5.59	13.08	56.49	59.50	46.23	33.59
2021	安阳	范围	7.98~8.23	11.17~26.2	0.71~1.62	7.02~26.18	2.64~4.78	7.67~48.24	149.27~475.44
		平均值±标准差	8.11±0.11	21.74±6.20	1.30±0.36	16.75±9.56	3.75±0.90	25.16±18.24	276.75±132.28
		变异系数(%)	1.37	28.53	27.44	57.05	24.04	72.51	47.80
	驻马店	范围	4.66~6.19	17.67~31.93	1.00~2.13	5.47~49.77	5.28~20.48	33.92~114.95	85.86~380.16
		平均值±标准差	5.14±0.62	21.95±5.78	1.34±0.47	18.12±18.36	9.56±6.30	64.86±31.05	209.16±125.57
		变异系数(%)	11.96	26.32	34.78	101.35	65.91	47.87	60.03
2022	安阳	范围	8.03~8.28	20.30~25.90	1.30~1.40	7.70~51.00	2.50~3.70	14.40~32.70	83.00~361.50
		平均值±标准差	8.13±0.09	22.94±2.23	1.36±0.05	25.46±21.67	3.16±0.47	24.38±6.66	204.98±124.02
		变异系数(%)	1.13	9.73	4.03	85.11	14.78	27.33	60.50
	驻马店	范围	4.99~6.73	13.20~21.00	0.80~1.20	8.60~62.90	5.10~15.10	18.00~92.30	103.60~309.30
		平均值±标准差	5.76±0.76	15.54±3.15	0.94±0.15	26.62±21.97	9.80±4.20	49.72±26.94	177.80±83.55
		变异系数(%)	13.16	20.24	16.13	82.54	42.85	54.19	46.99

表 2 小麦籽粒常量营养元素的描述性统计

年份 (年)	地区	指标	N 含量 (g/kg)	P 含量 (g/kg)	K 含量 (g/kg)	Ca 含量 (mg/kg)	Mg 含量 (mg/kg)	S 含量 (mg/kg)
2020	安阳	范围	22.03~24.57	3.35~4.18	3.69~4.73	320.00~374.00	1 141.00~1 440.00	1 617.00~1 815.00
		平均值±标准差	23.30±1.17	3.79±0.31	3.99±0.42	352.80±23.19	1 264.80±120.51	1 688.40±80.15
		变异系数(%)	5.04	8.06	10.54	6.57	9.53	4.75
	驻马店	范围	21.11~23.19	3.11~4.15	3.09~4.18	306.00~387.00	1 042.00~1 191.00	1 459.00~1 806.00
		平均值±标准差	21.98±0.75	3.66±0.43	3.79±0.42	345.40±34.98	1 149.20±61.27	1 643.00±124.44
		变异系数(%)	3.43	11.83	11.14	10.13	5.33	7.57
2021	安阳	范围	16.51~23.92	2.75~4.25	3.82~5.11	327.00~525.00	1 069.00~1 315.00	1 048.00~1 734.00
		平均值±标准差	21.09±2.88	3.46±0.54	4.38±0.51	425.40±70.651	169±96.57	1 428.80±255.47
		变异系数(%)	13.67	15.71	11.60	16.61	8.26	17.88
	驻马店	范围	22.70~24.24	3.33~5.00	4.36~5.60	309.00~370.00	1 045.00~1 350.00	1 220.00~1 335.00
		平均值±标准差	23.40±0.68	4.09±0.64	4.97±0.58	342.00±27.76	1 168.00±122.71	1 277.80±49.51
		变异系数(%)	2.91	15.67	11.67	8.12	10.51	3.87
2022	安阳	范围	19.60~24.54	3.10~3.94	3.59~4.44	390.00~500.00	1 180.00~1 270.00	1 650.00~1 810.00
		平均值±标准差	22.08±1.78	3.44±0.33	4.08±0.32	442.00±46.04	1 228.00±38.34	1 732.00±74.30
		变异系数(%)	8.05	9.50	7.94	10.42	3.12	4.29
	驻马店	范围	19.98~23.08	2.26~4.06	3.66~4.51	300.00~430.00	940.00~1 190.00	1 600.00~1 770.00
		平均值±标准差	21.56±1.13	3.27±0.72	4.22±0.37	378.00±48.17	1 108.00±103.05	1 668.00±71.55
		变异系数(%)	5.26	21.91	8.75	12.74	9.30	4.29

