

旱地小麦锌吸收转移与籽粒锌含量的关系

丁玉兰¹, 黄翠¹, 方佳创¹, 李文虎¹, 王星舒¹, 张学美¹, 党海燕¹, 孙蕊卿¹,
杨珺¹, 徐隽峰¹, 罗一诺¹, 李小涵¹, 石美¹, 王朝辉^{1,2*}

(1 西北农林科技大学资源环境学院 / 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2 西北农林科技大学作物抗逆与高效生产全国重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】黄土高原旱地小麦籽粒锌含量较低, 明确土施锌肥引起的小麦花前花后锌吸收转移和籽粒锌含量的变化, 及其与土壤锌形态及有效性关系, 为优化旱地小麦锌营养强化技术提供科学依据。【方法】基于 2017 年在黄土高原旱地石灰性土壤上开始的定位试验, 于 2021—2022 和 2022—2023 年两个小麦生长季取样, 研究锌肥用量对土壤有效锌及锌形态、小麦花前花后锌吸收转移及籽粒锌含量的影响。【结果】施用锌肥对小麦产量无显著影响, 但两季小麦籽粒锌含量分别提高 44.7% 和 38.2%, 施锌 25.6 kg/hm² 时, 籽粒锌含量最高达 33.6 mg/kg, 花前锌吸收量分别提高 38.8%~83.7% 和 13.4%~49.0%, 花后锌转移量分别提高 36.0%~73.9% 和 13.0%~39.6%; 施锌对小麦花后锌吸收量的影响因年份而异。表层 0—20 和 20—40 cm 土壤有效锌含量分别提高 11.6 和 11.3 倍, 最高分别达 9.20 和 3.57 mg/kg, 深层 40—60、60—80 和 80—100 cm 土壤有效锌含量分别提高 4.4、1.8 和 1.9 倍, 最高分别达 0.54、0.28 和 0.29 mg/kg。施用锌肥显著提高了土壤各形态锌含量, 0—20 和 20—40 cm 土层水溶态锌分别提高 54.5% 和 75.0%, 达 0.17 和 0.14 mg/kg; 松结有机态锌分别提高 214.9% 和 90.8%, 达 5.70 和 3.11 mg/kg; 碳酸盐结合态锌分别提高 1178.0% 和 551.7%, 达 5.24 和 1.89 mg/kg; 氧化锰结合态锌分别提高 345.9% 和 183.9%, 达 15.52 和 9.37 mg/kg; 紧结有机态锌分别提高 91.5% 和 34.4%, 达 1.13 和 0.86 mg/kg; 残渣态锌分别提高 23.7% 和 24.3%, 达 56.57 和 56.80 mg/kg。【结论】施锌显著提高了土壤松结有机态、碳酸盐结合态和氧化锰结合态锌含量, 并通过其向水溶态锌转化, 维持了施锌后表层土壤有效锌提升和施入土壤的肥料锌的有效性, 促进了小麦花前锌吸收, 实现了花后地上部锌向籽粒的转移及籽粒锌含量提升, 但干旱缺水影响了旱地小麦花后锌吸收, 抑制了施锌后籽粒锌含量进一步提升。

关键词: 旱地; 小麦; 籽粒锌; 吸收转移; 土壤有效锌; 锌形态

Relationships of grain zinc concentration with wheat zinc uptake and translocation in dryland

DING Yu-lan¹, HUANG Cui¹, FANG Jia-chuang¹, LI Wen-hu¹, WANG Xing-shu¹, ZHANG Xue-mei¹, DANG Hai-yan¹,
SUN Rui-qing¹, YANG Jun¹, XU Jun-feng¹, LUO Yi-nuo¹, LI Xiao-han¹, SHI Mei¹, WANG Zhao-hui^{1,2*}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University / Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Northwest A & F University / State Key Laboratory for Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】Understanding the response of pre- and post-anthesis zinc (Zn) uptake and translocation in wheat to Zn fertilizer input and grain Zn concentration and their relationships with soil Zn fractions and its availability is of great importance to achieve grain Zn biofortification in drylands, particularly in the Loess Plateau where Zn is deficient in wheat grain. 【Methods】Based on the location-fixed field experiment initiated in 2017 on dryland of the Loess Plateau, soil Zn fractions and availability, pre- and post-anthesis Zn uptake and transportation and grain Zn concentrations of wheat were analyzed under different Zn application rates

收稿日期: 2024-03-11 接受日期: 2024-07-28

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-3)。

联系方式: 丁玉兰 E-mail: 2830709758@qq.com; * 通信作者 王朝辉 E-mail: w-zhaohui@263.net

in the cropping seasons of 2021–2022 and 2022–2023. **【 Results 】** Results showed that Zn application did not significantly affect grain yield, but grain Zn concentration was increased by 44.7% and 38.2% in two seasons, with the highest of 33.6 mg/kg at Zn 25.6 kg/hm² application. Correspondingly, pre-anthesis Zn uptake was increased respectively by 38.8%–83.7% and 13.4%–49.0% in two seasons, post-anthesis Zn translocation was increased by 36.0%–73.9% and 13.0%–39.6%; while effects of Zn application on post-anthesis Zn uptake changed with years. Soil available Zn was increased by 11.6 and 11.3 times respectively in the top soil layers of 0–20 and 20–40 cm, with the highest available Zn concentrations of 9.20 and 3.57 mg/kg. Correspondingly, the increases of 4.4, 1.8, and 1.9 times respectively in the deep soil of 40–60, 60–80, and 80–100 cm, with the highest available Zn concentrations of 0.54, 0.28, and 0.29 mg/kg. Zinc fractions also significantly changed with Zn application. Water-soluble Zn was increased by 54.5% and 75.0% and maximized to 0.17 and 0.14 mg/kg, Zn weakly bound to organic matter was increased by 214.9% and 90.8% and maximized to 5.70 and 3.11 mg/kg, carbonate bound Zn was increased by 1178.0% and 551.7% and maximized to 5.24 and 1.89 mg/kg, manganese oxide bound Zn was increased by 345.9% and 183.9% and maximized to 15.52 and 9.37 mg/kg, Zn strongly bound to organic matter was increased by 91.5% and 34.4% and maximized to 1.13 and 0.86 mg/kg, and residue mineral Zn was increased by 23.7% and 24.3% and maximized to 56.57 and 56.80 mg/kg in the soil layer of 0–20 and 20–40 cm, respectively. **【 Conclusions 】** Zn fertilizer application not only increased the concentration of Zn weakly bound to organic matter, carbonate bound Zn and manganese oxide bound Zn in soil but also promoted their transformation into a higher available fraction as water-soluble Zn, and this consequently could sustain the available Zn pool in top soil. The enhanced soil available Zn supply could increase wheat grain Zn concentration due to the promoted pre-anthesis Zn uptake and its transfer of Zn from shoot to grain post-anthesis, while the post-anthesis Zn uptake was inhibited by the inherent drought in dryland, the further grain Zn fortification with Zn fertilizer application was limited for wheat grown on the Loess Plateau.

