



自然科学基金项目进展专栏

论 文

油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆对间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度及地上部累积量的影响

夏海勇^①, 赵建华^②, 孙建好^②, 薛艳芳^①, Tristan Eagling^③, 包兴国^②, 张福锁^①, 李隆^{①*}^① 中国农业大学资源环境与粮食安全研究中心, 北京 100193;^② 甘肃省农业科学院土壤、肥料与节水研究所, 兰州 730070;^③ Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire AL5 2JQ, UK

* 联系人, E-mail: lilong@cau.edu.cn

收稿日期: 2013-01-15; 接受日期: 2013-05-07

国家自然科学基金重大项目(批准号: 30890133)和中国农业大学研究生自主选题科研创新专项(批准号: KYCX2010075)资助

摘要 目前较多研究关注单作玉米的籽粒微量元素问题, 间套作对玉米籽粒微量元素浓度和地上部吸收量的影响尚不清楚. 田间试验用来研究白菜型油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆对间作玉米籽粒铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)和锌(Zn)浓度及其相应地上部植株吸收量的影响. 与单作玉米相比, 与豆科作物间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度及其相应的收获指数降低, 而与白菜型油菜间作玉米则保持与单作玉米相同水平; 但是间作促进了玉米植株地上部对 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量. 进一步研究表明, 玉米籽粒产量与籽粒 Fe 和 Cu 的浓度呈显著负相关关系, 而与 Mn 和 Zn 的浓度则未达到显著相关, 但是所有这些籽粒微量元素浓度与相应的收获指数间均呈显著性正相关关系. 因此, 与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作玉米籽粒微量元素浓度的降低, 主要是由 Fe, Mn, Cu 和 Zn 从营养器官向籽粒转移或再活化的比例降低所致, 这可能与相应的玉米衰老进程减缓有关. 白菜型油菜/玉米间作有利于维持玉米籽粒高产, 同时未降低籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度, 适合在本地区推广.

关键词间套作
玉米
微量元素
收获指数
稀释效应

间套作是指 2 种以上作物种植在同一块土地上并且具有一定共同生长期的种植方式, 兼具增产、环境友好和生态可持续性等诸多优点^[1]. 以玉米(*Zea mays* L.)为主栽作物的间套作体系, 特别是玉米/豆科间作体系, 在印度、东南亚、拉丁美洲和非洲等广泛分布, 同样在中国也普遍存在^[2]. 以玉米为主栽作物的间套作体系最显著的优点是玉米通过豆科或其他

配对作物的直接或间接促进作用, 或者种间时空生态位互补作用来获得增产优势. 例如, 豆科作物能够直接促进玉米对氮(N)或磷(P)的吸收^[3,4]; 一些有益的微生物也能活化土壤中的养分元素, 从而间接促进玉米对这些元素的吸收^[3]. 另外, 玉米可以通过与其配对作物在地上部植株高度、地下部根系深度和冷暖季节性等物种间生态位的差异获取更多的光、热、

引用格式: 夏海勇, 赵建华, 孙建好, 等. 油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆对间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度及地上部累积量的影响. 中国科学: 生命科学, 2013, 43: 557–568

英文版见: Xia H Y, Zhao J H, Sun J H, et al. Maize grain concentrations and above-ground shoot acquisition of micronutrients as affected by intercropping with turnip, faba bean, chickpea, and soybean. *Sci China Life Sci*, 2013, 56, doi: 10.1007/s11427-013-4524-y

水和养分等资源^[4]。

作为机制Ⅱ植物, 玉米根系能够分泌称作“植物铁载体”的低分子质量次生氨基酸类物质(麦根酸)来螯合活化土壤中的难溶性的铁(Fe)以供玉米吸收和利用^[5]。因此, 在中性和碱性土壤上, 玉米/豆科间作体系中, 玉米能够促进豆科作物对铁的吸收, 从而矫正豆科作物叶片缺铁黄化失绿的症状, 同时提高豆科作物籽粒中的铁浓度^[6]。然而, 很少研究关注间作玉米地上部植株对微量元素的吸收和玉米籽粒微量元素浓度情况。最近的研究开始关注间作玉米作为超累积植物修复重金属污染的土壤^[7]。

玉米是全球性的主要粮食作物之一, 也是微量元素“生物强化”的目标作物之一; 对于玉米必要生长而言, 同时也是人体饮食中最为缺乏的3种微量元素是铁(Fe)、锌(Zn)和铜(Cu)^[8]。目前, 通过传统的育种和基因改良^[9]或农学措施^[10]对玉米微量元素生物强化的研究一直以来较多关注玉米单作情况。生物强化研究中, 铁和锌是研究最多的2种元素, 铜则相对研究得较少; 锰(Mn)是高等植物必需的8种微量元素之一, 对于玉米体内锰生物强化的研究则更少^[8]。

作为一种成功的生物强化的措施, 最重要的3个研究任务是提高作物籽粒微量元素含量的同时伴随较高的作物籽粒产量和较高的微量元素有效性和利用价值^[11]。水分管理(花前干旱与整个营养生长阶段灌水相比较)并未影响热带玉米籽粒矿物质元素的组成, 氮肥施用虽然能够增加玉米籽粒中 Mn 的浓度, 但是由于氮肥施用带来的较高的籽粒产量则导致籽粒锌浓度的稀释效应^[10]。有研究表明, 增加氮肥施用能够显著提高玉米产量, 但是对玉米籽粒锌浓度的影响较小^[12]。另外, 现代玉米品种具有较高的玉米产量会导致籽粒微量元素浓度的降低^[10]。

因此有必要了解间套作能否作为一种有效的农学措施来提高籽粒微量元素浓度, 同时保持或提高作物产量, 或者间作玉米是否会像单作玉米研究中由于较高的籽粒产量导致微量元素浓度的稀释效应^[10]。与此同时, 近10年来传统的磷肥施用导致耕地土壤中磷素的过量累积。例如, 在中国过去的30年里土壤中的 Olsen-P 含量已经从 7.4 mg/kg 提高到 24.7 mg/kg^[13]。这样, 过量的磷肥施用和有限的磷矿石资源加剧了环境质量和粮食安全问题^[14]。从20世纪60年代开始, P 与 Fe, Mn, Cu, 特别是 Zn 的复杂交互作用在各种培

养环境和各种作物体内得以研究^[15]。已有报道表明, 磷肥施用与禾本科作物籽粒锌浓度之间呈负相关关系^[16]。

本研究旨在探索田间条件不同施磷量下白菜型油菜(*Brassica campestris* L.)、蚕豆(*Vicia faba* L.)、鹰嘴豆(*Cicer arietinum* L.)、大豆(*Glycine max* L.)和玉米间作对玉米地上部 Fe, Mn, Cu, Zn 吸收和籽粒中的浓度影响。中国西北地区由于气温和水分等限制, 大多数地方只种植生育期相对较短的一季作物, 因此广泛采用间套作体系增加产量, 本研究所选取的这4种以玉米为主栽作物的间作体系在西北温带灌耕地区广泛分布, 具有代表性。

