doi：10.11838/sfsc.1673-6257.24078

铁锰铜肥对我国主要粮食作物增产的整合分析

王安心[1]，李　伟[2]，周义新[2]，赵竹青[1]，石　磊[1*]

（1. 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室 / 华中农业大学量元素研究中心，湖北　武汉　430070；2. 湖北茂盛生物有限公司，湖北　随州　441300）

摘　要：铁、锰和铜肥的作物增产效果受到区域土壤差异、施肥方式与施肥量等诸多因素的影响，开展上述微量元素肥料对我国主要粮食作物增产的整合分析，能为我国不同区域粮食作物合理施用上述肥料提供理论依据。研究数据来源于中国知网、中国科技期刊数据库、万方数据和 Web of science，以不施用铁、锰和铜肥为对照，选择反应比作为效应值，通过整合（Meta）分析的方法综合分析铁、锰和铜肥对我国小麦、玉米和水稻产量的增产效果。结果表明，施用铁、锰和铜肥能够增加小麦、玉米和水稻 3 种粮食作物的产量，增产幅度分别为 9.76%、7.09% 和 3.68%，不同年份增产效果不同。铁、锰和铜肥均以土施增产效果好。铁肥施肥量在低于 10 kg/hm^2 时的增产效果较好，锰肥施肥量在高于 30 kg/hm^2 时的增产效果较好，铜肥施肥量在 10 ~ 20 kg/hm^2 时增产效果较好。华东地区施用铁肥（22.68%）的增产效果较好，西部地区施用锰肥（11.84%）和铜肥（5.67%）的增产效果较好。土壤理化性质会影响铁、锰和铜肥的增产效果。在碱性土壤和有机质含量低于 10 g/kg 的土壤中施用铁、锰和铜肥均能显著增产。施用铁、锰和铜等微量元素肥料能有效提高粮食作物的产量，但是施用时应选择合理的施用方式和施用量，并与其他肥料协调配施，才能实现粮食作物的稳产高产。

关键词：粮食作物；铁肥；锰肥；铜肥；产量

铁、锰和铜是植物生长发育过程中所必需的微量矿质营养成分，在促进植物生长发育、提高产量等方面起着重要作用。长期以来，我国农业生产主要依靠施用氮、磷和钾等大量元素肥料来提高作物产量，而忽略了微量元素肥料施用，从而造成土壤中养分的不平衡[1-2]，影响了农作物的产量。小麦、玉米和水稻是我国主要的粮食作物，施用铁、锰和铜肥能够提高小麦、玉米和水稻的产量，但是其提高程度受到区域土壤、施肥方式与施肥量等诸多因素的影响。目前关于施用铁、锰和铜肥增产效果的报道不多，且部分研究结果增产效果存在差异。一些研究表明，小麦施用铁、锰和铜肥可以提高小麦产量[3-5]，而另一些研究显示增施铜肥和锰肥对小麦产量影响不大[6]。李旭辉等[7]在石灰性土壤的研究表明，小麦产量随着锰肥施用量的增加先增加后减少。玉米增施适量铁肥能够增加产量，但是过量施铁肥会降低玉米的产量，施用锰肥玉米产量先增加后下降[8-10]。而施用铁、锰和铜肥能增加水稻的产量[11-13]。不同地区的土壤性质与微量元素的有效性有着密切的关系[14-16]。此外，施肥方式也会影响土壤中微量元素的含量[17]，过量施用磷肥也会使得土壤中的 Fe^{2+} 与磷酸根结合，降低铁的有效性[18]。上述研究基本都是施用铁、锰和铜肥对小麦、玉米和水稻增产的单个影响因素分析，但单个田间试验研究难以准确回答较大区域上施用铁、锰和铜肥对粮食作物增产的效果及其影响因素。近年来，整合分析在农学领域的运用越来越广泛。有学者认为在农学领域更应该使用整合分析[19]，因为综合发表在期刊中的大量田间数据可以从宏观角度更好地量化土壤和气候条件对作物生产的影响，并且找出单个研究领域存在的不足。综合来看，整合分析能够打破单个试验研究的局限性，使得较为独立零散的研究系统化，从而在较大区域的水平上进行总结和指导。本研究将基于 2022 年以前发表的文献数据，通过整合分析研究施用铁、锰和铜肥对我国主要粮食作物小麦、玉米和水稻产量的影响，分析不同作物种类、地区、时期、施肥量和施肥方式等对产量的影响，为我国主要粮食作物生产中铁、锰和铜肥的合理施用提供参考。