Key words: dryland; wheat; grain zinc; zinc uptake and translocation; soil available zinc; zinc fractions

锌是植物和人体必需的微量营养元素, 在细胞发育和新陈代谢中起着重要作用^[1]。人体缺锌会导致生长缓慢、智力发育迟缓、免疫力下降, 以及 DNA 损伤和癌症风险增加等。小麦作为三大粮食作物之一, 提供全球人口 20% 的膳食热量和蛋白质需求。在以小麦为主食的地区, 可提供人体锌摄入量 40% 以上^[2]。然而, 世界近 50% 的谷物种植区土壤有效锌含量低, 导致谷物锌含量较低^[3]。我国小麦籽粒锌含量较低, 平均为 20~30 mg/kg, 远低于人类营养健康推荐的含量值 40~60 mg/kg^[4-5], 不能满足人体锌营养需求。因此, 通过农艺生物强化措施提高小麦籽粒锌含量, 对缓解人体锌营养不良问题有重要意义。

土施锌肥是增加作物锌吸收, 改善作物缺锌最直接有效的措施。河北曲周的田间试验表明, 在有效锌为 0.45 mg/kg 的土壤上, 施锌 (Zn) 34.1 kg/hm² 使第一季小麦籽粒锌含量提高 5.7%~134.0%, 达 57.1 mg/kg, 第二季籽粒锌含量提高 20.7%~141.8%, 达 63.1 mg/kg, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 籽粒锌含

量平均提高 1.1 mg/kg^[6]; 江苏如皋田间试验表明, 在有效锌为 1.4 mg/kg 的土壤上, 施锌 67.9 kg/hm² 使第一季小麦籽粒锌含量提高 37.4%, 达 63.2 mg/kg, 第二季籽粒锌含量提高 81.8%, 达 58.0 mg/kg, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 籽粒锌含量平均提高 0.4 mg/kg^[7]; 土耳其科尼亚的研究表明, 在有效锌为 0.12 mg/kg 的土壤上施锌 22.6 kg/hm², 籽粒锌含量提高 80.0%, 仅达 18.0 mg/kg, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 籽粒锌含量平均提高 0.4 mg/kg^[8]; 陕西永寿的试验表明, 在有效锌为 0.37 mg/kg 的石灰性土壤上, 施锌 34.2 kg/hm² 使第一季小麦籽粒锌含量提高 32.0%, 达 19.8 mg/kg, 第二季籽粒锌含量提高 44.0%, 达 32.1 mg/kg, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 籽粒锌含量平均提高 0.22 mg/kg^[9]。可见, 各地点增施锌肥对小麦籽粒锌含量的影响存在差异。

土壤锌的有效性是影响小麦锌营养的主要原因, 与土壤 pH、CaCO₃、有机质及土壤全锌含量有关, 有效锌含量高低直接影响小麦籽粒锌含量^[10]。一般而言, 土壤锌有效性在酸性土壤中较高, 在中性

和碱性土壤中由于锌的络合作用产生氢氧化物沉淀和锌的吸附固定作用,降低锌的活性^[11-12]。另外,锌有效性还与土壤全锌及不同锌形态有关,土壤全锌中 90% 的锌固定在氧化物和硅酸盐矿物中,有效性较低^[13-14]。土壤中的锌以水溶态、交换态、碳酸盐结合态、松结有机态、氧化锰结合态、紧结有机态及残渣态形式存在,其中,水溶态和交换态锌最容易被植物直接吸收利用,氧化锰结合态和碳酸盐结合态为重要的锌库^[15-16]。除土壤因素外,小麦籽粒锌含量还与根系锌吸收及锌从营养器官向籽粒的转移分配有关^[17-18]。河北曲周的试验表明,施锌 34.1 kg/hm² 使两季小麦花前锌吸收量分别提高 166.3% 和 193.4%,达 506 和 672 g/hm²,对籽粒锌累积贡献度平均为 129.2%,花后锌吸收量分别提高 288.3% 和 333.2%,达 299 和 364 g/hm²,对籽粒锌累积贡献度平均为 72.7%^[6]。河北的另一研究表明,施锌 7.7 kg/hm²,小麦花前锌吸收量提高 28.6%,达 240.5 g/hm²,花后锌吸收量提高 20.1%,达 103.64 g/hm²,对籽粒锌累积贡献度分别为 112.8% 和 48.6%^[19]。可见,施锌后小麦籽粒锌含量提升与花前和花后锌吸收转移及土壤锌有效性有关。

黄土高原旱地石灰性土壤上,有效锌含量低于 0.5 mg/kg,增施锌肥后小麦籽粒锌含量未达到营养推荐值 40~60 mg/kg^[9]。这与土壤有效锌及小麦锌吸收转移是否有关?土施锌肥如何影响小麦花前花后锌吸收转移?对土壤有效锌及不同锌形态的影响如何?土壤有效锌及不同锌形态的变化与小麦锌吸收转移是什么关系?这些问题还缺乏系统研究。因此,通过黄土高原旱地小麦锌肥用量定位试验,研究石灰性土壤上土施锌肥对小麦产量、籽粒锌含量及花前花后锌吸收转移的影响,分析小麦锌吸收转移与锌肥用量、土壤不同锌形态及 0—100 cm 不同土层土壤有效锌含量的关系,以期调控旱地小麦锌吸收转移与籽粒锌含量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

在陕西省永寿县御驾宫村 (34°43'N, 108°10'E, 海拔 972 m) 开展田间试验,年平均气温 10.5℃、降雨量 537 mm。试验始于 2017 年,本研究分别在 2021—2022 和 2022—2023 年两个小麦生长季采集植物和土壤样品。两个生长年份的休闲期 (小麦播前的 7—9 月) 和生育期 (10 月—次年 6 月) 降水量如图 1

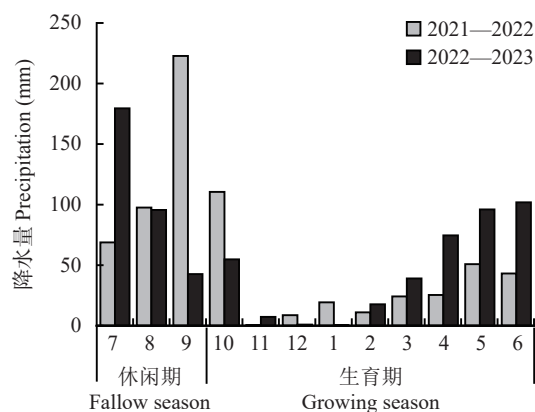


图 1 2021—2022 和 2022—2023 年冬小麦休闲期 (7—9 月) 和生长期 (10 月—次年 6 月) 降水量
Fig. 1 Precipitation during the fallow (Jul.–Sept.) and growing seasons (Oct.–Jun. in next year) of winter wheat in 2021–2022 and 2022–2023