1 材料与方法

1.1 试验地介绍

实验于2010年在武威绿洲农业试验站(隶属于甘肃省农业科学院土壤、肥料与节水研究所)进行。该试验站位于甘肃省武威市北15 km处的永昌镇白云村(38°37'N, 102°40'E)。该村海拔1504 m, 年平均气温为 7.7℃, ≥ 0 和 10℃的有效积温分别为 3646 和 3149℃, 无霜期 170~180 天, 年太阳辐射总量 5988 MJ m⁻² a⁻¹, 年平均降雨量 150 mm, 年平均蒸发量 2021 mm, 属于典型的两季不足、一季有余的大陆性干旱气候生态区。供试土壤为石灰性灌漠土。

1.2 实验设计与作物管理

实验处理为裂区实验设计, 3次重复。主区为3个施磷水平(0, 40 和 80 kg/hm², 以重过磷酸钙的形态施入), 裂区包括9个种植方式: 白菜型油菜/玉米间作、蚕豆/玉米间作、鹰嘴豆/玉米间作、大豆/玉米间作和相应单作。

所有小区均为东西走向。单作玉米小区面积 5.0×5.5=27.5(m²), 间作小区面积 5.6×5.5=30.8(m²) (图1)。每个间作小区种植4个作物组合带, 每个作物组合带的宽度是 1.4 m, 一个作物组合带包含2行玉米(行距 0.40 m, 株距 0.20 m)和3行蚕豆、鹰嘴豆、大豆或油菜(蚕豆、鹰嘴豆和大豆的行距 0.20 m, 株距 0.20 m; 油菜的行距 0.20 m, 每行撒播), 玉米与豆科和油菜的间距为 0.30 m。间作行距的设置理论上使2行玉米占据整个带幅宽度 140 cm 中的 80 cm 距离, 3

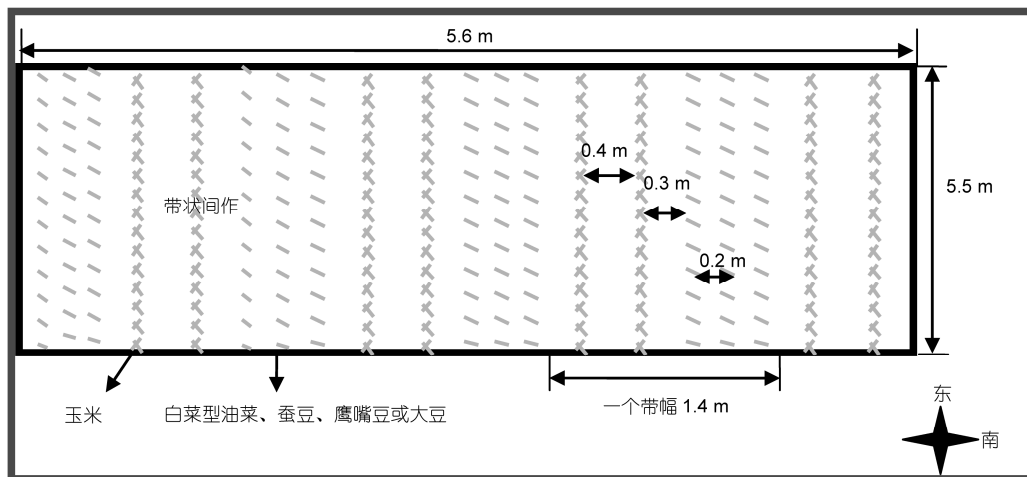


图 1 带状间作示意图

行配对作物占据剩余的 60 cm 距离. 行距和株距的设置代表了当地的种植实际情况, 其中玉米种植面积占整个间作区域的 $80/140=57\%$, 配对作物种植面积占整个间作区域的 $60/140=43\%$; 为了便于将间作和单作进行比较, 间作小区作物在各自所占面积内种植密度与单作小区相同, 这样间作区内 2 种作物相对种植密度(间作区内作物种植密度/单作区内该作物种植密度)之和等于 1.

豆科或油菜均给予相同的施氮量 112.5 kg/hm^2 , 以尿素的形式一次性作为基肥翻入表层 20 cm 土壤中, 玉米施氮为 225 kg/hm^2 , 分为基肥和追肥, 基肥时期施肥量为 112.5 kg/hm^2 , 追肥时期为大喇叭口期和吐丝期, 每个时期随灌溉施入量为 56.3 kg/hm^2 . 磷肥(重过磷酸钙)全部为基肥, 连同氮肥一同施入表层 20 cm, 无钾肥和有机肥施用. 在作物整个生长期, 所有小区给予充足灌水和人工除草, 并在作物生长的适当时期进行中耕. 不施用任何杀菌剂, 只在蚕豆盛花期叶面喷施氧化乐果(*O,O*-二甲基-*S*-(*N*-甲基氨基甲酰甲基)硫代磷酸酯)(中国达州兴隆化学试剂有限公司)以防治蚕豆蚜虫, 所用杀虫剂按说明书使用.

蚕豆、鹰嘴豆和油菜同时播种, 播种期为 3 月 28 日; 大豆和玉米同时播种, 播种期为 4 月 26 日. 6 月 28 日白菜型油菜收获, 玉米处于拔节期; 7 月 28 日蚕豆和鹰嘴豆同时收获, 玉米处于抽雄-吐丝期; 8 月 31 日大豆收获, 玉米处于灌浆期; 10 月 5 日玉米收获. 玉米收获期比白菜型油菜晚大概 3 个月, 比蚕豆和鹰

嘴豆晚大约 2 个月, 比大豆晚 1 个月左右.

1.3 样品采集与分析

玉米成熟收获时每个单作或间作小区收获 2 行紧邻的玉米用以测定籽粒产量和地上部生物量. 收获样品分为籽粒和秸秆两部分(手工脱粒以防止机器对植株体微量元素造成污染并用去离子水洗净), $65\sim 70^\circ\text{C}$ 72 h 烘干后用不锈钢研磨机(中国北京环亚天元机械技术有限公司制造, 型号 HY-04B)进行粉碎, 充分混合均匀, 其中的小样经 $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}_2$ (6 mL : 2 mL) 由微波消煮炉(CEM, Matthews, NC, USA)消煮. 消煮液中铁、锰、铜和锌的浓度由等离子体发射光谱仪(ICP-AES, OPTIMA 3300 DV, Perkin-Elmer, USA)测定. 在每批消煮测定过程中, 设置空白样和国际标准样品(荷兰瓦格宁根大学 Wageningen 籽粒样品 IPE556 和秸秆样品 IPE883)以保证分析质量.

1.4 数据统计分析

裂区实验设计的数据, 利用 SAS 8.0 (SAS Institute, Cary, NC)裂区实验设计统计分析程序进行方差分析(ANOVA), 并用最小显著性差异法($\text{LSD}_{0.05}$)进行多重比较. 线性回归和 Pearson 相关性用来分析玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度与籽粒产量和收获指数(harvest index, *HI*)间的关系, 所有的数据图均用 SigmaPlot v. 10.0 (Systat Software Inc., San Jose, CA)绘制.