析,根据特征值 $\lambda \geq 1$ 的原则,提取了 2 个主成分(表 4),特征值分别为 3.816 和 1.506,方差贡献率分别为 54.517% 和 21.515%,2 个主成分累积方差

贡献率为 76.032%,基本能反映土壤肥力的基本信息。因此,选用前 2 个具有代表性的主成分对土壤肥力进行综合性分析。由表 5 可知,在第 1 主成分

表 3 小麦籽粒微量营养元素的描述性统计

年份 (年)	地区	指标	Fe 含量 (g/kg)	Mn 含量 (g/kg)	Cu 含量 (g/kg)	Zn 含量 (mg/kg)	B 含量 (mg/kg)	Mo 含量 (mg/kg)	Se 含量 (mg/kg)
2020	安阳	范围	36.16 ~ 44.51	29.69 ~ 45.74	3.07 ~ 3.66	17.65 ~ 39.26	0.64 ~ 0.94	0.37 ~ 0.62	0.02 ~ 0.04
		平均值 ± 标准差	39.20 ± 3.17	38.95 ± 5.90	3.37 ± 0.21	27.60 ± 8.99	0.81 ± 0.13	0.47 ± 0.10	0.03 ± 0.01
		变异系数(%)	8.09	15.16	6.28	33.10	15.38	21.86	41.07
	驻马店	范围	39.30 ~ 46.35	65.27 ~ 69.63	4.17 ~ 5.53	30.68 ~ 39.40	0.62 ~ 0.80	0.03 ~ 0.09	0.01 ~ 0.04
		平均值 ± 标准差	42.93 ± 2.56	67.56 ± 1.66	4.70 ± 0.53	34.15 ± 3.33	0.71 ± 0.08	0.06 ± 0.02	0.02 ± 0.01
		变异系数(%)	5.96	2.45	11.27	9.74	11.75	39.13	37.75
2021	安阳	范围	31.36 ~ 45.25	31.73 ~ 46.45	3.16 ~ 5.38	20.47 ~ 32.77	0.55 ~ 0.71	0.39 ~ 0.54	0.02 ~ 0.07
		平均值 ± 标准差	37.39 ± 5.32	38.14 ± 6.02	3.92 ± 0.89	25.55 ± 6.43	0.61 ± 0.06	0.47 ± 0.06	0.04 ± 0.02
		变异系数(%)	14.22	15.80	22.79	25.16	9.95	13.06	54.06
	驻马店	范围	37.06 ~ 48.53	33.18 ~ 89.92	3.47 ~ 5.36	21.13 ~ 33.89	0.49 ~ 0.67	0.03 ~ 0.41	0.01 ~ 0.03
		平均值 ± 标准差	42.41 ± 4.36	68.75 ± 22.11	4.48 ± 0.69	28.11 ± 5.54	0.57 ± 0.07	0.19 ± 0.15	0.02 ± 0.01
		变异系数(%)	10.28	32.15	15.34	19.41	11.44	82.12	33.46
2022	安阳	范围	26.77 ~ 31.77	24.39 ~ 37.61	2.22 ~ 3.30	17.47 ~ 33.09	0.30 ~ 0.67	0.32 ~ 0.54	0.02 ~ 0.10
		平均值 ± 标准差	29.14 ± 2.01	32.58 ± 4.95	2.77 ± 0.49	24.67 ± 5.79	0.55 ± 0.14	0.44 ± 0.10	0.04 ± 0.03
		变异系数(%)	6.90	15.20	17.76	23.47	26.25	21.52	84.78
	驻马店	范围	27.58 ~ 40.51	30.09 ~ 71.64	2.84 ~ 3.65	23.04 ~ 31.63	0.52 ~ 0.73	0.06 ~ 0.46	0.01 ~ 0.02
		平均值 ± 标准差	31.57 ± 5.31	44.68 ± 16.51	3.29 ± 0.41	27.29 ± 3.31	0.60 ± 0.29	0.29 ± 0.17	0.02 ± 0.00
		变异系数(%)	16.83	36.94	12.33	12.14	14.04	58.84	24.84