所示。该地区土壤为石灰性土壤,0—20 cm 土壤的理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计与样品采集测定

1.2.1 试验设计 试验采用完全随机设计,设置 5 个锌 (Zn) 水平: 0、6.8、13.6、20.5 和 27.3 kg/hm²,每个处理 5 次重复,每小区均施 N 180 kg/hm²、P₂O₅ 100 kg/hm²。供试氮、磷、锌肥分别为尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12%)、七水硫酸锌 (ZnSO₄·7H₂O, Zn 22.75%)。自 2017 年起,每年氮、磷和锌肥均于小麦播前一次性撒施,然后旋耕 20 cm 与表土混合。小区面积为 128 m² (16.0 m × 8.0 m)。种植制度为冬小麦—夏休闲。小麦品种为‘洛旱 6 号’,每年 10 月中上旬播种,次年 6 月中上旬收获,根据天气条件适当调整每年播期,播量 135~195 kg/hm²,常规平作条播。行距 15 cm,播种深度 5 cm,整个生育期无灌溉,其他田间管理与农户一致。

1.2.2 小麦植物样品采集与测定 于小麦开花期 (5 月初) 和收获期 (6 月中旬),在每个小区随机选取长势均匀的区域分别采集 15 和 100 株,连根拔起,用不锈钢剪刀于根茎结合处将根剪下,记录茎数和穗数后,分别剪至 1 cm 样段,混合均匀,装入已编号的塑料袋中,称量鲜重;成熟期小麦地上部分为茎叶和穗,待样品风干后,称量茎叶和穗风干重并记录,手工脱粒,称量籽粒重,颖壳重为穗重和籽粒重的差值,称取约 35 g 茎叶、颖壳、籽粒和穗依次用自来水和蒸馏水清洗 3 遍,于 65℃ 烘干至恒重,测定含水量。烘干样品用研磨仪 (Retsch MM400, 德国,氧化锆罐) 研磨并密封保存。称取 0.2000~

表 1 田间定位试验不同施锌处理 0—20 cm 土层土壤的基本化学性状

Table 1 Basic chemical properties of the 0–20 cm soil layer treated with different Zn rates in the location-fixed field experiment

年份 Year	施锌量 Zn rate (kg/hm ²)	pH	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	有效锌 Available Zn (mg/kg)
2017		8.30	11.8	0.80	9.42	0.27	10.83	123.34	0.24
2022	0.0	8.32	13.67	0.89	7.06	1.75	11.48	135.14	0.71
	6.8	8.27	12.26	0.91	6.53	1.17	12.91	131.72	2.38
	13.6	8.31	13.11	0.94	7.91	2.15	12.09	128.85	4.20
	20.5	8.30	13.92	0.97	7.94	2.31	13.18	130.96	6.76
	27.3	8.30	12.59	0.88	7.15	2.64	12.95	132.74	9.47
2023	0.0	8.43	13.65	0.95	6.17	0.98	12.51	138.61	0.56
	6.8	8.41	13.77	0.96	4.75	1.23	14.15	135.08	3.12
	13.6	8.41	13.43	0.93	5.19	2.09	12.88	129.91	4.28
	20.5	8.42	13.78	0.97	5.13	2.34	12.96	133.99	7.03
	27.3	8.40	13.84	0.97	5.26	2.76	14.98	137.27	8.93

注: 2017年指试验开始前土壤基本理化性质, 其他数据为2021—2022和2022—2023年成熟期不同施锌处理下土壤的相关数据。
Note: In the row of 2017, data refer to the basic chemical properties of the top soil in October of 2017 when the long-term Zn fertilizer experiment was initiated, and the others are those at harvest and at different Zn application rates of 2021–2022 and 2022–2023.

0.2500 g 研磨样品, 用浓 HNO₃-H₂O₂ 法微波消解, 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, 美国) 测定消解液中的锌浓度。收获期, 于每个处理所在小区随机收获 4 个 1.0 m × 1.0 m 的样方小麦, 风干脱粒后于 65℃ 烘 48 h, 测定小麦产量^[20]。

1.2.3 土壤样品采集处理与测定 小麦成熟期, 在每个小区随机选择 5 个采样点, 于小麦行间分别采集 0—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层土壤样品, 去除杂质, 混合均匀后装入塑料袋密封保存。土样风干后, 研磨过 1 mm 和 0.15 mm 尼龙网筛。过 1 mm 筛的土样用以测定硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾含量, 和有效铁、锰、铜、锌含量及 pH, 过 0.15 mm 筛土样用来测定有机质和全氮含量。土壤硝态氮、铵态氮和有效磷分别采用 1 mol/L KCl 和 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 连续流动分析仪 (SEAL Analytical AA3, 德国) 测定。土壤速效钾采用 1 mol/L 的 NH₄OAc 浸提, 火焰光度计 (Sherwood M410, 英国) 测定。土壤有效铁、锰、铜、锌采用 DTPA-TEA 浸提, 原子吸收分光光度计 (Z-2000, Hitachi, 日本) 测定。土壤有机质和全氮采用全自动碳氮分析仪 (Primacs SNC 100-IC-E, 荷兰) 测定。土壤 pH 用自动 pH 分析计测定, 水土比为 2.5 : 1.0^[21]。

土壤全锌含量采用高氯酸和王水消化后测定。土壤锌形态分级采用前人^[22–24]的方法, 具体步骤如

下: 将 2.0 g 土样 (0.15 mm) 加入 50 mL 的聚氯乙烯离心管中, 分别用不同的浸提剂依次提取以下组分。1) 水溶态锌 20 mL 去离子水 (pH 7.0) 在室温 (25℃) 下震荡 30 min, 漂洗; 2) 交换态锌 20 mL 1.0 mol/L Mg(NO₃)₂ (pH 7.0) 在室温 (25℃) 下震荡 30 min, 漂洗; 3) 碳酸盐结合态锌 20 mL 1.0 mol/L CH₃COONa·H₂O (pH 5.0) 在室温 (25℃) 下震荡 30 min, 漂洗; 4) 松结有机态锌 40 mL 0.1 mol/L Na₄PO₇ (pH 10.0) 在室温 (25℃) 下震荡 40 min, 漂洗; 5) 铁锰氧化物结合态锌 40 mL 0.25 mol/L HONH₃Cl 在室温 (25℃) 下震荡 1 h, 漂洗; 6) 紧结有机态锌 先用 3 mL 30% H₂O₂ (pH 2.0) 在 85℃ 下氧化至干燥, 再加入 5 mL 30% H₂O₂ (pH 2.0) 在 85℃ 下氧化至干燥, 然后加入 25 mL 1.0 mol/L Mg(NO₃)₂ (pH 7.0) 在室温 (25℃) 下震荡 30 min, 漂洗; 7) 残渣态锌 由土壤全锌与上述各锌形态之和的差值计算。各形态锌的浸提液均过 0.22 mm 滤膜, 然后用原子吸收光谱仪测定 (Z-2000, Hitachi, 日本)。