2 结果与分析

2.1 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度

综合单、间作玉米种植体系,除了玉米籽粒 Mn 浓度在 80 kg/hm² 磷肥用量时显著高于不施磷外,玉米籽粒 Fe, Cu, Zn 浓度在 3 个施磷水平间无显著性差异(图 2)。除了与蚕豆和大豆间作的玉米在施磷量为 80 kg/hm² 时籽粒 Fe 浓度受到间作的影响显著降低之外,在 0 和 40 kg/hm² 磷肥用量时,间作并未显著降低玉米籽粒 Fe 的浓度(图 2)。除了与鹰嘴豆间作玉米籽粒 Mn 浓度在 80 kg/hm² 施磷量时没有显著性变化之

外,在 3 个施磷水平下,相对于单作玉米,蚕豆、鹰嘴豆和大豆显著降低了间作玉米籽粒 Mn 和 Cu 的浓度(图 2)。与单作玉米相比,蚕豆在 3 个施磷水平下,鹰嘴豆在 0 和 40 kg/hm² 磷肥用量时,大豆在无磷肥施用时无显著降低玉米籽粒 Zn 的浓度,而且磷肥施用有缓解鹰嘴豆和大豆降低玉米籽粒 Zn 浓度的趋势(图 2)。在各施磷水平下,与单作玉米相比,白菜型油菜没有显著降低玉米籽粒 Fe, Mn, Cu, Zn 的浓度(图 2)。综合 3 个施磷水平,相对于单作玉米,蚕豆、鹰嘴豆和大豆显著降低了间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度,而与白菜型油菜间作的玉米籽粒 Fe, Mn, Cu

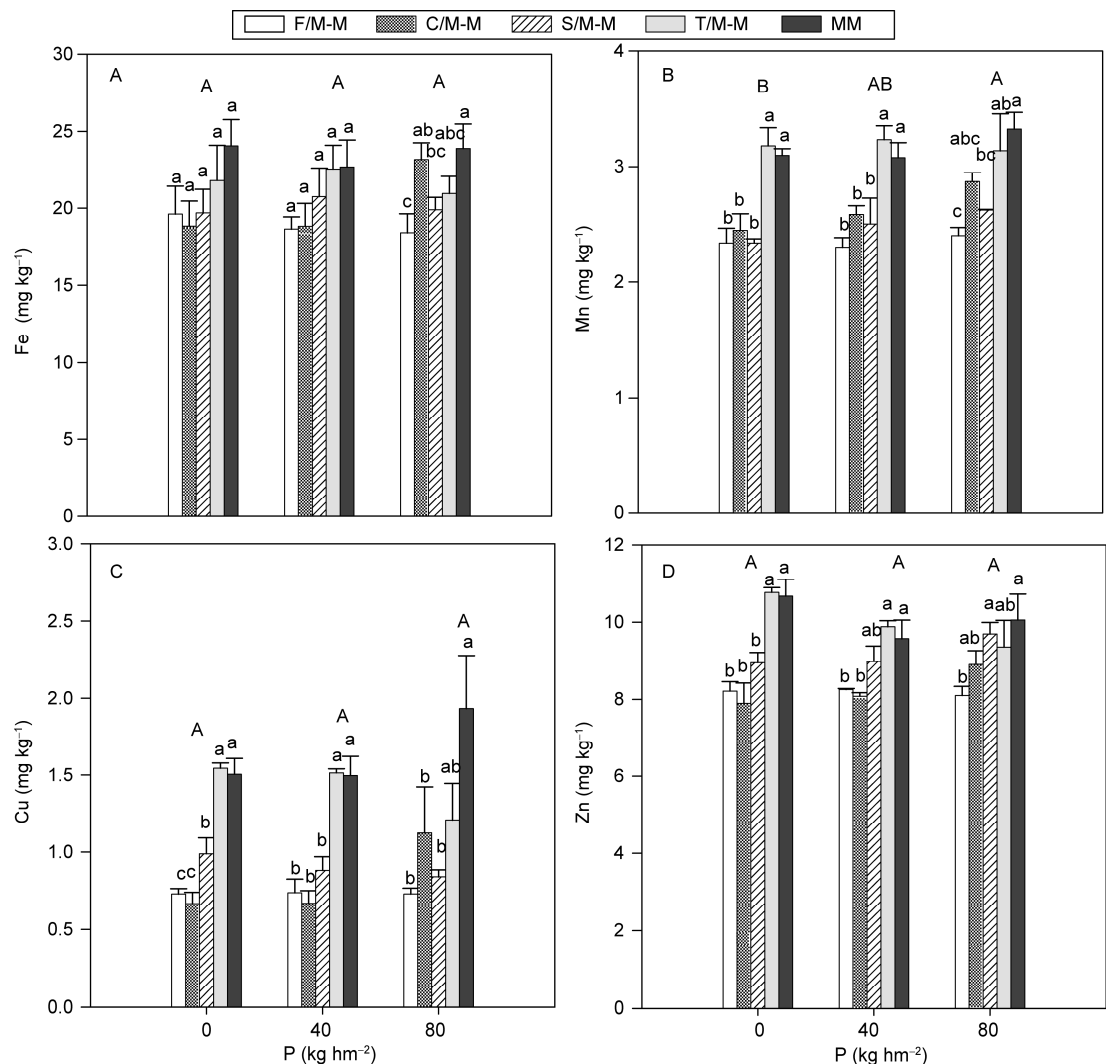


图 2 不同施磷水平下玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度

不同大写字母表示不同施磷水平间在 LSD_{0.05} 水平差异显著, 相同施磷水平下不同小写字母表示不同玉米种植体系间在 LSD_{0.05} 差异显著; F/M-M, C/M-M, S/M-M, T/M-M 和 MM 分别表示与蚕豆、鹰嘴豆、大豆和白菜型油菜间作玉米及单作玉米

和 Zn 的浓度则没有降低, 维持在单作玉米水平.

2.2 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量

综合单、间作玉米种植体系, 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 吸收量在 3 个施磷水平间无显著性差异(图 3). 在各施磷水平下, 相对于单作玉米, 与蚕豆、鹰嘴豆、大豆或油菜间作玉米并没有显著影响玉米籽粒 Fe 的吸收量(图 3). 玉米籽粒 Mn 和 Zn 的吸收量受到 3 种豆科作物的影响在 40 kg/hm² 磷肥用量时与单作

玉米相比增加, 在不施磷和 80 kg/hm² 时没有受到显著影响(除 80 kg/hm² 施磷量时与大豆间作玉米籽粒锌吸收量显著增加). 在不施磷时, 种间相互作用降低了与 3 种豆科间作的玉米籽粒 Cu 吸收量, 而在施磷时(40 和 80 kg/hm²), 种间作用则没有得以明显体现(图 3). 与白菜型油菜间作的玉米籽粒 Mn, Cu 和 Zn 的吸收量受到种间相互作用的影响, 在 0 和 40 kg/hm² 磷肥用量时得到促进, 而在 80 kg/hm² 磷肥用量时表现不明显(图 3).