表 4 土壤肥力指标主成分分析解释总方差

主成分	特征值	初始特征值	
		贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	3.816	54.517	54.517
2	1.506	21.515	76.032
3	0.731	10.436	86.468
4	0.413	5.898	92.366
5	0.307	4.384	96.750
6	0.193	2.754	99.504
7	0.035	0.496	100.000

表 5 土壤肥力指标主成分分析旋转后的载荷矩阵

指标	载荷	
	成分 1	成分 2
pH 值	-0.858	0.188
有机质含量	-0.003	0.940
全氮含量	0.256	0.934
硝态氮含量	0.712	0.332
铵态氮含量	0.779	0.426
速效磷含量	0.786	0.239
速效钾含量	0.506	0.627

中硝态氮、铵态氮、速效磷含量载荷较高,其载荷值分别为 0.712、0.779、0.786,与第 1 主成分呈高度正相关,pH 值载荷(-0.858)绝对值较高,但有负

向影响;第 2 主成分中有机质、全氮、速效钾含量载荷较高且有正向影响,其载荷值分别为 0.940、0.934、0.627,pH 值载荷值相对较低(0.188),但有正向影响。

2.5 小麦籽粒营养元素指标的主成分分析

将对小麦籽粒营养元素指标的 13 个元素进行主成分分析,根据特征值 $\lambda \geq 1$ 的原则,提取了 4 个主成分,由表 6 可知,特征值分别为 3.693、2.462、2.039、1.516,方差贡献率分别为 28.407%、18.941%、15.686%、11.663%,4 个主成分累积方差贡献率为 74.697%,基本能反映小麦籽粒营养元素的基本信息。因此,选用前 4 个具有代表性的主成分对小麦籽粒营养元素含量进行综合性分析。由表 7 可知,在第 1 主成分中铁、锰、铜、锌含量载荷较高,其载荷值分别为 0.677、0.816、0.899、0.661,与第 1 主成分成高度正相关,钼元素含量载荷(-0.687)绝对值较高,呈负向影响;第 2 主成分中钙、硒元素载荷较高且有正向影响,其载荷值分别为 0.815、0.827;第 3 主成分中氮、磷、钾、镁、铁、钼元素载荷较高且有正向影响,其载荷值分别为 0.519、0.712、0.387、0.791、0.470、0.445;第 4 主成分中硫、硼元素载荷较高且有正向影响,其载荷值分别为 0.658、0.758,钾元素含量载荷(-0.835)绝

表 6 小麦籽粒营养元素指标主成分分析解释总方差

主成分	特征值	初始特征值	
		贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	3.693	28.407	28.407
2	2.462	18.941	47.348
3	2.039	15.686	63.034
4	1.516	11.663	74.697
5	0.818	6.296	80.993
6	0.617	4.744	85.737
7	0.500	3.849	89.586
8	0.391	3.010	92.596
9	0.310	2.388	94.984
10	0.242	1.863	96.847
11	0.156	1.203	98.050
12	0.146	1.124	99.174
13	0.107	0.827	100.001

表 7 小麦籽粒营养元素指标主成分分析旋转后的载荷矩阵

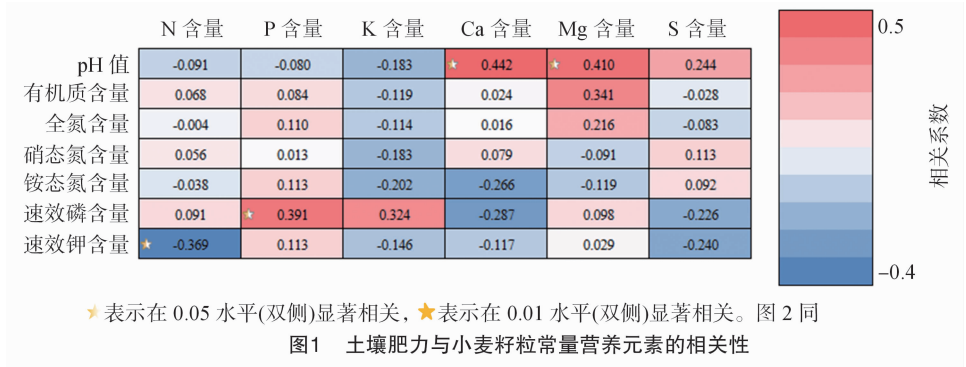
指标	载荷			
	成分 1	成分 2	成分 3	成分 4
N	0.446	0.455	0.519	0.069
P	0.241	-0.168	0.712	-0.415
K	0.067	-0.021	0.387	-0.835
Ca	-0.304	0.815	-0.085	-0.007
Mg	-0.204	0.169	0.791	0.131
S	-0.158	0.434	0.032	0.658
Fe	0.677	-0.280	0.470	0.015
Mn	0.816	-0.264	-0.066	-0.192
Cu	0.899	0.072	0.059	-0.168
Zn	0.661	0.209	0.071	0.388
B	0.058	-0.239	0.385	0.758
Mo	-0.687	0.323	0.445	0.084
Se	0.063	0.827	0.123	0.057