1.3 数据计算与统计分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理, Origin 2021 作图, IBM SPSS Statistics 26 进行方差分析和相关回归分析, 随机森林分类模型分析土壤不同形态锌对小麦花前花后锌吸收转移的影响。相关指标

计算如下:

花前锌吸收量=花期地上部(茎叶、穗)锌吸收量;

花期地上部锌吸收量=茎叶锌含量×茎叶生物量+穗锌含量×穗生物量;

花后锌吸收量=成熟期地上部(茎叶、颖壳、籽粒)锌吸收量-花期地上部(茎叶、穗)锌吸收量;

花后锌转移量=花期地上部(茎叶、穗)锌吸收量-成熟期器官(茎叶、颖壳)锌吸收量;

花后锌转移效率(%)=花后锌转移量/花期地上部(茎叶、穗)锌吸收量×100;

花后锌转移贡献率(%)=花后锌转移量/籽粒锌吸收量×100;

花后锌吸收贡献率(%)=花后锌吸收量/籽粒锌吸收量×100;

成熟期地上部锌吸收量=籽粒锌含量×籽粒产量+茎叶锌含量×茎叶生物量+颖壳锌含量×颖壳生物量。

式中,吸收量、转移量单位为 g/hm²,含量单位为 mg/kg,产量和生物量单位为 kg/hm²。

2 结果与分析

2.1 小麦产量和籽粒锌含量与施锌量的关系

始于 2017 年的锌肥用量定位试验结果表明,随施锌量增加,2022 和 2023 年小麦产量均无显著变化,籽粒锌含量有显著提高(图 2)。2022 和 2023 年小麦平均产量分别为 10587 和 7163 kg/hm²,两年平

均为 8672 kg/hm²。回归分析结果表明,2022 年施锌量 24.9 kg/hm² 时,小麦籽粒锌含量最高为 31.1 mg/kg,比不施锌处理增加 44.7%;2023 年施锌量 27.0 kg/hm² 时,籽粒锌含量最高为 34.7 mg/kg,比不施锌增加 38.2%;由两年数据平均得出,施锌量 25.6 kg/hm² 时,籽粒锌含量最高 33.6 mg/kg,比不施锌增加 42.4%,施锌量每增加 1.0 kg/hm²,籽粒锌含量均提高 0.7 mg/kg。可见,在旱地石灰性土壤上,施锌虽未提高小麦产量,却显著增加了小麦籽粒锌含量。

2.2 小麦花前花后锌吸收及花后锌转移对锌肥用量的响应

施锌显著提高了小麦花前锌吸收量和花前吸收的锌在花后向籽粒的转移量(表 2),与不施锌相比,2022 和 2023 年花前锌吸收量分别提高 38.8%~83.7% 和 13.4%~49.0%,花后锌转移量分别提高 36.0%~73.9% 和 13.0%~39.6%。回归分析结果表明,2022 年,施锌量 27.3 kg/hm² 时,小麦花前锌吸收量最大 350.2 g/hm²,比不施锌增加 79.8%,花后锌转移量最大 269.1 g/hm²,比不施锌处理增加 71.6%。2023 年,施锌量 27.3 kg/hm² 时,花前锌吸收量最大 331.9 g/hm²,比不施锌处理增加 55.1%,花后锌转移量最大 237.4 g/hm²,比不施锌处理增加 43.7%。施锌肥后小麦花后锌吸收量仅在 2023 年显著提高,锌肥用量为 20.5 kg/hm² 时达到显著,比不施锌处理增加 66.0%;施锌显著降低了花后锌吸收对籽粒锌的贡献率,2022 和 2023 年锌肥用量为 27.3 kg/hm² 时,花

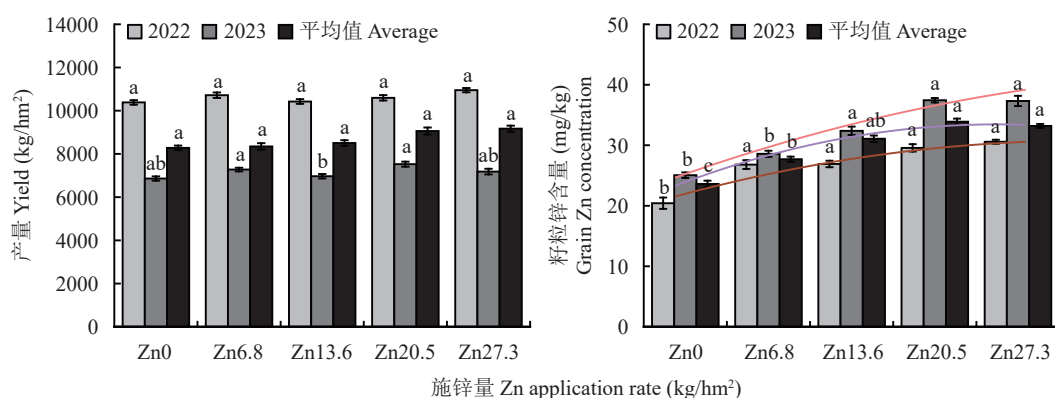


图 2 旱地石灰性土壤上锌肥用量对小麦产量和籽粒锌含量的影响

Fig. 2 Effects of Zn application rates on the yield and grain Zn concentration of wheat in calcareous soil in dryland

注: 图中 2022 和 2023, 分别代表 2021—2022 和 2022—2023 年的小麦生长季, 小麦籽粒锌含量(y)与施锌量(x)的回归方程 2022 为 $y = -0.0146x^2 + 0.7261x + 22.098$; 2023 为 $y = -0.0138x^2 + 0.7445x + 24.616$; 两年平均为 $y = -0.0156x^2 + 0.7979x + 23.372$ 。柱上不同小写字母表示锌肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: 2022 and 2023 in the figure represent the winter wheat growing seasons in the year of 2021–2022 and 2022–2023, respectively. The regression equation of Zn concentrations of grain (y) to Zn application rates (x), 2022 is $y = -0.0146x^2 + 0.7261x + 22.098$; 2023 is $y = -0.0138x^2 + 0.7445x + 24.616$; averages is $y = -0.0156x^2 + 0.7979x + 23.372$. Different lowercases letters above the bars indicate significant difference among Zn treatments ($P < 0.05$).