收稿日期：2024-02-07；**录用日期：**2024-04-20

基金项目：国家重点研发计划重点专项（2023YFD1901004）。

作者简介：王安心（2000-），硕士研究生，主要从事秸秆还田方向的研究。E-mail：wanganxin@webmail.hzau.edu.cn。

通讯作者：石磊，E-mail：leish@mail.hzau.edu.cn。

1　材料与方法

1.1　数据收集

本研究数据来源于中国知网、中国科技期刊数据库、万方数据和 Web of Science 文献数据库，以“铁（Iron）/ 锰（Manganese）/ 铜（Copper）+ 小麦（Wheat）/ 玉米（Corn）/ 水稻（Rice）+ 产量（Yield）”作为关键词检索 2022 年 6 月 30 日之前发表文献。依据整合分析方法的要求以及研究的目的，对检索文献进行筛选。设置筛选的条件包括：（1）试验结果发表在核心期刊中；（2）文献中涉及的试验地点是在中国进行的对比试验，并且以我国主要粮食作物（小麦、玉米、水稻）为研究对象；（3）试验必须为田间对照试验，不包括室内试验、评价类、模型模拟等文章及相关的学位毕业论文；（4）同一试验中必须包含施用铁 / 锰 / 铜试验组和不施用铁 / 锰 / 铜对照组；（5）文献中需明确说明不同处理的试验重复数及各试验处理的产量均值（试验重复至少 3 次）。基于以上标准，筛选出 60 篇文献，包含数据 275 组。提取文章中的数据包括施肥与不施肥的产量均值与试验研究相关的信息（包括试验区域、土壤条件、施肥方式等），以文字或表格展示的信息直接提取，以折线图或柱状图展示的信息采用 GetData Graph Digitizer 2.25 软件来获取。

1.2　数据分类

考虑到施用肥料之后，作物产量可能会受到其他因素的影响，根据文献整理得到的信息，按照作物种类、肥料种类、试验区域、试验年份、施肥方式、施肥量、土壤 pH 和土壤有机质含量来进行分类（表 1）。

表 1　主要作物产量因子的影响因素

影响因素	参数
作物种类	小麦、玉米、水稻
肥料种类	铁肥（硫酸亚铁）、锰肥（硫酸锰）、铜肥（硫酸铜）
试验区域	华中地区（河南省、湖北省、湖南省）、华东地区（山东省、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、上海市、台湾省）、华南地区（广西壮族自治区、广东省、海南省、香港特别行政区、澳门特别行政区）、华北地区（北京市、天津市、山西省、河北省、内蒙古自治区、黑龙江省、吉林省、辽宁省）、西部地区（新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、陕西省、西藏自治区、四川省、重庆市、云南省）
试验年份	2000 年以前、2001—2010 年、2010—2022 年
施肥方式	土施、喷施
施肥量（kg/hm^2）	<10、10 ~ 20、20 ~ 30、>30
土壤 pH	酸性土壤、中性土壤、碱性土壤
土壤有机质含量（g/kg）	<10、10 ~ 20、>20

1.3　整合分析

本研究提取的数据来自于中国境内的独立试验研究，不同试验间土壤质地、施肥方式、气候条件、栽培年份、作物品种以及田间管理等方面存在着差异，故研究间存在着很大变异，所以选择随机效应模型计算综合效应值。

建立关于小麦、玉米和水稻产量的数据库，根据上文提到的影响情况进行分类和计算，使用反应比 R 的自然对数（lnR）作为效应值：

$$R=Xt/Xc$$

$$lnR=ln（Xt/Xc）=lnXt- lnXc$$

式中，Xt 是试验组的粮食作物产量指标的均值，Xc 是对照组粮食作物产量指标的均值。由于入选的研究大多没有报道试验数据的标准误或标准差，故本文采用无权重分析方法，利用重复抽样技术计算效应值[20]。采用 SPSS 23.0 进行 bootstrap 计算，抽样频率为 5000 次，得到平均效应值和上下限[21-22]。

为更直观地观察肥料对作物增产的影响效果，需将 lnR 转化为肥料利用的增产幅度（Z）：

$$Z=（R-1）\times 100\%$$

计算得出 Z 的 95% 置信区间，若 Z 的 95% 置信区间均大于 0，则说明施用铁、锰或铜肥对粮食作物产量有显著的正效应；若 Z 的 95% 置信区间均小于 0，则说明施用铁、锰或铜肥对粮食作物产量有显著的负效应；若 Z 的 95% 置信区间包含 0，则说明施用铁、锰或铜肥对粮食作物产量的效应不显著。若分类变量之间 95% 的置信区间不重叠，

则说明分类变量之间的差异显著。对来源于不同试验的铁、锰和铜肥等作物增产效应进行了正态分布分析，结果表明，3 个微量肥料总的作物增产幅度和单独微量肥料的作物增产幅度均呈现为正态分布，这表明本研究选取的来源于不同试验的作物增产幅度数据是可靠的（图 1）。