对值较高,呈负向影响。

2.6 土壤肥力与小麦籽粒营养元素的相关性分析

由图 1 可知,2020—2022 年研究区农田土壤 pH 值与小麦籽粒钙、镁、硫含量呈正相关关系,其中,与钙含量相关性显著,与小麦籽粒氮、磷、钾含量呈负相关关系;土壤有机质含量与小麦籽粒氮、磷、钙、镁含量呈正相关关系,与钾、硫含量呈负相关关系;土壤全氮含量与小麦籽粒磷、钙、镁含量呈正相关关系,与氮、钾、硫含量呈负相关关系;土壤

硝态氮含量与小麦籽粒氮、磷、钙、硫含量呈正相关关系,与钾、镁含量呈负相关关系;土壤铵态氮含量与小麦籽粒磷、硫含量呈正相关关系,与氮、钾、钙、镁含量呈负相关关系;土壤速效磷含量与小麦籽粒氮、磷、钾、镁含量呈正相关关系,其中与磷含量相关性显著,与钙、硫含量呈负相关关系;土壤速效钾含量与小麦籽粒磷、镁含量呈正相关关系,与氮、钾、钙、硫呈负相关关系,其中与氮含量相关性显著。



由图 2 可知,2020—2022 年研究区农田土壤 pH 值与小麦籽粒钼含量呈极显著正相关关系,与小麦籽粒锰、铜含量均呈极显著负相关关系。土壤有机质含量与小麦籽粒钼含量呈负相关关系,与其他元素含量呈正相关关系。土壤全氮含量与小麦籽粒铁、铜含量呈显著正相关关系,与小麦籽粒钼含量呈负相关关系。土壤硝态氮含量与小麦籽粒铜、锌含量呈显著正相关关系,与小麦籽粒钼含量呈显著负相关关系。土壤铵态氮含量与小麦籽粒锰、

铜、锌含量呈显著或极显著的正相关关系,与小麦籽粒钼含量呈极显著的负相关关系。土壤速效磷含量与小麦籽粒锰、铜含量呈显著或极显著的正相关关系,与小麦籽粒钼含量呈显著的负相关关系。土壤速效钾与小麦籽粒铁、锰、铜、锌呈正相关关系,与其他指标呈负相关关系。