表 2 施锌量对小麦锌吸收转移的影响

Table 2 Effects of Zn application rates on the Zn uptake and transportation of wheat

年份 Year	施锌量 Zn rate (kg/hm ²)	花前锌吸收量 Pre-anthesis Zn uptake (g/hm ²)	花后锌吸收量 Post-anthesis Zn uptake (g/hm ²)	花后锌转移量 Post-anthesis Zn translocation (g/hm ²)	花后锌转移效率 Post-anthesis Zn translocation efficiency (%)	花后锌转移贡献率 Contribution rate of post-anthesis Zn translocation (%)	花后锌吸收贡献率 Contribution rate of post-anthesis Zn uptake (%)
2022	0	194.8±3.9 c	55.1±7.3 a	156.8±4.3 b	80.5±1.7 a	75.2±4.9 a	26.9±2.1 a
	6.8	270.3±16.8 b	50.0±12.5 a	213.3±19.3 ab	78.5±3.1 a	76.0±6.9 a	22.1±3.8 ab
	13.6	291.5±34.2 ab	51.3±11.9 a	242.4±20.4 a	81.1±3.9 a	85.6±8.1 a	19.2±4.4 b
	20.5	311.9±21.8 ab	54.7±8.9 a	254.7±5.7 a	82.9±4.8 a	82.7±3.8 a	16.1±2.7 b
	27.3	357.9±20.2 a	52.6±4.6 a	272.6±25.4 a	75.5±3.3 a	84.3±11.0 a	13.8±1.7 b
2023	0	214.0±8.1 d	25.6±2.1 b	165.2±9.1 b	77.1±2.8 a	88.6±7.9 a	15.3±1.2 a
	6.8	242.7±9.7 cd	35.9±7.1 ab	186.6±18.4 ab	76.7±1.8 a	87.3±6.0 a	13.8±4.2 ab
	13.6	271.7±10.3 bc	36.6±4.7 ab	199.4±13.5 ab	73.1±2.4 a	84.7±11.3 a	17.4±2.1a
	20.5	346.6±8.1 a	42.5±6.2 a	240.4±20.4 a	69.1±2.9 a	89.6±7.5 a	9.3±2.6 ab
	27.3	318.9±11.1 ab	37.6±1.1 ab	230.6±21.7 a	72.2±4.0 a	87.8±10.0 a	7.7±0.9 b
2022		285.3±19.4	52.7±9.1	228.0±15.0	79.7±2.4	80.8±6.7	19.6±4.2
2023		278.8±9.5	35.6±4.2*	204.4±16.6*	73.6±1.7	87.6±4.9	12.7±2.8*
均值 Average	0	204.4±8.4 c	40.4±6.8 a	161.0±12.5 b	78.8±20.3 a	81.9±6.9 a	21.1±0.7 a
	6.8	256.5±11.6 b	43.0±10.9 a	199.9± 15.3 ab	77.6±19.6 a	81.7±6.5 a	18.0±3.6 ab
	13.6	281.6±21.7 ab	43.9± 12.1 a	220.9±9.8 a	77.1±18.7 a	85.2±9.4 a	18.3±1.3 ab
	20.5	329.3±13.5 a	48.6± 8.4 a	247.6±13.1 a	76.0±21.5 a	86.2±7.6 a	12.7±1.4 bc
	27.3	338.4±17.9 a	45.1± 7.9 a	251.6±18.7 a	73.9±16.7 a	86.1±10.3 a	10.8±0.7 c

注: 同列数据后不同小写字母表示锌肥处理间在0.05水平差异显著, *表示2023年与2022年相比各锌肥处理在0.05水平差异显著; 2022和2023年小麦花前锌吸收量(y)与施锌量(x)的回归方程分别为 $y=-0.0926x^2+7.9113x+203.2$ 和 $y=-0.1032x^2+7.413x+206.48$, 花后锌转移量与施锌量的回归方程分别为 $y=-0.1449x^2+7.9527x+159.97$ 和 $y=-0.0528x^2+4.1453x+162.64$ 。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among Zn treatments at 0.05 level, and the * indicates significant difference between 2022 and 2023 at 0.05 level. The regression equations between pre-anthesis (y) Zn uptake and Zn application rates (x) in 2022 and 2023 are $y=-0.0926x^2+7.9113x+203.2$ and $y=-0.1032x^2+7.413x+206.48$, and the regression equations of post-anthesis Zn translocation (y) to Zn application rates (x) in 2022 and 2023 are $y=-0.1449x^2+7.9527x+159.97$ and $y=-0.0528x^2+4.1453x+162.64$, respectively.

后锌吸收贡献率比不施锌分别降低 48.7% 和 49.7%。从两年均值来看, 施锌对小麦花后锌吸收量、锌转移效率及花后锌转移量对籽粒的贡献率均无显著影响, 但使花后锌吸收量对籽粒的贡献率显著降低 48.8%。可见, 土施锌肥在提高旱地小麦花前锌吸收量和花后向籽粒的转移量的同时, 降低了小麦花后锌吸收对籽粒锌的贡献。

2.3 小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与籽粒锌含量的关系

相关分析发现 (图 3), 2022 年小麦籽粒锌含量与花前锌吸收量、花后锌转移量及成熟期地上部锌吸收量均呈极显著正相关; 回归分析结果表明, 三者每增加 100 g/hm², 籽粒锌含量分别提高 6.4、8.5 和

0.6 mg/kg。2023 年的结果相似, 三者每增加 100 g/hm², 籽粒锌含量分别提高 9.8、17.3 和 9.1 mg/kg。从两年平均值来看, 小麦籽粒锌含量与花前锌吸收量、花后锌吸收量、花后锌转移量及成熟期地上部锌吸收量均呈显著或极显著正相关, 四者每增加 100 g/hm², 籽粒锌含量分别提高 7.7、112.1、11.3 和 7.6 mg/kg。籽粒锌含量与花后锌转移贡献率呈正相关, 花后锌转移贡献率每增加 1.0%, 籽粒锌含量可提高 0.96 mg/kg, 籽粒锌含量与花后锌吸收贡献率显著负相关, 花后锌吸收贡献率每增加 1.0%, 籽粒锌含量降低 1.46 mg/kg。可见, 小麦花前花后锌吸收、地上部锌累积、转移分配是影响小麦籽粒锌含量的重要因素。