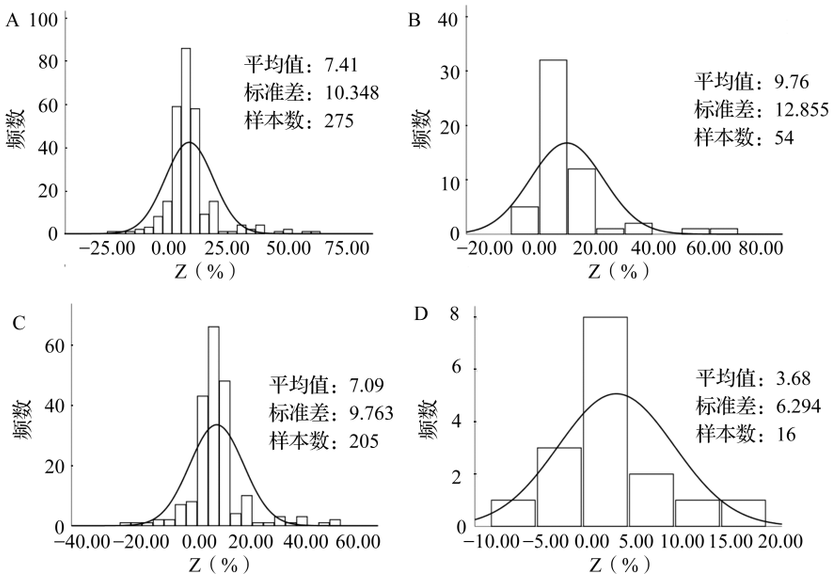

图 1　施用铁、锰和铜肥后作物增产幅度的频率分布直方图

注：A 为施用铁、锰和铜肥；B 为施用铁肥；C 为施用锰肥；D 为施用铜肥。

1.4　数据处理

本研究采用 Excel 2019 记录文献数据，建立完整的数据库，同时进行数据处理；采用 SPSS 23.0 进行数据计算和统计分析，采用 Origin 9.1 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　铁、锰和铜肥对小麦、玉米和水稻产量的影响

与不施用铁、锰和铜肥相比，施用铁、锰和铜肥均能显著提高小麦、玉米和水稻 3 种粮食作物的产量，其中施用铁肥的提升幅度最大，达到 9.76%；其次是锰肥，提升幅度为 7.09%；提升最小的为铜肥，提升幅度为 3.68%（图 2）。施用铁肥的增产效果明显高于施用铜肥的效果（图 2）。施用铁肥能显著提高小麦、玉米和水稻的产量，增产幅度分别是 11.11%、11.54% 和 7.28%，三者的增产幅度没有显著差异；施用锰肥能显著提高小麦和水稻的产量，增产幅度分别为 8.49% 和 4.86%，对玉米产量的提高有作用，但是作用不显著；施用铜肥小麦和玉米的产量均显著提高，增产幅度分别为 3.83% 和 2.62%（图 2）。

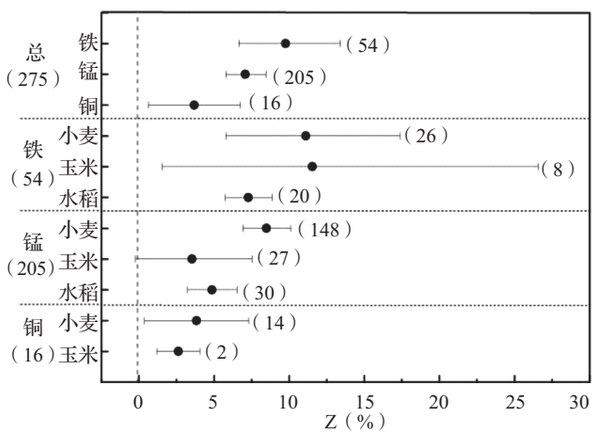

图 2　施用铁、锰和铜肥对小麦、玉米和水稻增产幅度的影响

2.2　不同年份施用铁、锰和铜肥增加粮食作物产量的差异

施用铁、锰和铜肥在不同年份均表现出显著的增产效应，总体上 2000 年以前施用铁、锰和铜肥增产效果较好，但不同年份之间没有显著差异（图 3）。铁肥在 2000 年以前和 2011—2022 年的增产效果显著；锰肥在 2000 年以前和 2001—2010 年的增产效果显著；铜肥在 2000 年以前增产效果显著（图 3）。

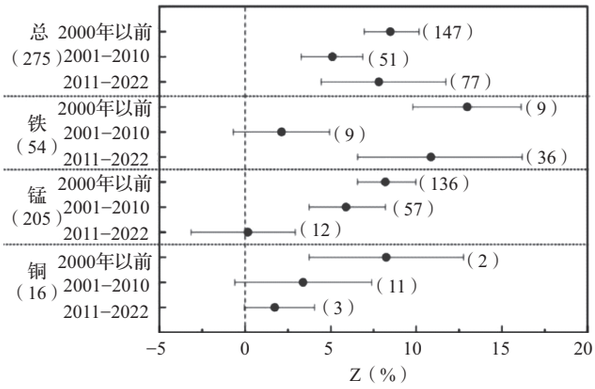

图 3　不同试验年份小麦、玉米和水稻施用铁、锰和铜肥增产幅度的差异

2.3　铁、锰和铜肥的施用方式对粮食作物产量的影响

铁、锰和铜肥的施用方式主要是土施和喷施，不同的施肥方式提高 3 种主要粮食作物产量的效果不同（图 4）。铁、锰和铜肥土施和喷施的增产幅度分别为 8.62% 和 6.61%，两种施肥方法增产幅度差异不显著（图 4）。施用铁肥，土施和喷施的增产幅度分别是 15.15% 和 6.58%，土施效果要优于喷施效果；施用锰肥，土施和喷施的增产幅度分别是 7.92% 和 6.61%，与铁肥相似，锰肥土施增产效果优于喷施；由于未收集到喷施铜肥的文献，铜肥只有土施的效果，增产幅度达到 3.68%（图 4）。