3 讨论

有研究表明,有机质和氮、磷、钾含量一直均是

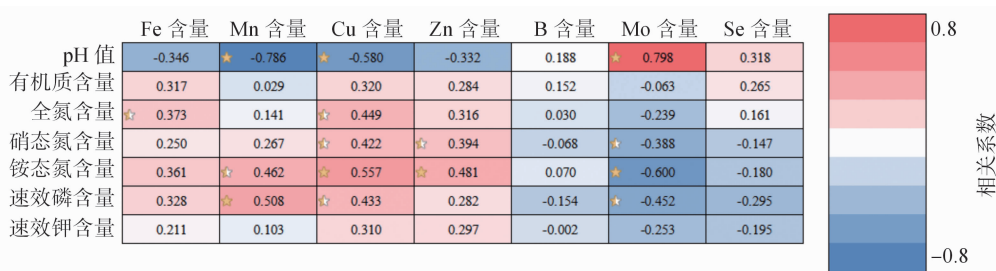


图2 土壤肥力与小麦籽粒微量营养元素的相关性

土壤肥力评价的重要因素^[28]。其中,土壤 pH 值为土壤形成过程中受多种因素综合影响产生的特殊属性,是土壤肥力和质量的重要指标。本研究中,安阳市农田耕层土壤 pH 值平均值为 8.21,驻马店市耕层土壤 pH 值平均值为 5.28,pH 值年际间变异程度低,与杨帆等的研究结果^[29]一致。土壤有机质包括土壤中各种形态含碳的有机质,是衡量土壤肥力最为重要的指标。本研究中,安阳市和驻马店市农田耕层土壤有机质均值分别为 22.77、21.36 g/kg,分别比全省平均含量高 3.57、2.16 g/kg^[30]。土壤全氮含量在一定程度上可以说明土壤氮的供应能力。本研究中,2020—2022 年安阳市和驻马店市农田耕层土壤全氮均值分别为 1.32、1.35 g/kg,分别比全省平均含量高 0.14、0.17 g/kg^[30]。土壤速效磷和速效钾指能够被植物吸收利用的水溶性磷和钾,可以判定土壤中磷和钾的供应能力,是磷、钾肥料施用量的重要指标。本研究中,安阳市和驻马店市农田耕层土壤速效磷均值分别为 26.07、60.33 mg/kg,速效钾均值分别为 218.62、259.49 mg/kg,远远超过全省平均水平,根据分级标准评价处于丰富水平^[30-31]。根据吴良泉针对河南省的小麦区域划分中,安阳市属于华北灌溉麦区、驻马店市属于华北雨养麦区^[32]。Ju 等对华北地区农业土壤氮素的研究表明,华北地区作为我国小麦高产区,土壤具有较强的氮硝化作用,导致耕地土壤中硝态氮长存在一定程度的积累,尤其是农田气候降雨会造成铵态氮或者尿素氮肥极易转化为硝态氮,这也可以侧面解释安阳市(17.07 g/kg)和驻马店市(33.27 g/kg)农田耕层土壤硝态氮含量均值出现的明显差异的原因^[33]。本研究在调查研究的过程中发现河南省农民常规施肥普遍中存在明显的施肥过量现象,如底肥一次性施用过多的现象普遍存在,致使肥料浪费严重,肥料利用率低。黄倩楠等对我国主要麦区农户小麦产量和养分需求调研和取样分析,发现各地区存在明显差异,总的来说,随着产量的增加,小

麦氮、磷、钾的养分需求量呈降低趋势^[34]。因此,本研究 2 个研究区农田肥力水平研究结果的差异可能是由于不同区域的种植品种和产量水平不同,氮、磷、钾吸收规律存在一定差异,且不同地区施肥量的差异极有可能对单位经济产量造成影响。

小麦在中国食品消费占有重要的地位,因此提高其籽粒中营养元素含量对小麦品质育种和提高居民健康具有重要意义^[35-36]。本研究中,安阳市农田小麦籽粒中常量营养元素氮、磷、钾含量均值分别为 22.16、3.57、4.15 g/kg,钙、镁、硫含量均值分别为 406.73、1 220.60、1 616.40 mg/kg,微量营养元素铁、锰、铜均值分别为 35.24、36.56、3.35 g/kg,锌、硼、钼、硒含量均值分别为 25.80、0.66、0.46、0.03 mg/kg;驻马店市农田小麦籽粒中常量营养元素氮、磷、钾含量均值分别为 22.31、3.67、4.33 g/kg,钙、镁、硫含量均值分别为 355.13、1 141.73、1 529.60 mg/kg,微量营养元素铁、锰、铜均值分别为 38.97、60.33、4.16 g/kg,锌、硼、钼、硒含量均值分别为 29.85、0.63、0.18、0.02 mg/kg。参照褚宏欣等推荐的小麦籽粒微量元素含量范围以及对我国主要麦区小麦籽粒微量元素含量的调查研究,发现 2 个研究区农田小麦籽粒铁、锰、铜含量丰富,锌、硼、钼含量较为匮乏^[37]。整体比较发现,安阳市和驻马店市作为灌溉麦区和雨养麦区农田小麦籽粒常量和微量营养元素含量存在一定差异且年际间变异系数中等,安阳市农田小麦籽粒中营养元素氮、磷、钾、铁、锰、铜、锌含量均值低于驻马店市农田小麦籽粒中元素含量均值,营养元素钙、镁、硫、硼、钼、硒含量均值高于驻马店市农田小麦籽粒中元素含量均值。这与王丽等的研究结果^[38]相似,发现土壤肥力和降水量差异会引起小麦籽粒营养元素吸收增减的变化。常旭虹等的研究同样发现,小麦籽粒中微量元素的含量受生态环境、栽培环境和品种的遗传特性等多因素的共同作用,其中生态环境差异越大,对小麦微量元素的吸收影响越大^[39]。