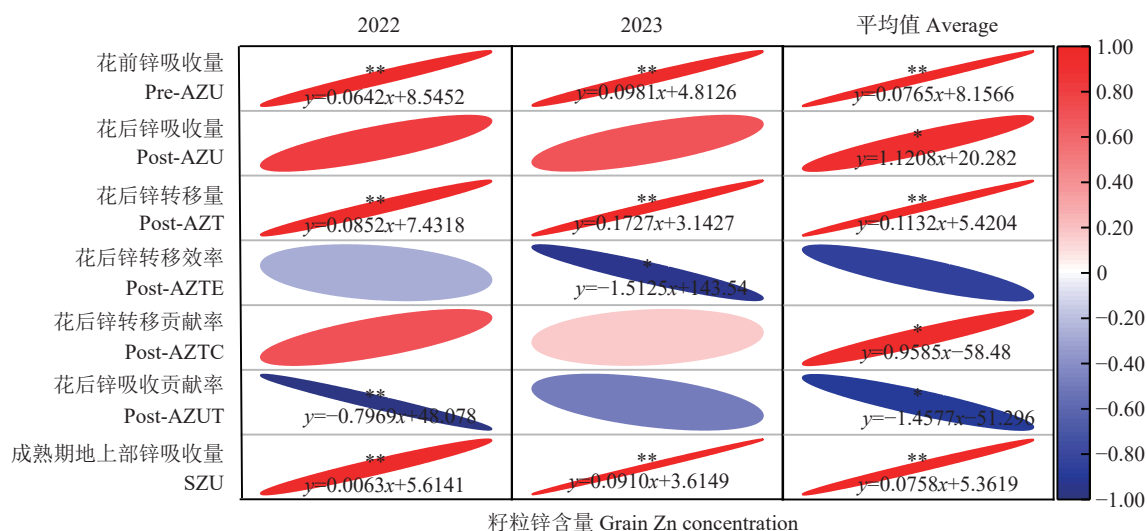


图3 旱地石灰性土壤小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与籽粒锌含量的关系

Fig. 3 Relationships of grain Zn concentration with pre- and post-anthesis Zn uptake and post-anthesis transportation of wheat in calcareous soil in dryland

Note: Pre-AZU—Pre-anthesis Zn uptake; Post-AZU—Post-anthesis Zn uptake; Post-AZT—Post-anthesis Zn translocation; Post-AZTE—Post-anthesis Zn translocation efficiency; Post-AZTC—Contribution to grain Zn by post-anthesis Zn translocation; SZU—Shoot Zn uptake at harvest; Post-AZUT—Contribution to grain Zn by post-anthesis Zn uptake. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

2.4 土壤有效锌对锌肥用量的响应

施用锌肥显著提高了土壤有效锌含量(图4), 2022 和 2023 年施锌处理 0—20 cm 土层有效锌最高分别达 9.47 和 8.93 mg/kg, 较不施锌处理分别增加 12.3 和 10.9 倍; 两年平均为 9.2 mg/kg, 较不施锌处理增加 11.6 倍。两年平均结果的回归分析表明, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 土壤有效锌增加 0.07 mg/kg。两年施锌处理 20—40 cm 土层土壤有效锌含量分别最高达 2.50 和 4.64 mg/kg, 增加 8.3 和 13.9 倍; 两年平均为 3.57 mg/kg, 增加 11.3 倍, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 土壤有效锌含量增加 0.03 mg/kg。两年施锌处理 40—60 cm 土层土壤有效锌含量分别最高达 0.61 和 0.61 mg/kg, 增加了 4.1 和 5.1 倍; 两年平均为 0.54 mg/kg, 增加了 4.4 倍, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 土壤有效锌含量增加 0.004 mg/kg。两年施锌处理 60—80 cm 土层土壤有效锌含量分别最高达 0.25 和 0.31 mg/kg, 增加 1.5 和 2.1 倍; 两年平均为 0.28 mg/kg, 增加 1.8 倍, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 土壤有效锌含量增加 0.002 mg/kg。两年施锌处理 80—100 cm 土层土壤有效锌含量分别最高达 0.27 和 0.30 mg/kg, 增加 1.7 和 2.0 倍; 两年平均为 0.29 mg/kg, 增加 1.9 倍, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 有效锌含量增加 0.002 mg/kg。可见, 施用锌肥显著促进了锌在土壤中以有效锌的形式积累, 且表层 0—40 cm 土壤有效锌增幅显著高于 60—100 cm 土层, 是后者的

2.8 倍。

2.5 小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与土壤有效锌的关系

相关分析结果(图5)表明, 2022 和 2023 年各土层土壤有效锌含量与小麦花前锌吸收量、花后锌转移量、成熟期地上部锌吸收量及籽粒锌含量均呈显著或极显著正相关, 与花后锌吸收贡献率呈显著负相关, 但与小麦花后锌吸收量和花后锌转移贡献率无显著相关性。两年平均结果的回归分析表明, 表层 0—20 和 20—40 cm 土壤有效锌含量每增加 1.0 mg/kg, 花前锌吸收量分别增加 15.8 和 36.7 g/hm², 花后锌转移量增加 10.6 和 24.7 g/hm², 地上部锌吸收量增加 15.7 和 36.9 g/hm², 籽粒锌含量增加 1.2 和 2.7 mg/kg, 花后锌吸收贡献率降低 1.3 和 2.9 个百分点; 深层 40—60、60—80 和 80—100 cm 土壤有效锌含量每增加 1.0 mg/kg, 花前锌吸收量分别增加 204.5、625.7 和 501.8 g/hm²; 花后锌转移量增加 138.2、421.7 和 338.1 g/hm²; 地上部锌吸收量增加 214.8、633.1 和 501.7 g/hm², 籽粒锌含量增加 15.6、46.9 和 37.5 mg/kg, 花后锌吸收贡献率降低 16.9、49.3 和 38.7 个百分点。综上, 随施锌量增加, 各土层有效锌含量增加, 但 40 cm 以下土层的有效锌含量增加引起的小麦锌吸收、转移及籽粒锌含量的增幅较大, 而花后锌吸收量和花后锌转移贡献率均与土壤有效锌的变化无明显关系。