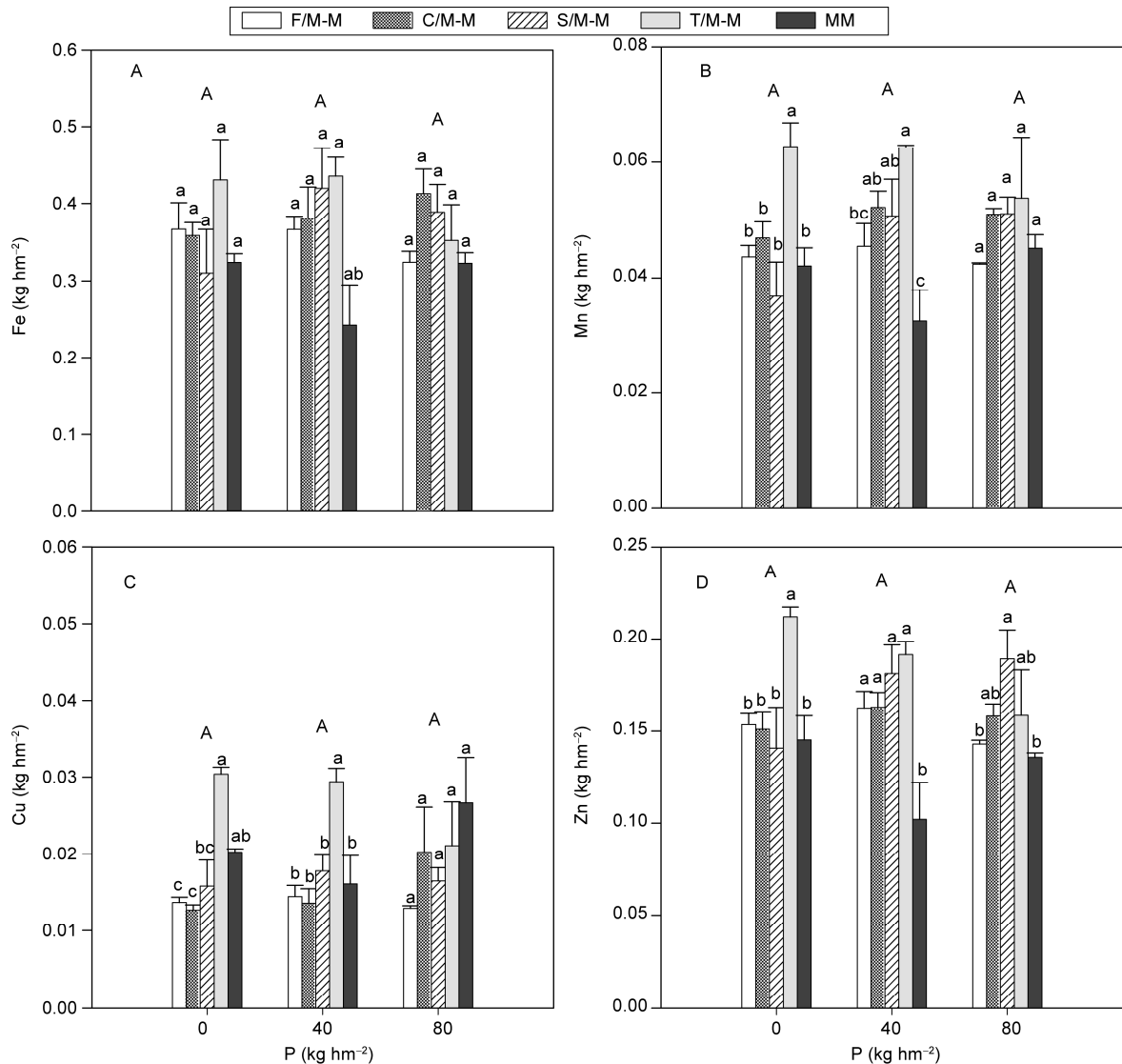


图 3 不同施磷水平下玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量

不同大写字母表示不同施磷水平在 LSD_{0.05} 水平差异显著, 相同施磷水平下不同小写字母表示不同玉米种植体系间在 LSD_{0.05} 差异显著; F/M-M, C/M-M, S/M-M, T/M-M 和 MM 分别表示与蚕豆、鹰嘴豆、大豆和白菜型油菜间作玉米及单作玉米

2.3 玉米地上部植株(籽粒+秸秆) Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量

综合单、间作玉米种植体系, 玉米地上部植株 Mn, Cu 和 Zn 的吸收量在施磷水平间无显著性差异, 而 Fe 的吸收量在 40 kg/hm² 磷肥用量时显著高于不施磷时(图 4)。综合 3 个磷水平, 单作玉米地上部 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量低于与白菜型油菜间作的玉米, 这种与白菜型油菜间作的玉米也低于其他间作玉米(图 4)。与蚕豆和大豆间作的玉米在施磷量为 80 kg/hm² 时, Fe 和 Cu 的吸收量显著高于单作玉米, 在不施磷和 40 kg/hm² 磷用量时则没有(图 4)。相对于单作玉米,

与鹰嘴豆间作玉米 Mn 的吸收量在 0 和 40 kg/hm² 磷肥用量时显著增加, 与蚕豆和大豆间作的玉米 Mn 的吸收量在 40 和 80 kg/hm² 磷用量时增加(图 4)。与蚕豆和鹰嘴豆间作玉米在 0 和 40 kg/hm² 磷肥用量时 Zn 的吸收量相对于单作玉米存在增加的趋势, 与蚕豆间作玉米在 80 kg/hm² 磷肥用量时与单作玉米相比显著增加, 与大豆间作的玉米 Zn 的吸收量在 40 和 80 kg/hm² 磷肥用量时均高于单作玉米(图 4)。