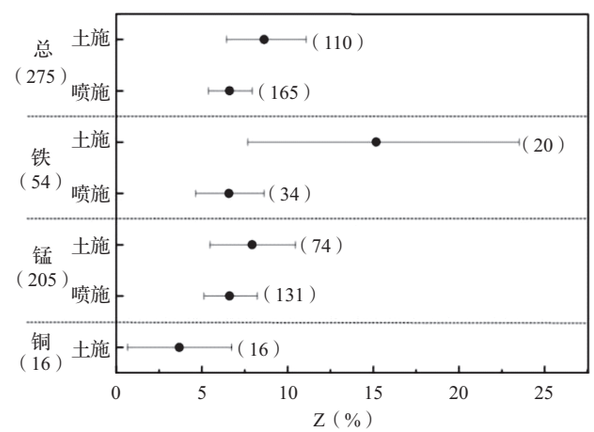

图 4　铁、锰和铜肥的不同施用方式对粮食作物增产幅度的影响

2.4　铁、锰和铜肥不同施用量对粮食作物产量的影响

总体上，小麦、玉米和水稻的增产幅度随着铁、锰和铜肥施用量的增加先降低后升高，施肥量 <10 kg/hm^2 增产幅度达到最大，为 11.16%；施肥量在 10 ~ 20、20 ~ 30 和 >30 kg/hm^2 时增产幅度在各施用量之间没有显著差异（图 5）。3 种粮食作物的增产幅度随着铁肥的施用量增加而减小，施肥量 <10 kg/hm^2 时增产幅度达到最大，为 14.41%；当施肥量 >30 kg/hm^2，施用铁肥会产生负效应且负效应显著，减产幅度为 3.49%（图 5）。施用锰肥的增产幅度随着施用量的增加先降低后升高，施肥量 <10 kg/hm^2 增产幅度为 8.31%；在施肥量 >30 kg/hm^2 时增产幅度最大，为 8.95%。施用铜肥在施用量为 10 ~ 20 kg/hm^2 时增产效果显著（图 5）。

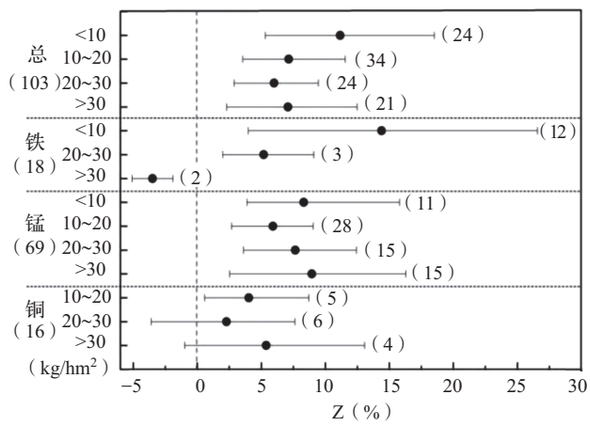

图 5　铁、锰和铜肥不同施用量对粮食作物增产幅度的影响

2.5　不同地区施用铁、锰和铜肥增加粮食作物产量的差异

不同地区施用铁、锰和铜肥的增产效果不同。总体来看，铁、锰和铜肥在华东地区增产效果最好，为 14.79%，其次是西部地区、华北地区、华中地区和华南地区，增产幅度分别为 10.01%、8.03%、6.18% 和 3.56%，但 5 个地区的增产效果没有显著差异（图 6）。其中，铁肥在华东地区增产效果最好，增产幅度为 22.68%；锰肥在西部地区、华北地区、华中地区和华南地区均有显著的增产效果，增产幅度分别为 11.84%、9.25%、6.40% 和 3.56%，在华东地区虽然有增产效果，但是效果不显著。施用铜肥在西部地区的增产效果最好，增产幅度达到 5.67%，在华东地区的增产幅度为 2.92%，在华中地区的增产效果不显著（图 6）。