目前,我国耕地面积总体呈逐年下降趋势,农田土壤污染和质量下降问题日趋严重,污染农田的修复以及部分污染农田的产地环境质量安全、粮食安全和农产品质量安全已经是学术界研究的热点和难点^[40-41]。微量元素摄入过量或不足均会对人体健康造成潜在的危害^[37]。因此,如何在以小麦为主食的人们既不会出现隐性饥饿也不会有微量元素过量的风险中寻找作物产量和营养品质的平衡点,是目前要面临的一个难题。

本研究将农田土壤肥力指标与小麦籽粒营养元素含量进行相关性分析,结果发现农田土壤肥力指标与小麦籽粒营养元素含量变化存在复杂的促进和抑制关系。农田土壤 pH 值降低会抑制小麦籽粒钙、镁、钼元素的吸收,促进小麦籽粒锰、铜元素的吸收;土壤有机质和硝态氮含量的增加可促进小麦籽粒氮和磷元素的增加,会抑制小麦籽粒钾含量的增加;全氮和铵态氮含量的增加会促进小麦籽粒磷元素含量的增加,会抑制小麦籽粒氮和钾含量的增加;土壤速效磷含量的增加会促进小麦籽粒氮、磷、钾元素含量增加;土壤速效钾含量的增加会促进小麦籽粒磷元素含量的增加,抑制小麦籽粒氮和钾元素含量的增加。马悦等的研究则发现,在中国北方麦区土壤速效磷和钾含量在合理范围内,适量施肥可以提高小麦籽粒氮含量^[42]。本研究区土壤速效钾含量远超平均水平,因此 2 个研究区在农田管理措施中应合理确定磷钾肥的用量,以实现小麦的丰产高效生产。

氮肥作为农业生产中最常用也是用量最大的肥料,可以显著提高作物籽粒产量,改善农产品的质量。大量的研究已经证实,施氮量不仅影响土壤肥力,还可改善小麦籽粒营养元素的吸收和品质。Xia 等设置了 4 种氮肥水平和 6 种轮作体系,发现施氮水平对土壤肥力和小麦籽粒矿质营养含量影响显著,将小麦季氮肥用量适当降低,不会损失籽粒产量和大多数矿质营养含量^[43]。蔺江韵等设置的长期定位试验通过设置 5 个的施氮肥水平,发现长期施氮显著降低了土壤 pH 值,显著提高小麦籽粒铁含量,降低小麦籽粒锰含量,但过量施氮对提高小麦籽粒产量和品质无益^[44]。马瑞琦等通过逐年精准缩小施氮量梯度,探明小麦籽粒产量与品质协同稳定的适宜施氮量,发现在 0 ~ 240 kg/hm² 范围内,施用氮肥可以实现小麦产量三要素协调发展,显著提高籽粒产量;不同年份之间,随着施氮量

的增加,大部分品质指标会提高^[45]。因此,施用氮肥完全可以弥补生态环境或者作物品种造成的小麦籽粒营养元素吸收的差异,适宜的栽培环境对于实现小麦的高产高效栽培管理和微量元素营养的协同发展具有明显的效果。