2.4 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的收获指数

综合单、间作玉米种植体系, 玉米籽粒 Fe, Mn,

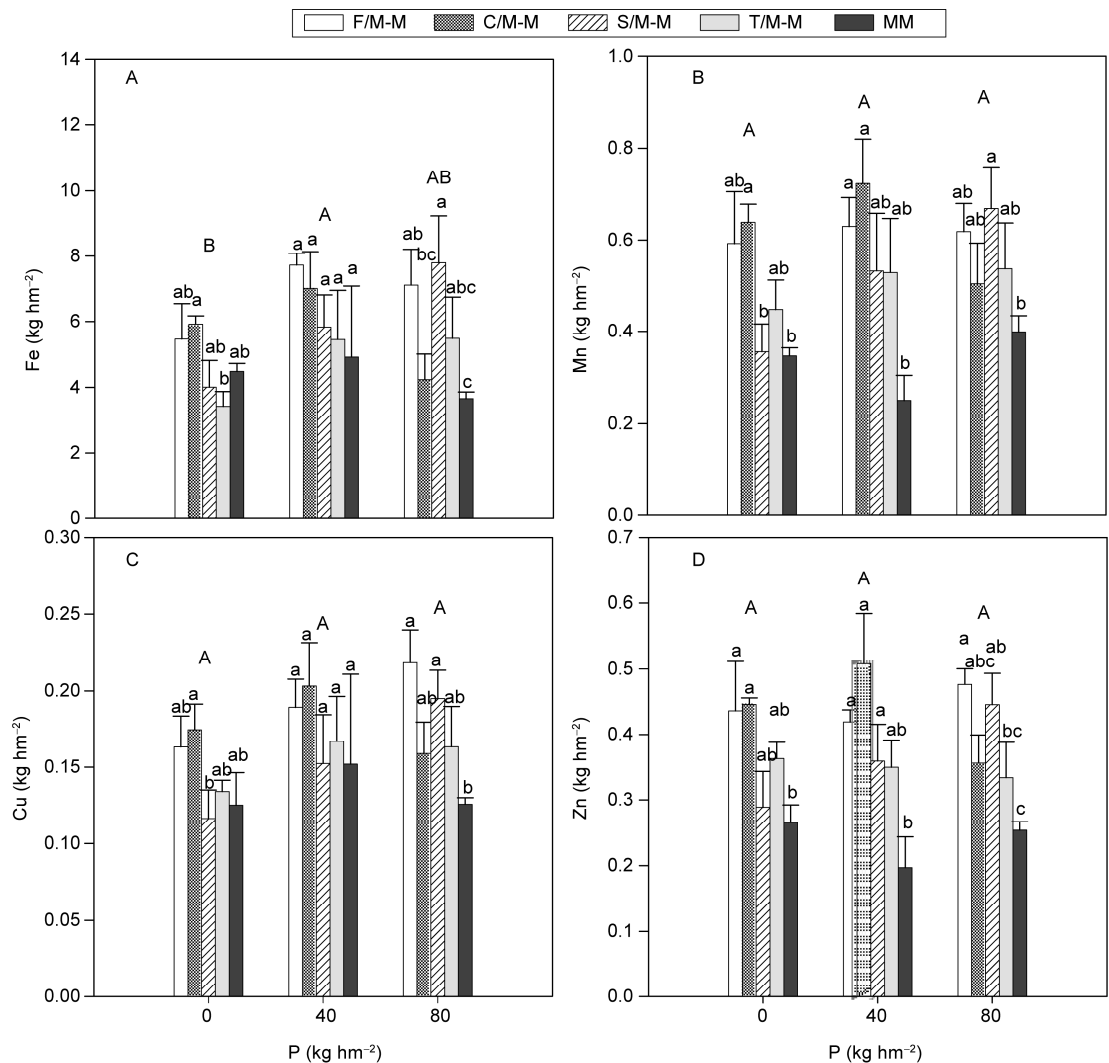


图 4 不同施磷水平下玉米地上部植株 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量

不同大写字母表示不同施磷水平间在 LSD_{0.05} 水平差异显著, 相同施磷水平下不同小写字母表示不同玉米种植体系间在 LSD_{0.05} 差异显著; F/M-M, C/M-M, S/M-M, T/M-M 和 MM 分别表示与蚕豆、鹰嘴豆、大豆和白菜型油菜间作玉米及单作玉米

Cu 和 Zn 收获指数在 3 个施磷水平下均无显著性差异(图 5). 综合 3 个施磷水平, 单作玉米 Mn, Cu 和 Zn 的收获指数和与白菜型油菜间作玉米 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的收获指数均存在高于与 3 种豆科作物间作玉米相应元素收获指数的趋势(图 5). 与蚕豆和大豆间作玉米 Fe 收获指数显著低于单作玉米(80 kg/hm²) (图 5). 与蚕豆间作玉米(40 和 80 kg/hm²)和与鹰嘴豆间作玉米(40 kg/hm²)时 Mn 的收获指数显著低于单作玉

米(图 5). 与蚕豆间作玉米(0 和 80 kg/hm²)、与鹰嘴豆间作玉米(0 kg/hm²)和与大豆间作玉米(80 kg/hm²) Cu 的收获指数显著降低(图 5). 间作玉米 Zn 的收获指数在与蚕豆(40 和 80 kg/hm²)、鹰嘴豆(0 kg/hm²)和大豆(80 kg/hm²)间作时显著降低(图 5). 除了不施磷时与白菜型油菜间作玉米 Fe 和 Cu 的收获指数显著高于单作玉米外, 其他情况下元素收获指数间无显著差异(图 5).

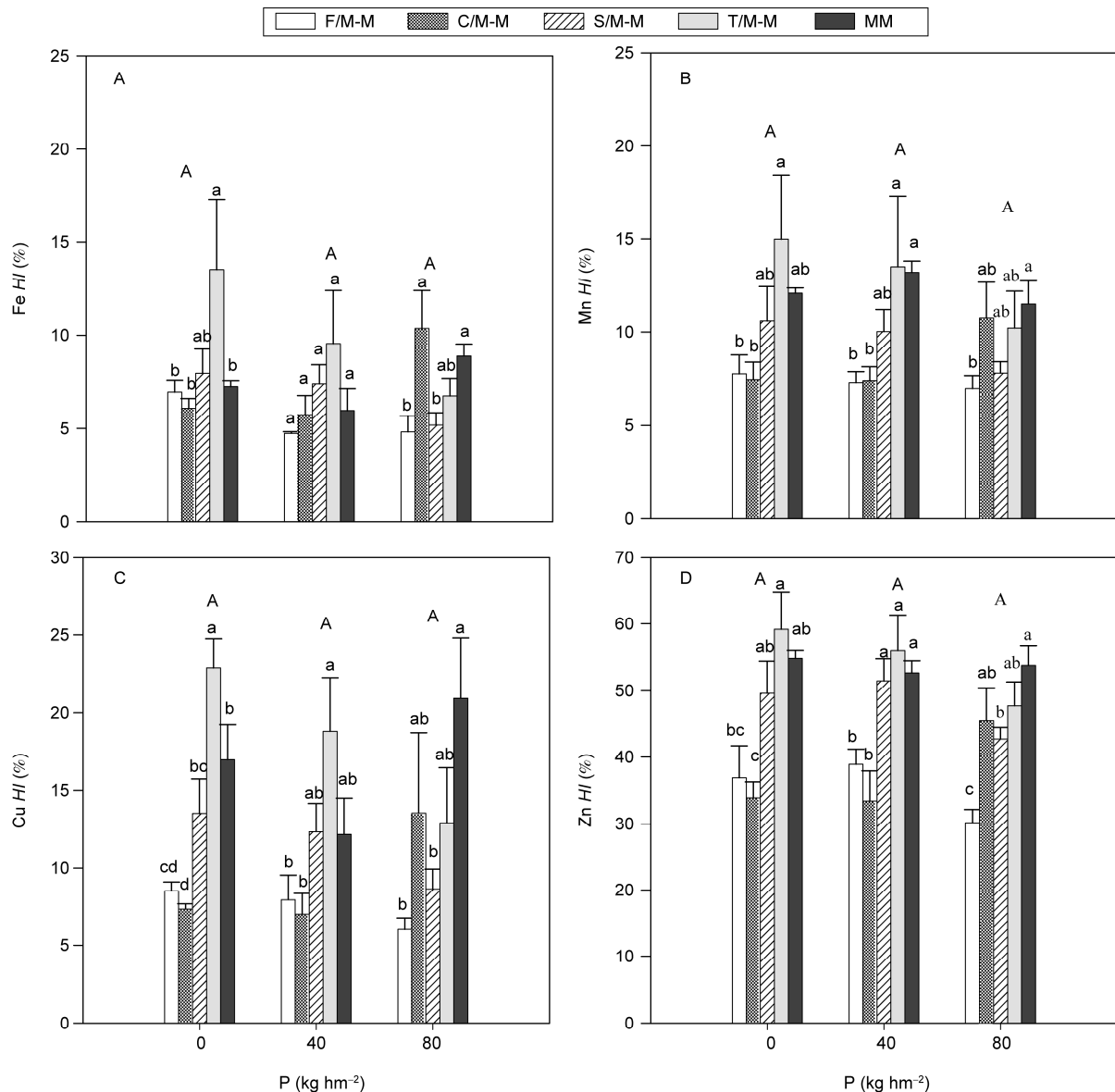


图 5 不同施磷水平下玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的收获指数

不同大写字母表示不同施磷水平间在 LSD_{0.05} 水平差异显著, 相同施磷水平下不同小写字母表示不同玉米种植体系间在 LSD_{0.05} 差异显著; F/M-M, C/M-M, S/M-M, T/M-M 和 MM 分别表示与蚕豆、鹰嘴豆、大豆和白菜型油菜间作玉米及单作玉米

2.5 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度与相应籽粒产量间的相关性

间作相对于单作具有较高的籽粒产量, 却降低了玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度(图 2 和 6). 不考虑磷水平和种植体系, 玉米籽粒 Fe 和 Cu 的浓度与相应籽粒产量间呈显著性线性负相关关系(图 6).