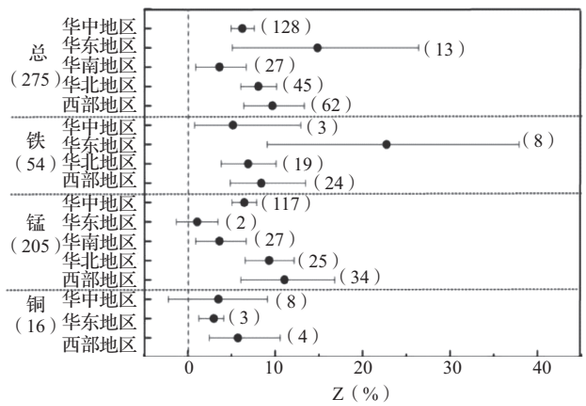

图 6　不同地区施用铁、锰和铜肥对粮食作物增产幅度的影响

2.6　土壤性状对施用铁、锰和铜肥增加粮食作物产量的影响

碱性土壤施用铁、锰和铜肥的效果最好，增产幅度为 7.94%；其次是酸性土壤，增产幅度为 5.30%；在中性土壤中虽然有增产效果，但是增产效果不显著，3 种土壤增产效果没有显著差异（图 7A）。其中，铁肥在碱性土壤的增产效果优于酸性土壤；锰肥在中性土壤和碱性土壤中施用能够增加作物产量，在酸性土壤中施用会降低产量；铜肥在碱性土壤中能增加小麦、玉米和水稻产量，但是增产效果不显著（图 7A）。

土壤有机质含量 <10 g/kg 时施用铁、锰和铜肥的效果最佳，随着土壤有机质含量的升高，上述微量元素肥料的增产效果降低，在 3 种土壤有机质含量中增产效果没有显著差异（图 7B）。土壤有机质含量 <10 g/kg 时施用铁肥的增产效果最好，增产幅度为 12.13%；土壤有机质含量 >20 g/kg 时增产效果最小，增产幅度为 7.09%，但 3 种土壤有机质含量的地块增产作用差异均不显著（图 7B）。土壤有机质在 10 ~ 20 g/kg 时施用锰肥的增产效果最好，增产幅度为 6.15%，且增产效果显著高于土壤有机质含量 >20 g/kg 的土壤（图 7B）。在土壤有机质含量为 10 ~ 20 g/kg 时施用铜肥的增产效果不显著（图 7B）。

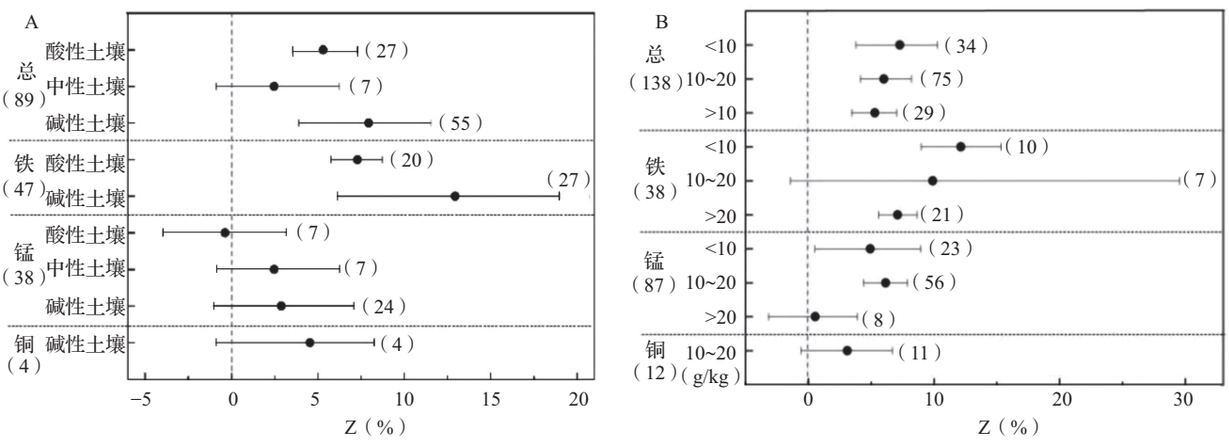

图 7　土壤性状对粮食作物施用铁、锰和铜肥增产幅度的影响

注：A 为土壤 pH；B 为有机质。

3　讨论

铁、锰和铜等微量营养元素是一些酶的组分，参与体内的氧化还原反应；参与叶绿素合成，有稳定叶绿素的作用；参与体内碳氮代谢，促进生殖器官的发育，在作物生长发育中发挥重要功能[23]。本文研究结果表明，施用铁、锰和铜肥能够增加小麦、玉米和水稻的产量（图 2）。原因可能是施用上述肥料后小麦的穗粒数和千粒重增加[11, 24]，玉米的穗部性状改善，籽粒数增加，从而增加产量[9, 25]；而水稻主要是分蘖数、穗粒数与结实率增加[26-27]。

2000 年之前施用铁、锰和铜肥增产效果较好（图 3）。本研究中，最早的试验开展于 1976 年，在此之前人们忽略了铁、锰和铜等微量元素肥料的重要性，导致土壤中含量相对缺乏。随着时间的推移，人们开始意识到铁、锰和铜的重要作用，大量施用有机肥料和含铁、锰和铜的复合肥，给土壤中带入了新的铁、锰和铜元素，使得施用铁、锰和铜肥料的增产效应降低。