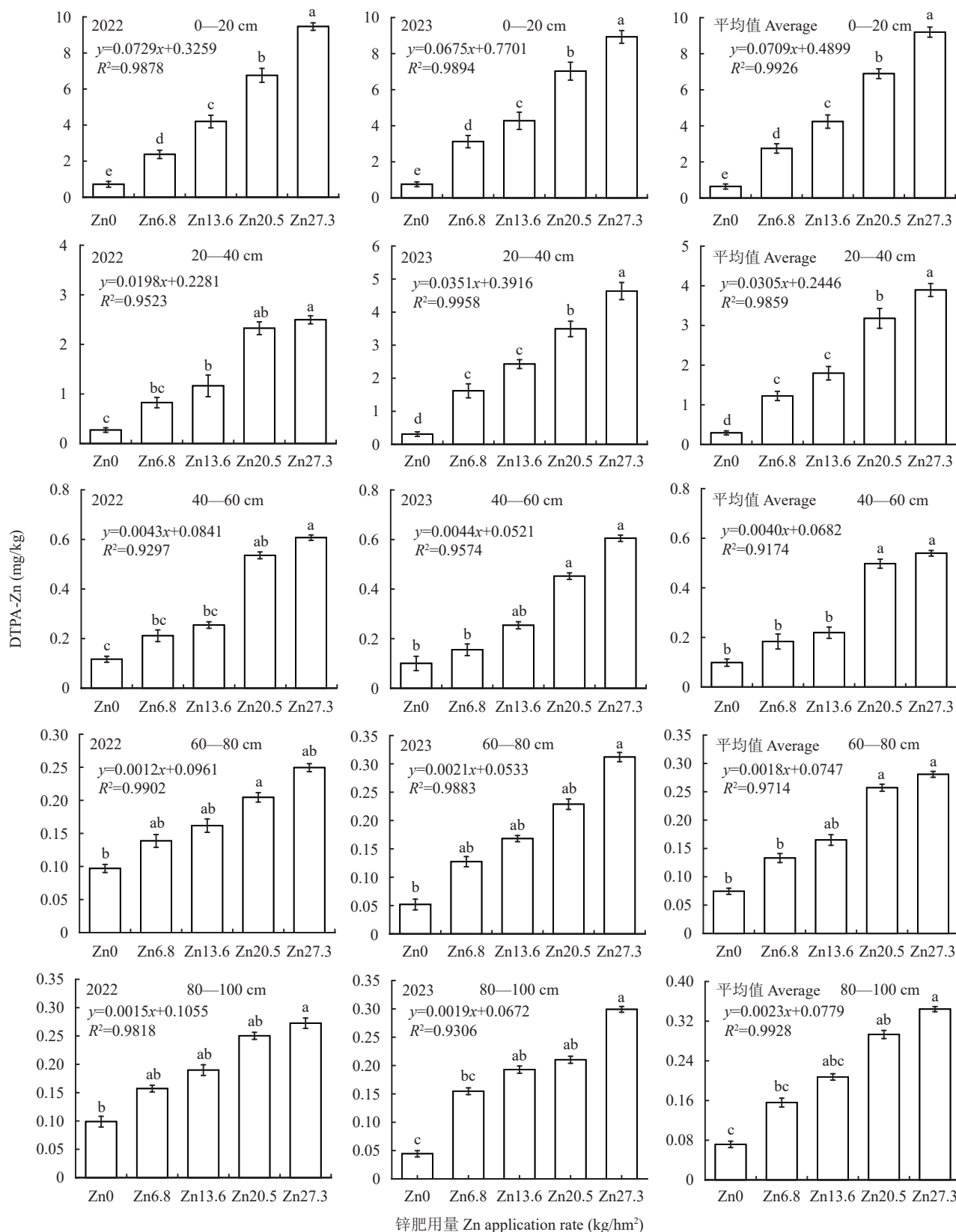


图 4 旱地石灰性土壤上锌肥用量对土壤有效锌 (DTPA-Zn) 含量的影响

Fig. 4 Effects of Zn application rates on soil available Zn (DTPA-Zn) concentration in calcareous soil in dryland

注: 图中函数表示土壤有效锌 (y) 与施锌量 (x) 的回归方程。柱上不同小写字母表示锌肥处理间差异显著 (P < 0.05)。

Note: The regression equation of soil available Zn concentration (y) to Zn application rates (x). Different lowercases letters above the bars indicate significant difference among Zn treatments (P < 0.05).

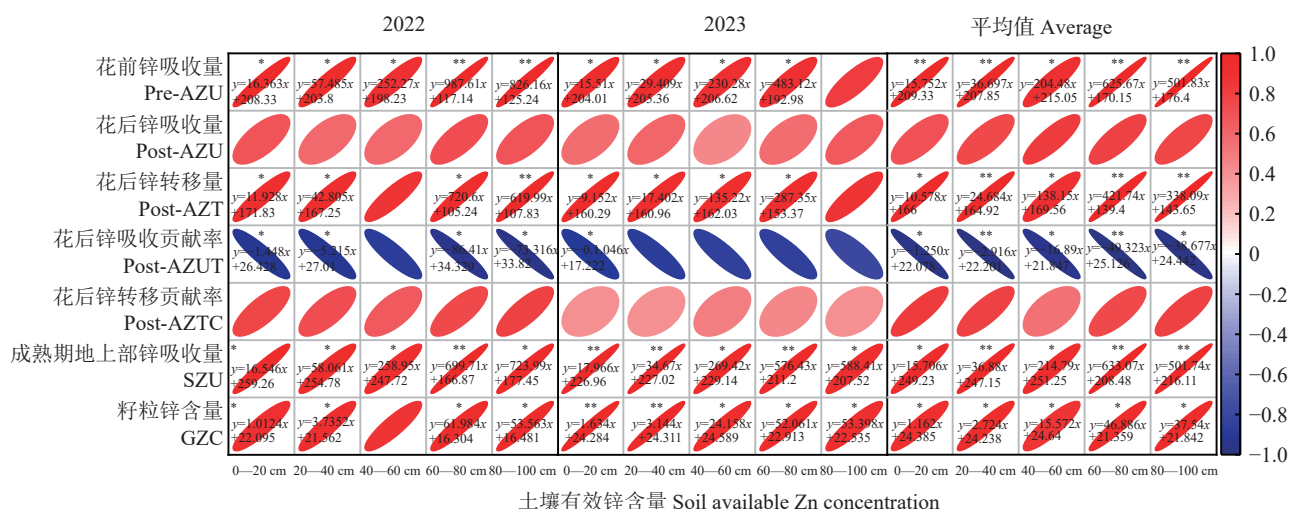


图5 旱地石灰性土壤小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与各土层土壤有效锌含量的关系

Fig. 5 Relationships of soil available Zn concentration with pre-and post-anthesis Zn uptake and post-anthesis Zn transportation of wheat in each soil layer in dryland calcareous soil

Note: Pre-AZU—Pre-anthesis Zn uptake; Post-AZU—Post-anthesis Zn uptake; Post-AZT—Post-anthesis Zn translocation; Post-AZUT—Contribution to grain Zn by post-anthesis Zn uptake; Post-AZTC—Contribution to grain Zn by post-anthesis Zn translocation; SZU—Shoot Zn uptake at harvest; GZC—Grain Zn concentration. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

2.6 土壤锌形态对锌肥用量的响应

2022 和 2023 两年收获期土壤采样检测结果表明, 随施锌量增加, 土壤不同形态锌含量显著提高(图6)。施锌处理 0—20 cm 土层土壤水溶态锌含量两年平均值最高达 0.17 mg/kg, 较不施锌处理增加 54.5%; 20—40 cm 土层达 0.14 mg/kg, 增加 75.0%, 回归分析结果表明, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤水溶态锌均增加 0.0004 mg/kg。施锌处理 0—20 cm 土壤碳酸盐结合态锌含量两年平均值最高达 5.24 mg/kg, 增加 1178.0%; 20—40 cm 土层达 1.89 mg/kg, 增加 551.7%, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤碳酸盐结合态锌含量分别增加 0.04 和 0.01 mg/kg。施锌处理 0—20 cm 土壤松结有机态锌含量两年平均值最高达 5.70 mg/kg, 增加 214.9%; 20—40 cm 达 3.11 mg/kg, 增加 90.8%, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤松结有机态锌含量分别增加 0.03 和 0.01 mg/kg。施锌处理 0—20 cm 土层土壤氧化锰结合态锌含量两年平均值最高达 15.52 mg/kg, 增加 345.9%; 20—40 cm 达 9.37 mg/kg, 增加 183.9%, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 0—20 cm 和 20—40 cm 土层氧化锰结合态锌分别增加 0.10 和 0.05 mg/kg。施锌处理 0—20 cm 土壤紧结有机态锌含量两年平均值最高达 1.13 mg/kg, 增加 91.5%; 20—40 cm 土层达 0.86 mg/kg, 增加 34.4%, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 0—20 cm 和 20—40 cm 土