2.6 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度与相应元素收获指数间的相关性

研究表明, 综合单、间作玉米种植体系和磷水平, 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度与相应元素收获指数间均存在显著性线性正相关关系(图 7).

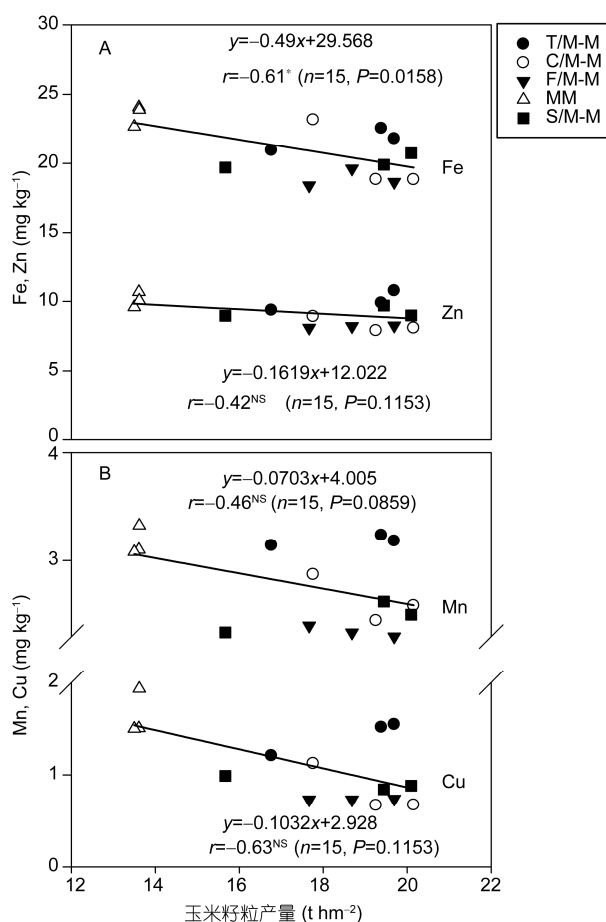


图 6 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度与相应籽粒产量间的相关性

NS: 统计分析不显著; *: $P < 0.05$ 水平显著; T/M-M, C/M-M, F/M-M, S/M-M 和 MM 分别表示与白菜型油菜、鹰嘴豆、蚕豆和大豆间作玉米及单作玉米

3 讨论

3.1 施磷量的影响

本研究中不同的磷肥用量对玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度、籽粒和地上部微量元素吸收量及 Fe, Mn, Cu 和 Zn 收获指数的影响可以忽略(图 2~5). 这可能主要是由于本实验开始之前农民传统过量的施肥致使土壤中累积了过量的磷素, 从而导致不同的磷肥用量对玉米籽粒产量没有显著影响(数据未列出).

3.2 玉米籽粒产量的提高与籽粒微量元素浓度降低的关系

研究表明, 与豆科配对的以玉米为主要作物的间作体系中间作玉米相对于单作玉米具有更高的籽粒产量^[4]. 本研究中与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作的玉米在保证高产的同时却大幅度降低了玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度(图 2), 据本实验室所知, 这是首次报道. 一种可能的解释是间作时较高的玉米籽粒产量会导致玉米籽粒微量元素浓度的“稀释效应”. 有研究报道玉米籽粒中 Zn 浓度的“稀释效应”是由氮肥施用导致较高的玉米籽粒产量所致^[10]. 多元回归分析表明, 产量和收获指数的增加是小麦籽粒矿物质浓度下降的重要影响因子^[17]. 另有研究表明, 由 CO₂ 升高引起的产量促进导致小麦籽粒 Zn 浓度的降低^[18].

在本研究里, 玉米籽粒产量的收获指数并没有受到间作的影响(数据未列出), Pearson 相关性分析也表明, 玉米籽粒产量的收获指数与籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度之间没有相关关系(表 1). 与此同时, 较高的间作玉米籽粒产量也不能充分解释玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的“稀释效应”. 尽管玉米籽粒 Fe 和 Cu 的浓度随着籽粒产量的升高而显著降低, 呈现显著的线性负相关关系, 但对于 Mn 和 Zn 而言这种线性负相关则不显著(图 6 和表 1). 因此, 由籽粒产量升高而引起的“稀释效应”似乎并不能解释本研究中玉米籽粒 Mn 和 Zn 浓度的降低. 有研究发现氮肥施用增加了玉米籽粒 Mn 的浓度^[10], 尽管增施氮肥能够显著改善产量, 玉米籽粒 Zn 的浓度却基本不受影响^[12].

尽管与白菜型油菜间作的玉米籽粒产量显著高于单作玉米, 但这并没有产生相应籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度的“稀释效应”, 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度维持在单作玉米的水平(图 2). 这同与蚕豆、鹰