由于大多数叶面施用的微量营养元素不能有效地向根系输送，导致根系可能仍然缺乏微量元素。因此，只有在适合的条件下，叶面喷施铁、锰和铜等微量元素才能成功提高粮食产量[1]。本研究结果表明，铁肥和锰肥土施的效果要好于喷施，铜肥土施有增产的效果，各种喷施方式无显著差异（图 4）。土壤施铁能更好地纠正中轻度缺铁的原因可能是缺铁诱导植物侧根与初生根伸长[28]，促进根系与土壤的接触，同时分泌有机物提高植物对铁的利用[29]。施用锰肥可以增加土壤中锰含量[30]，同时提高叶片净光合速率[31]，从而提高产量。

铁、锰和铜肥对小麦、玉米和水稻的增产效果受到施肥量的影响（图 5）。施用铁肥 3 种粮食作物增产幅度随施肥量的增加而下降，当施用量 >30 kg/hm^2 时产量不增反降（图 5），这可能是因为施用过量。铁是合成叶绿素前体中不可缺少的矿物质营养素，但施用过量会产生铁毒害，导致生长受阻[32]，因此在施用铁肥时应注意施用量，避免过量施用。施用锰肥 3 种粮食作物在各施肥量范围内增产幅度没有显著差异（图 5），这可能是因为土壤对锰的吸附作用影响了锰的有效性[33]，土壤中增加的有效态锰增量相差不大，使得各施肥量对产量影响没有显著差异。我国大部分土壤的有效铜较丰富[34]，所以施用量增加对产量影响不大，在较低水平施用时增产效果较好。

本研究结果表明，在华东地区施用铁肥增产效果较好，在西部地区施用锰肥增产效果较好，在西部地区施用铜肥增产效果较好，但是各个地区施用铁、锰和铜肥作物增产的差异都不显著（图 6）。通常情况铁和锰缺乏的现象以北方石灰性土壤为主[35]，在西部地区施用铁肥和锰肥效果更好，出现这种情况可能是因为针对北方石灰性土壤的试验较少，同时在西部缺乏的土壤中做试验较多导致的。而稻田中西南地区的有效铜含量低于其他地区，在施用铜肥后的增产效果较好[36]。

作物吸收微量元素除了受作物自身对于微量元素的需求外还会受到土壤中微量元素有效性的影响。施用微量元素肥料是为了提高土壤中微量元素的有效性，预防和纠正土壤中微量元素缺乏的状况，提高籽粒产量。铁、锰和铜等的有效性很大程度上受到 pH 的调控，pH 每增加 1，土壤 Cu^{2+}、Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 的溶解度就会降低 100 倍，而 Fe^{3+} 的溶解度则会下降 1000 倍[1]。在碱性土壤中铁、锰和铜等的有效性会迅速下降，因此，在碱性土壤中及时补充铁、锰和铜能够使得作物生长更好，从而增加产量。本研究整合分析结果也证实碱性土壤中施用铁、锰和铜肥提高作物产量的效果较好（图 7A）。

本文研究结果表明，在有机质含量 <10 g/kg 的土壤中施用铁、锰和铜肥提高作物产量的效果更好（图 7B）。土壤有机质本身不含有金属元素，但它具有大量吸附位点，可以有效吸附土壤中的金属元素，随着土壤有机质含量升高，溶解性有机质也相应增加，并且通过参与金属元素的络合与螯合作用，从而影响土壤中的金属元素[37-38]。锰在土壤中的氧化还原是在有机质和微生物的参与中进行的，有机质分解能促进氧化锰还原，增加锰的有效性。因此随着有机质含量的增加，土壤中铁、锰和铜的含量也随之增加[39]，在有机质含量低的土壤中施用含铁、锰和铜等微量元素肥料能够增加作物对这些微量元素的吸收，促进生长，提高产量[40]。

合理的肥料施用是提高作物产量与品质的重要因素。土壤中铁、锰和铜供应不足会导致作物光合电子转移能力下降，光合作用减弱，生长受阻。据调查，现在土壤里所含可被吸收的微量元素含量大约为 50 年前的 1/4 ~ 1/2[41]，而长期不施用肥料或是只施用氮、磷、钾肥料，对耕作层有效态铁、锰和铜含量有显著的影响，使其接近亏缺边缘值[42]，因此，在长期施用氮、磷、钾肥料的土壤中及时补充微量元素是很有必要的。

由于田间试验土壤中单独施用铜肥的研究较为缺乏，铜肥的增产效应数据较少，效应偏差较大，其研究结果还需进一步验证。此外，目前农资市场上铁、锰和铜等肥料有非常多的形态，不同粮食作物对于铁、锰和铜等的需求量不同，不同铁、锰和铜等肥料之间也存在一定的交互作用，后续研究还应更多关注这些因素对作物产量的影响。

4　结论

综上所述，施用铁、锰和铜等微量元素肥料能有效提高粮食作物的产量，但是上述肥料施用时应选择合理的施用方式和施用量，并与其他肥料协调配施，才能实现粮食作物的稳产高产。在华东地区可以增施铁肥，在西部地区可以增施锰肥和铜肥。此外，土壤性状也会影响肥料的施用效果，在碱性

土壤和有机质含量低的土壤中增施铁、锰和铜肥。建议铁、锰和铜肥以土施且施肥量 <10 kg/hm^2 为宜。

参考文献：

[1] Rengel Z，Batten G D，Crowly D E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops [J]. Field Crop Research，1999，60：27-40.