4 结论

安阳市农田耕层土壤 pH 值介于 7.98 ~ 8.56,有机质和全氮平均含量分别为 22.77、1.32 g/kg,硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾平均含量分别为 17.07、3.53、26.07、218.62 mg/kg;小麦籽粒营养元素氮、磷、钾、铁、锰、铜平均含量分别为 22.16、3.57、4.15、35.24、36.56、3.35 g/kg,小麦籽粒钙、镁、硫、锌、硼、钼、硒平均含量分别为 406.73、1 220.60、1 616.40、25.80、0.66、0.46、0.03 mg/kg。驻马店市耕层土壤 pH 值介于 4.57 ~ 6.73,有机质和全氮平均含量分别为 21.36、1.35 g/kg,硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾平均含量分别为 33.27、28.80、60.33、259.49 mg/kg;小麦籽粒营养元素氮、磷、钾、铁、锰、铜平均含量分别为 22.31、3.67、4.33、38.97、60.33、4.16 g/kg,小麦籽粒钙、镁、硫、锌、硼、钼、硒平均含量分别为 355.13、1 141.73、1 529.60、29.85、0.63、0.18、0.02 mg/kg。采用主成分分析法分析土壤肥力指标,第 1 主成分以硝态氮、铵态氮、速效磷贡献大,pH 值载荷较高但为负向影响;第 2 主成分以有机质、全氮、速效钾贡献大。采用主成分分析法分析小麦籽粒营养元素,第 1 主成分以铁、锰、铜、锌、钼元素贡献大,第 2 主成分以钙、硒元素贡献大,第 3 主成分以氮、磷、钾、镁、铁、钼元素贡献大,第 4 主成分以钾、硫、硼元素贡献大。农田土壤肥力指标与小麦籽粒营养元素含量变化存在复杂的促进和抑制关系。

参考文献:

- [1] 赵伟霞,栗岩峰,张宝忠,等. 土壤肥力提升原理与技术研究进展[J]. 灌溉排水学报,2022,41(9):1-5.
- [2] 骆东奇,白洁,谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境,2002,11(2):202-205.
- [3] 孙波,潘贤章,王德建,等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤肥力时空演变的影响[J]. 地球科学进展,2008,23(11):1201-1208.
- [4] Yang H S. Resource management, soil fertility and sustainable crop production: experiences of China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 116(1/2): 27-33.
- [5] 林卡,李德成,张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析[J]. 土壤