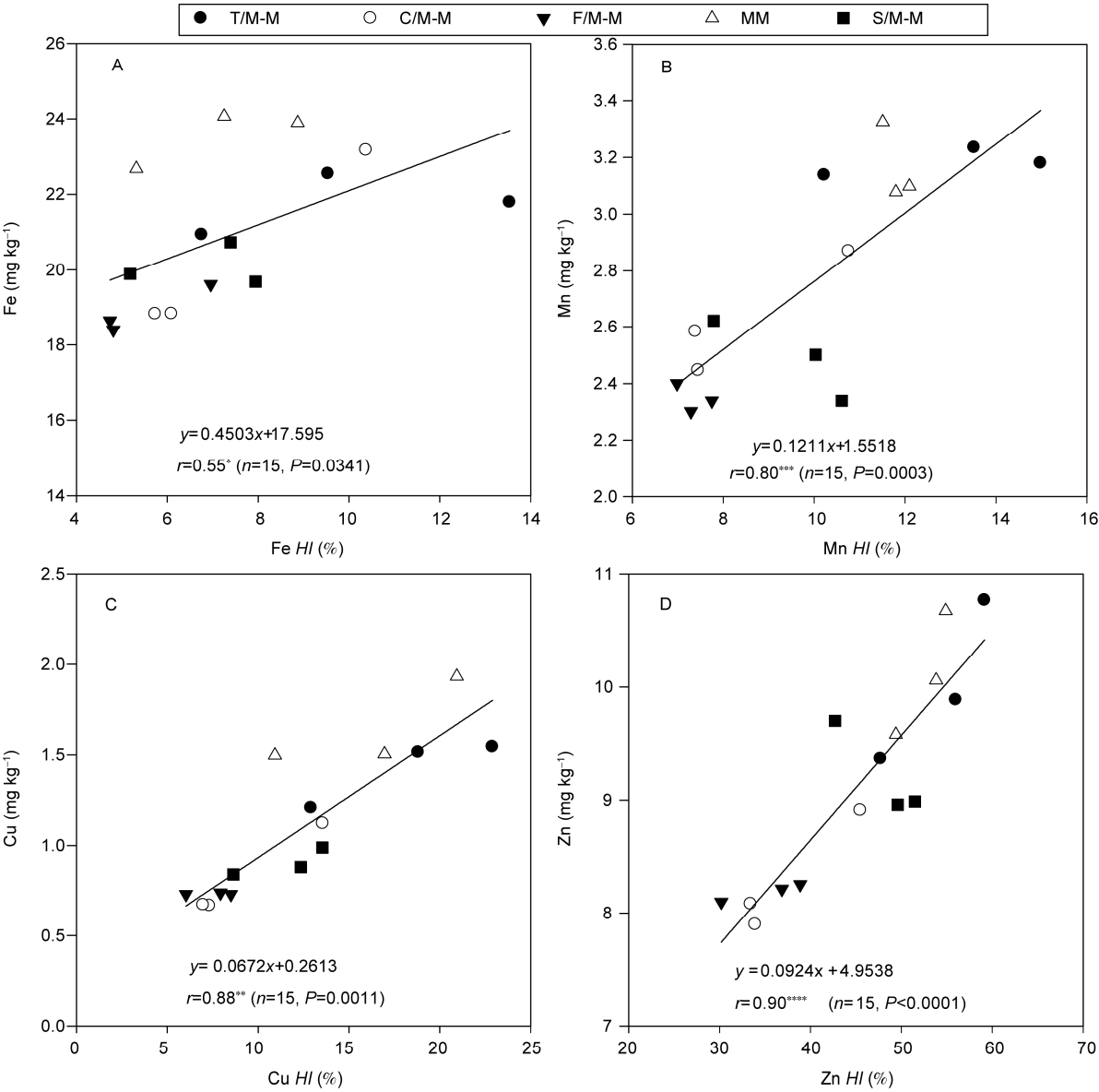


图 7 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度与相应元素收获指数间的相关性

NS: 表示统计分析不显著, *: $P<0.05$ 水平显著; **: $P<0.01$ 水平显著; ***: $P<0.001$ 水平显著; ****: $P<0.0001$ 水平显著; T/M-M, C/M-M, F/M-M, S/M-M 和 MM 分别表示与白菜型油菜、鹰嘴豆、蚕豆和大豆间作玉米及单作玉米

表 1 玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度与籽粒产量和收获指数的 Pearson 相关性分析^{a)}

玉米籽粒 微量元素	籽粒 产量	籽粒产量 (与白菜型油菜间作玉米除外)	籽粒产量 收获指数	Fe, Mn, Cu, Zn 收获指数
Fe	-0.610*	-0.750**	0.195 ^{NS}	0.549*
Mn	-0.458 ^{NS}	-0.751**	0.233 ^{NS}	0.802***
Cu	-0.629*	-0.883***	0.229 ^{NS}	0.881****
Zn	-0.424 ^{NS}	-0.722**	0.412 ^{NS}	0.896****

a) NS: 统计分析不显著; *: $P<0.05$ 水平显著; **: $P<0.01$ 水平显著; ***: $P<0.001$ 水平显著; ****: $P<0.0001$ 水平显著

嘴豆和大豆间作的玉米表现出来的现象截然不同。在图 6 中, 与白菜型油菜间作的玉米数据较远偏离其他间作玉米, 从而导致整体玉米籽粒产量和 Mn 或 Zn 浓度之间的线性负相关关系并不显著, 而如果去除这部分与白菜型油菜间作的玉米数据, 整体玉米籽粒产量和籽粒 Mn 或 Zn 浓度之间则呈现出显著的线性负相关关系(表 1)。

3.3 元素收获指数的降低和衰老程度的减缓可用来解释与豆科间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度的下降

玉米籽粒 Fe, Mn, Cu, Zn 浓度和相应的元素收获指数受不同间作体系的影响间存在相似的趋势, 3 个施磷水平平均下, 与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu, Zn 的浓度与对应的收获指数均低于单作玉米和与白菜型油菜间作的玉米(图 2 和 5)。进一步研究发现, 同玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度与籽粒产量或籽粒产量收获指数的相关性相比, Fe, Mn, Cu, Zn 浓度与对应收获指数之间呈现出显著的线性正相关关系, 而且显著性程度更高(表 1)。

单作玉米和间作玉米在籽粒产量的收获指数之间不存在显著性差异, 然而与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作玉米的 Mn, Cu, Zn 收获指数却明显低于单作玉米和与白菜型油菜间作的玉米(图 5), 这可能主要是由于与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作的玉米体内 Mn, Cu, Zn 从营养器官向籽粒的转移或再活化速率低于光合碳水化合物产物向籽粒的转移或分配的速率。有研究表明, 微量元素从营养器官往籽粒中的转移或再活化利用对籽粒微量元素浓度的影响具有重要作用。例如, 在高 N 和 Zn 肥施用情况下, 之前储存在营养器官的 60% Zn 和 40% Fe 可以再活化到小麦籽粒内, 而且在温室充足灌溉和 Zn 肥施用情况下, 高 N 肥施用能够促进营养器官对 Fe 和 Zn 的吸收和再活化^[19]; 田间试验的研究结果进一步证明增施 N 肥能提高籽粒 Fe 和 Zn 的浓度^[20]。另外, 关于微量元素稀释效应的解释有很多。因为 N 和 Zn 在很大程度上存在于玉米籽粒的外层, 籽粒越重就意味着胚乳在总籽粒重中所占的比例越高, 从而产生所谓的“稀释效应”^[21]。玉米籽粒数对产量“稀释效应”的贡献可能与较大的籽粒数目往往伴随着更多的籽粒末梢有关, 而这些籽粒末梢往往具有较低含量矿物质如锌等^[22]。有研究表明, 籽粒数目和质量与籽粒 Zn 浓度之间存在显著

的线性负相关关系^[18]。本研究结果表明, 玉米籽粒 Mn, Cu, Zn 甚至 Fe 浓度的降低是由玉米秸秆中 Mn, Cu, Zn 和 Fe 向籽粒中转移或再活化比例的降低造成的, 这点相比产量增加所产生的“稀释效应”的解释可能更为确切。

衰老导致大麦(*Hordeum vulgare*)源叶片中 Fe 的活化^[23]。调节衰老的 NAC 基因能够改善小麦籽粒蛋白质、Zn 和 Fe 的浓度, 而通过 RNA 干扰技术降低多重 NAM 同系物的 RNA 水平能够延迟小麦衰老 3 周, 并且降低小麦籽粒蛋白质、Zn 和 Fe 的浓度幅度达 30%^[24]。与之类似, 在本研究中玉米籽粒 Fe, Mn, Cu, Zn 的浓度和它们对应的收获指数的高低可能与玉米衰老程度的快慢或早晚有关。在玉米收获时, 田间观察发现与单作玉米和白菜型油菜间作玉米相比, 与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作的玉米仍保持较多的绿色叶片, 且单作玉米和与白菜型油菜间作的玉米要早熟一周左右(图 8), 结果导致玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 收获指数的降低, 从而导致对应玉米籽粒 Mn, Fe, Cu 和 Zn 浓度的降低。与本研究类似, 其他研究表明, 从开花到生理成熟期环境条件的不同或者生理成熟后的籽粒在田间植株上保持时间的长短不同, 以及基因型与收获时间的不同均会对玉米籽粒微量元素浓度和生物有效性产生不同的影响^[25,26]。当然也有研究表明, 虽然合理的氮肥供应也能够延缓玉米衰老^[27], 玉米籽粒 Fe 的浓度仍然会升高^[20]。本研究中的结果需要在不同的环境条件下(如不同的收获时间和不同的年际间等)进一步验证, 同时与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作的玉米秸秆中累积较高比例的 Mn, Cu, Zn 甚至 Fe 含量的同时, 籽粒 Mn, Cu, Zn 甚至 Fe 浓度降低的机制仍需要深入研究。