[2] Wyszkowsk I M，Brodowska M S. Content of trace elements in soil fertilized with potassium and nitrogen [J]. Agiculture-Basel，2020，10（9）：398.

[3] 王丽，毛平平，党建友，等. 叶面喷施微肥对晋南小麦产量和微量元素含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料，2016（5）：85-89，123.

[4] 杨秋云，李红英，王文亮，等. 磷、铜配施对冬小麦产量和植株养分含量的影响 [J]. 土壤通报，2010，41（4）：938-941.

[5] 赵广才，常旭虹，杨玉双，等. 叶面喷施不同营养元素对冬小麦产量和品质的影响 [J]. 麦类作物学报，2011，31（4）：689-694.

[6] 张平，张立，曹慧英，等. 冬小麦微量元素肥料肥效试验研究 [J]. 青海农林科技，2016（2）：81-84.

[7] 李旭辉，张金水，冯振国. 锰锌肥对锰锌俱缺石灰性土壤上小麦的效应 [J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2001（S1）：19-22.

[8] 刘蓉，叶宇萍，海丹，等. 锌、铁微肥对夏玉米产量和品质的影响 [J]. 西北农业学报，2017，26（11）：1598-1605.

[9] 李青军，李宁，胡国智，等. 微肥对玉米生长发育、养分吸收及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料，2013（4）：83-87.

[10] 郭孝，李明. 微肥在饲料玉米优质高产中应用的研究 [J]. 家畜生态，2004（4）：96-98.

[11] 付力成，王人民，孟杰，等. 叶面锌、铁配施对水稻产量、品质及锌铁分布的影响及其品种差异 [J]. 中国农业科学，2010，43（24）：5009-5018.

[12] 徐振江，肖立中，刘洪，等. 锌与不同营养元素配施对香稻营养品质和产量的影响 [J]. 广东农业科学，2012，39（1）：21-24.

[13] 李虎，陈传华，刘广林，等. 铜、锌肥对优质稻桂育9号的影响效应研究 [J]. 江西农业大学学报，2020，42（3）：448-457.

[14] 李慧，温汉辉，蔡立梅，等. 广东省揭阳市揭东区微量元素分布特征及其影响因素分析 [J]. 现代地质，2023，37（1）：208-216.

[15] 廖思，莫雅芳，徐圆圆，等. 不同林龄灰木莲人工林土壤微量养分特征 [J]. 西部林业科学，2023，52（1）：130-138.

[16] 丁燕芳，赵凤霞，米琳，等. 豫中植烟土壤有效态微量元素与pH和有机质的关系 [J]. 土壤，2022，54（1）：88-94.

[17] 王擎运，张佳宝，赵炳梓，等. 不同施肥方式对典型壤质潮土中微量元素积累及其有效性的影响 [J]. 土壤学报，2012，49（6）：1104-1113.

[18] 饶玉春，郑婷婷，马伯军，等. 微量元素铁、锰、铜对水稻生长的影响及缺素防治 [J]. 中国稻米，2012，18（4）：31-35.

[19] Dore T，Makowski D，Malezieux E，et al. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy：Revisiting Methods，Concepts and Knowledge [J]. European Journal of Agronomy，2011，34（4）：197-210.

[20] 石如岳，王冲，杨俊雪，等. 中微量元素对番茄产量和品质影响的整合分析 [J]. 中国瓜菜，2021，34（3）：66-71.

[21] Adams D，Gurevitch J，Rosenberg M S. Resampling tests for meta-analysis of ecological data [J]. Ecology，1997，78（4）：1277-1283.

[22] Gurevitch J，Hedges L V. Statistical issues in ecological meta-analyses [J]. Ecology，1999，80（4）：1142-1149.

[23] Zeidan M S，Mohamed M F，Hamouda H A. Effect of foliar fertilization of Fe，Mn and Zn on wheat yield and quality in low sandy soils fertility [J]. World Journal of Agricultural Sciences，2010，6（6）：696-699.

[24] 杨春霞，张艳，夏学智. 叶面喷施和滴灌条件下增施微肥对春小麦微量元素含量和产量的影响 [J]. 河南农业科学，2023，52（2）：38-46.

[25] 杨静. 喷施微量元素对冬小麦、夏玉米生长发育、产量及品质的影响 [D]. 武汉：华中农业大学，2012.

[26] 何梓彬. 外源锌、铁、磷叶片喷施对有色稻籽粒矿质营养及其生物有效性的影响 [D]. 福州：福建农林大学，2020.

[27] Ashkan D L，Amirabbas M，Morteza M. 微量元素叶面喷施对水稻（*Oryza sativa* L.）产量及其构成因素的影响 [J]. 植物营养与肥料学报，2021，27（5）：909-918.