- 通报,2017,48(3):736-744.
- [6]于天仁. 从土壤的化学性质看土壤肥力[J]. 土壤通报,1963(3):1-8.
- [7]黄东风,王利民,李卫华,等. 培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展[J]. 中国生态农业学报,2014,22(2):127-135.
- [8]白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3477-3492.
- [9]张勇,郝元峰,张艳,等. 小麦营养和健康品质研究进展[J]. 中国农业科学,2016,49(22):4284-4298.
- [10]Zhang Y, Song Q C, Yan J, et al. Mineral element concentrations in grains of Chinese wheat cultivars[J]. Euphytica, 2010, 174(3):303-313.
- [11]赵刚,吴会军,张永清,等. 豫西长期不同耕作下土壤肥力质量评价[J]. 中国土壤与肥料,2023(6):1-11.
- [12]徐晓峰,刘迪,付森林,等. 小麦玉米轮作体系农田土壤有机氮组分对施氮量的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(4):628-639.
- [13]夏瑞雪,魏帅,郭波莉,等. 豫北地区小麦籽粒矿质元素含量分析[J]. 核农学报,2017,31(3):516-523.
- [14]马红艳,聂兆君,刘红恩,等. 施氮量和施磷方式对冬小麦产量和籽粒矿质元素积累的影响[J]. 河南农业科学,2022,51(5):10-22.
- [15]郭成士,谢坤,丁大伟,等. 豫东潮土区近 14 年土壤肥力和作物产量的演变及其对施肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(7):1290-1299.
- [16]刘战东,张凯,米兆荣,等. 豫北潮土灌区土壤肥力特征与作物产量的关系研究[J]. 灌溉排水学报,2019,38(8):31-37.
- [17]黄绍敏,宝德俊,郭斗斗,等. 河南省不同类型小麦养分吸收分配规律[J]. 河南农业科学,2011,40(11):30-34.
- [18]姜丽娜,蒿宝珍,张黛静,等. 小麦籽粒 Zn、Fe、Mn、Cu 含量的基因型和环境差异及与产量关系的研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(5):982-987.
- [19]张勇,王德森,张艳,等. 北方冬麦区小麦品种籽粒主要矿物质元素含量分布及其相关性分析[J]. 中国农业科学,2007,40(9):1871-1876.
- [20]郝志,田纪春,姜小苓. 小麦主要亲缘种籽粒的 Fe、Zn、Cu、Mn 含量及其聚类分析[J]. 作物学报,2007,33(11):1834-1839.
- [21]李国强,冯晓,郑国清,等. 基于改进灰色关联模型的土壤肥力综合评价[J]. 河南农业科学,2013,42(4):71-74.
- [22]谭小梅,耿养会,蒋宣斌,等. 基于因子分析法的汝溪河流域不同植被类型土壤肥力评价[J]. 江西农业学报,2014,26(5):14-18.
- [23]李民军,杜健. 基于主成分分析和聚类分析的刚察县耕地土壤肥力综合评价[J]. 中国农学通报,2023,39(26):51-59.
- [24]任晓琴,文昊,薛晓琦,等. 基于主成分分析的 10 个葡萄品种果实营养成分比较[J]. 天津农学院学报,2022,29(4):13-16.
- [25]宋晓,张珂珂,黄晨晨,等. 基于主成分分析的氮高效小麦品种的筛选[J]. 河南农业科学,2020,49(12):10-16.
- [26]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000:146-195,308-336.
- [27]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [28]Shang Q Y, Ling N, Feng X M, et al. Soil fertility and its significance to crop productivity and sustainability in typical agroecosystem: a summary of long-term fertilizer experiments in China[J]. Plant and Soil, 2014, 381(1):13-23.
- [29]杨帆,贾伟,杨宁,等. 近 30 年我国不同地区农田耕层土壤的 pH 值变化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(7):1213-1227.
- [30]河南省农业农村厅. 河南省耕地质量建设保护情况报告[J]. 中国农业综合开发,2022(1):20-22.
- [31]赵亚南,徐霞,孙笑梅,等. 基于 GIS 的河南省不同区域小麦氮磷钾推荐量与施肥配方[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(6):938-948.
- [32]吴良泉. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2014:28-29.
- [33]Ju X T, Zhang C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China: a review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12):2848-2862.
- [34]黄倩楠,王朝辉,黄婷苗,等. 中国主要麦区农户小麦氮磷钾养分需求与产量的关系[J]. 中国农业科学,2018,51(14):2722-2734.
- [35]王健胜,吴政卿,周正富,等. 国内外小麦种质主要矿物质元素含量的评价分析[J]. 分子植物育种,2018,16(22):7550-7557.
- [36]刘锐,刘晶晶,钟钰,等. 中国小麦国际竞争力分析[J]. 麦类作物学报,2022,42(9):1087-1098.
- [37]褚宏欣,牟文燕,党海燕,等. 我国主要麦区小麦籽粒微量元素含量及营养评价[J]. 作物学报,2022,48(11):2853-2865.
- [38]王丽,王朝辉,郭子糠,等. 黄土高原不同地点小麦籽粒矿物质元素的含量差异[J]. 中国农业科学,2020,53(17):3527-3540.
- [39]常旭虹,赵广才,王德梅,等. 生态环境与施氮量协同对小麦籽粒微量元素含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):885-895.
- [40]张鸣. 农业农村环境污染治理的有效对策[J]. 资源节约与环保,2023(3):106-109.
- [41]吴江. 农田污染土壤治理及安全利用[J]. 中国资源综合利用,2021,39(1):76-78.
- [42]马悦,田怡,牟文燕,等. 北方麦区小麦产量与籽粒氮磷钾含量对监控施钾和土壤速效钾的响应[J]. 中国农业科学,2022,55(16):3155-3169.
- [43]Xia H Y, Li X J, Qiao Y T, et al. Dissecting the relationship between yield and mineral nutrients of wheat grains in double cropping as affected by preceding crops and nitrogen application[J]. Field Crops Research, 2023, 293:108845.
- [44]蔺江韵,尹本酥,王星舒,等. 长期施氮条件下小麦铁锰累积及其与土壤养分的关系[J]. 中国农业科学,2023,56(17):3372-3382.
- [45]马瑞琦,常旭虹,刘阿康,等. 减量施氮协同提升强筋小麦产量和品质[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(1):172-187.