3.4 Fe, Mn, Cu 和 Zn 吸收量的增加及其可能机制

综合 3 个施磷水平, 尽管与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度相对于单作玉米降低(图 2), 但对应的玉米籽粒 Fe, Mn 和 Zn 的吸收量却没有降低, 反而会略有增加(图 3), 而且间作促进了与蚕豆、鹰嘴豆和大豆间作的玉米地上部植株(籽粒+秸秆) Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量(图 4); 另外, 与白菜型油菜间作玉米籽粒和地上部植株整体 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的吸收量也均有增加的趋势(图 3 和 4)。

2 个主要的原因可以解释上述间作玉米对土壤中 Fe, Mn, Cu 和 Zn 较高的吸收能力。首先, 间作能



图 8 田间条件下收获的玉米地上部茎叶长势

促进玉米根系酸性磷酸酶和有机酸的分泌, 这可能影响土壤中 Fe, Mn, Cu, Zn 的有效性, 从而能促进间作玉米对土壤微量元素的吸收^[4], 这一点还有待于深入研究和证实. 另一方面的原因是间作玉米相对于

单作玉米具有较大的根系空间分布面积和较长的根系寿命, 因此能够促进间作玉米获取充足的微量元素和氮磷钾等养分^[28]. 有研究表明间作后玉米籽粒铬(Cr)的浓度会降低^[7]. 这与本研究中 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的研究一致(图 2). 作为重金属污染土壤的修复, 间作玉米可以获得安全的籽粒供人体食用^[7], 而对于玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn, 蚕豆、鹰嘴豆和大豆与玉米间作可能不利于玉米籽粒微量元素的“生物强化”. 以后的研究应该关注玉米籽粒整体 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度的降低是否在胚乳中也有类似的现象, 而且籽粒中 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的生物有效性及分型是否也会受到间作的影响.

本研究中单作玉米和间作玉米同时种植而且同时收获. 不同的配对作物(具有不同的株型结构、种植和收获时间)对玉米籽粒微量元素营养的影响不同, 与单作玉米相比, 与 3 种豆科作物间作的玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度和相应的元素收获指数降低, 而与白菜型油菜间作玉米则维持在单作玉米水平.

据报道, 在中性和碱性土壤上玉米间作可以矫正豆科作物缺 Fe 黄化的症状, 并提高其籽粒 Fe 的浓度^[6]. 本研究的目的是研究不同配对作物对间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的浓度及相应地上部吸收量的影响; 因此, 本研究没有测定配对作物植株体内微量元素营养情况. 对于以后的研究, 建议同时研究与玉米配对作物的微量元素营养状况, 这样可以更好理解间套作对整个体系作物微量元素营养状况的影响.

参考文献

- 1 Vandermeer J. The Ecology of Intercropping. New York: Cambridge University Press, 1989
- 2 Knoerzer H, Graeff-Hoenninger S, Guo B, et al. The rediscovery of intercropping in China: a traditional cropping system for future chinese agriculture—A review. In: Lichtfouse E, ed. Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms. New York: Springer, 2009. 13–44
- 3 Hauggaard-Nielsen H, Jensen E S. Facilitative root interactions in intercrops. Plant Soil, 2005, 274: 237–250
- 4 Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 11192–11196
- 5 Römheld V, Marschner H. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses. Plant Physiol, 1986, 80: 175–180
- 6 Zuo Y M, Zhang F S, Li X L, et al. Studies on the improvement in iron nutrition of peanut by intercropping with maize on a calcareous soil. Plant Soil, 2000, 220: 13–25
- 7 An L Y, Pan Y H, Wang Z B, et al. Heavy metal absorption status of five plant species in monoculture and intercropping. Plant Soil, 2011, 345: 237–245
- 8 White P J, Broadley M R. Biofortifying crops with essential mineral elements. Trends Plant Sci, 2005, 10: 586–593
- 9 Pixley K V, Palacios-Rojas N, Glahn R P. The usefulness of iron bioavailability as a target trait for breeding maize (*Zea mays* L.) with enhanced nutritional value. Field Crop Res, 2011, 123: 153–160

- 10 Feil B, Moser S B, Jampatong S, et al. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization. *Crop Sci*, 2005, 45: 516–523
- 11 Bouis H E, Hotz C, McClafferty B, et al. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food Nutr Bull*, 2011, 32: S31–S40
- 12 Bruns H A, Ebelhar M W. Nutrient uptake of maize affected by nitrogen and potassium fertility in a humid subtropical environment. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2006, 37: 275–293
- 13 Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. *Plant Soil*, 2011, 349: 157–167
- 14 Cordell D, Drangert J O, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Glob Environ Change*, 2009, 19: 292–305
- 15 Stukenho D D, Olsen R J, Gogan G, et al. On the mechanism of phosphorus-zinc interaction in corn nutrition. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1966, 30: 759–763
- 16 Ryan M H, McNerney J K, Record I R, et al. Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi. *J Sci Food Agric*, 2008, 88: 1208–1216
- 17 Fan M S, Zhao F J, Fairweather-Tait S J, et al. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *J Trace Elem Med Bio*, 2008, 22: 315–324
- 18 Pleijel H, Danielsson H. Yield dilution of grain Zn in wheat grown in open-top chamber experiments with elevated CO₂ and O₃ exposure. *J Cereal Sci*, 2009, 50: 278–282
- 19 Kutman U, Yildiz B, Cakmak I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant Soil*, 2011, 342: 149–164
- 20 Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *J Agric Food Chem*, 2010, 58: 9092–9102
- 21 Peterson C J, Johnson V A, Mattern P J. Evaluation of variation in mineral element concentrations in wheat-flour and bran of different cultivars. *Cereal Chem*, 1983, 60: 450–455
- 22 Calderini D F, Ortiz-Monasterio I. Grain position affects grain macronutrient and micronutrient concentrations in wheat. *Crop Sci*, 2003, 43: 141–151
- 23 Shi R L, Weber G, Koster J, et al. Senescence-induced iron mobilization in source leaves of barley (*Hordeum vulgare*) plants. *New Phytol*, 2012, 195: 372–383
- 24 Uauy C, Distelfeld A, Fahima T, et al. A *NAC* gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. *Science*, 2006, 314: 1298–1300
- 25 Oikeh S O, Menkir A, Maziya-Dixon B, et al. Genotypic differences in concentration and bioavailability of kernel-iron in tropical maize varieties grown under field conditions. *J Plant Nutr*, 2003, 26: 2307–2319
- 26 Oikeh S O, Menkir A, Maziya-Dixon B, et al. Environmental stability of iron and zinc concentrations in grain of elite early-maturing tropical maize genotypes grown under field conditions. *J Agric Sci*, 2004, 142: 543–551
- 27 何萍, 金继运, 林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究. *中国农业科学*, 1998, 31: 66–71
- 28 Li L, Sun J H, Zhang F S. Intercropping with wheat leads to greater root weight density and larger below-ground space of irrigated maize at late growth stages. *Soil Sci Plant Nutr*, 2011, 57: 61–67