[28] Graeme B，Christopher B，Jian Z. Effects of glutelin and globulin on the physicochemical properties of rice starch and flour [J]. Journal of Cereal Science，2014，60（2）：414-420.

[29] Donnini S，De N P，Gabotti D，et al. Adaptive strategies of *Parietaria diffusa*（M. & K.）to calcareous habitat with limited iron availability [J]. Plant Cell Environment，2011，35：1171-1184.

[30] 姚澄，周天宇，易超，等. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响 [J]. 农业环境科学学报，2022，41（9）：1955-1965.

[31] 魏孝荣，郝明德，邱莉萍. 土壤干旱条件下锰肥对夏玉米光合特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报，2004（3）：255-258.

[32] 张文静，程建峰，刘婕，等. 植物铁素（Fe）营养的生理研究进展 [J]. 中国农学通报，2021，37（36）：103-110.

[33] 地里拜尔·苏里坦，艾尼瓦尔·买买提，蔺娟. 土壤中铁锰的形态分布及其有效性研究 [J]. 生态学杂志，2006（2）：155-160.

[34] 邹春琴，张福锁. 中国农业生产中的微量元素. 中国土壤－作物中微量元素研究现状和展望 [C] // 北京：中国农业大学出版社，2009：2-3.

[35] 刘铮. 中国土壤微量元素 [M]. 南京：江苏科学技术出版社，1996：134-145.

［36］ 张璐，蔡泽江，王慧颖，等. 中国稻田土壤有效态中量和微量元素含量分布特征［J］. 农业工程学报，2020，36（16）：62–70.
［37］ 李廷强，杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响［J］. 应用生态学报，2004（6）：1083–1087.
［38］ 孙花，谭长银，黄道友，等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响［J］. 湖南师范大学自然科学学报，2011，34（4）：82–87.
［39］ 丁燕芳，赵凤霞，米琳，等. 豫中植烟土壤有效态微量元素与 pH 和有机质的关系［J］. 土壤，2022，54（1）：88–94.
［40］ 李旭辉. 黄土区小麦施用锰锌肥的试验研究［J］. 干旱地区农业研究，1998（1）：79–82.
［41］ 李春霞. 锰、铁和钼肥处理种子与叶面喷施对小麦生长与吸收的影响及其机制［D］. 杨凌：西北农林科技大学，2019.
［42］ 李志军，李平儒，史银光，等. 长期施肥对关中垆土微量元素有效性的影响［J］. 植物营养与肥料学报，2010，16（6）：1456–1463.

Effects of iron，manganese and copper fertilizers on yield increase of main grain crops in China by meta-analysis

WANG An-xin[1]，LI Wei[2]，ZHOU Yi-xin[2]，ZHAO Zhu-qing[1]，SHI Lei[1*]［1. Key Laboratory of Arable Land Conservation（Middle and Lower Reaches of Yangtze River），Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Microelement Research Center，Huazhong Agricultural University，Wuhan Hubei 430070；2. Hubei Maosheng Biotechnology Co.，Ltd.，Suizhou Hubei 441300］

Abstract：The effects of iron，manganese and copper fertilizers on crop yield are affected by the differences of growing regions and soil types，fertilization methods and application rates，as well as many other factors. Conducting meta-analysis of above microfertilizers on the grain increase will provide a theoretical basis for the rational application of these fertilizers in grain crops. The research data were collected from China National Knowledge Infrastructure，China Science and Technology Journal Database，Wanfang Data Knowledge Service Platform and Web of Science. The effects of iron，manganese and copper fertilizers on the grain yield of wheat，maize and rice in China were comprehensively analyzed by meta-analysis method，with the response ratio as the effect size and no application of iron，manganese，and copper as the control. The results showed that，the application of iron，manganese and copper fertilizers increased the yield of wheat，corn and rice，with the increase rates of 9.76%，7.09% and 3.68%，respectively. The yield increase effects were different in different years. The effects of soil application of iron fertilizer，manganese fertilizer and copper fertilizer were better than foliar application of them on the grain increase. The application rates with better yield increase effects for iron fertilizer were less than 10 kg/hm^2，for manganese fertilizer were more than 30 kg/hm^2，and for copper fertilizer were 10–20 kg/hm^2. Application of iron fertilizer in East China had better yield increase effects（22.68%）than that in other regions，while application of manganese fertilizer and copper fertilizer in West China had better yield increase effects（11.84% and 5.67%）than those in other regions. Soil properties could affect the yield increase effect of iron，manganese and copper fertilizers on crops. Applying iron，manganese and copper fertilizers in the alkaline soil or the soil with organic matter content below 10 g/kg could increase the yield significantly. The application of iron，manganese and copper fertilizers could significantly improve the yield of grain crops，but the reasonable application method and optimal application rates of them，as well as the coordination of them with other fertilizers were necessary to achieve stable and high yield of grain crops.

Key words：grain crops；iron fertilizer；manganese fertilizer；copper fertilizer；yield