层土壤紧结有机态锌分别增加 0.004 和 0.002 mg/kg。施锌处理 0—20 cm 土壤残渣态锌含量两年平均值最高达 56.57 mg/kg, 增加 23.7%; 20—40 cm 土层达 56.80 mg/kg, 增加 24.3%, 施锌量每增加 1.0 kg/hm², 两个土层残渣态锌含量均增加 0.08 mg/kg。可见, 石灰性土壤中, 氧化锰结合态锌含量最高, 其次为松结有机态、碳酸盐结合态、紧结有机态和水溶态锌, 施锌使碳酸盐结合态锌含量增幅最大, 水溶态锌最小, 且 0—20 cm 土层土壤锌含量增幅是 20—40 cm 土层的 2~3 倍。

2.7 小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与土壤锌形态的关系

随机森林因子重要性排序分析结果表明, 土壤不同形态锌对小麦花前花后锌吸收转移贡献度不同(图7)。氧化锰结合态锌对小麦花前锌吸收量的贡献最大, 其次为碳酸盐结合态锌, 回归分析结果表明, 两者每增加 1.0 mg/kg, 花前锌吸收量分别增加 12.6 和 31.6 g/hm²; 紧结有机态锌对花后锌吸收量的贡献最大, 锌含量每增加 1.0 mg/kg, 花后锌吸收量增加 15.8 g/hm²; 碳酸盐结合态锌对花后锌转移量的贡献最大, 锌含量每增加 1.0 mg/kg, 花后锌转移量增加 23.0 g/hm²; 碳酸盐结合态锌对地上部锌吸收量的贡献最大, 其次为氧化锰结合态锌、松结有机态锌、紧结有机态锌, 四者每增加 1.0 mg/kg, 地上部锌吸收量分别增加 31.7、12.5、36.7 和 276.1 g/hm²; 碳酸盐结合态锌对籽粒锌含量贡献最大, 其次为氧

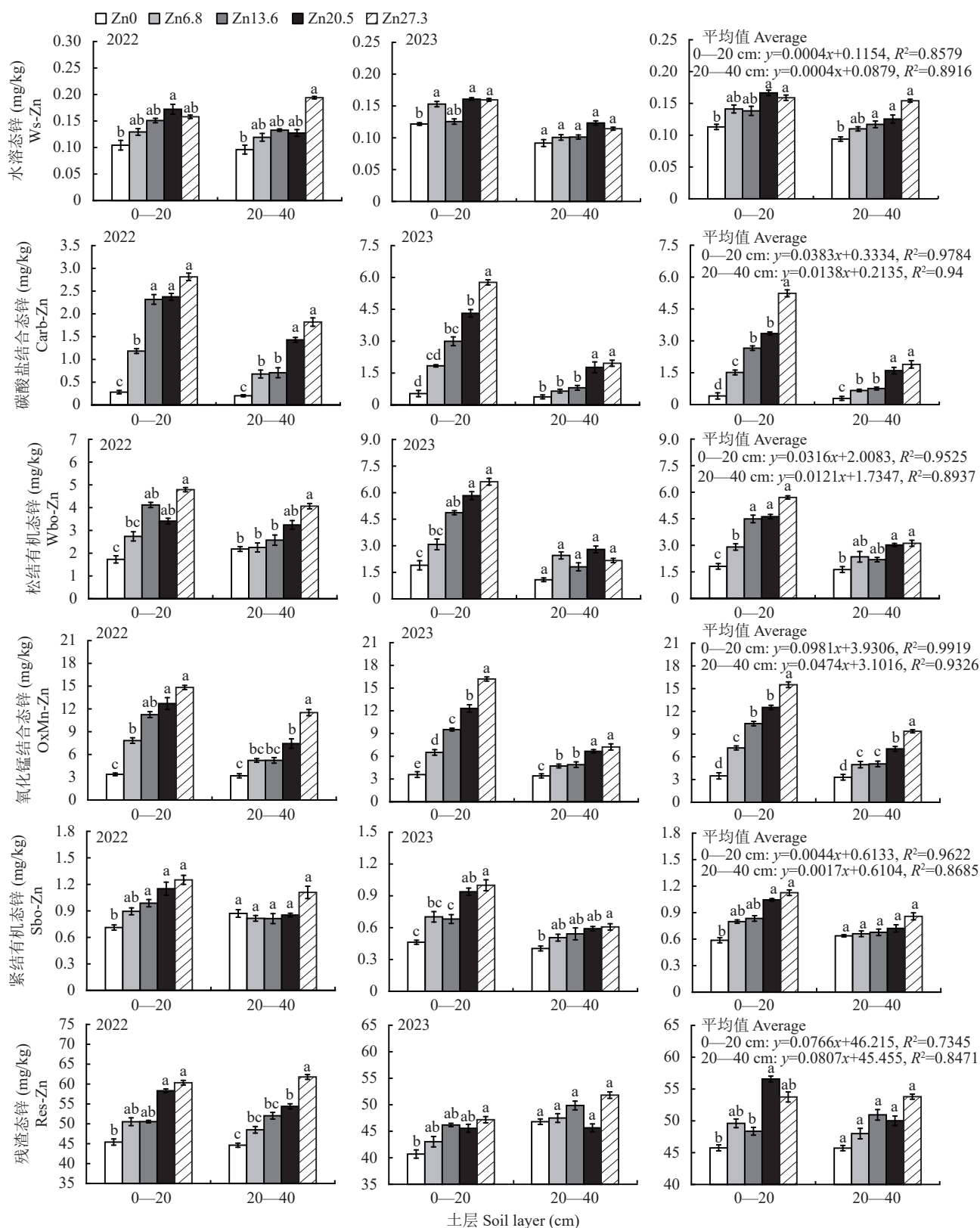


图 6 旱地石灰性土壤上锌肥用量对土壤锌各形态含量的影响

Fig. 6 Effects of Zn application rates on soil zinc content with different fractions in calcareous soil in dryland

注: 柱上不同小写字母表示同一土层锌肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Ws-Zn—Water-soluble Zn; Wbo-Zn—Zn weakly bound to organic matter; Carb-Zn—Carbonate bound Zn; OxMn-Zn—Manganese oxide bound Zn; Sbo-Zn—Zn strongly bound to organic matter; Res-Zn—Residue mineral Zn. Different lowercases letters above the bars indicate significant difference among Zn treatments at the same soil layer ($P < 0.05$).

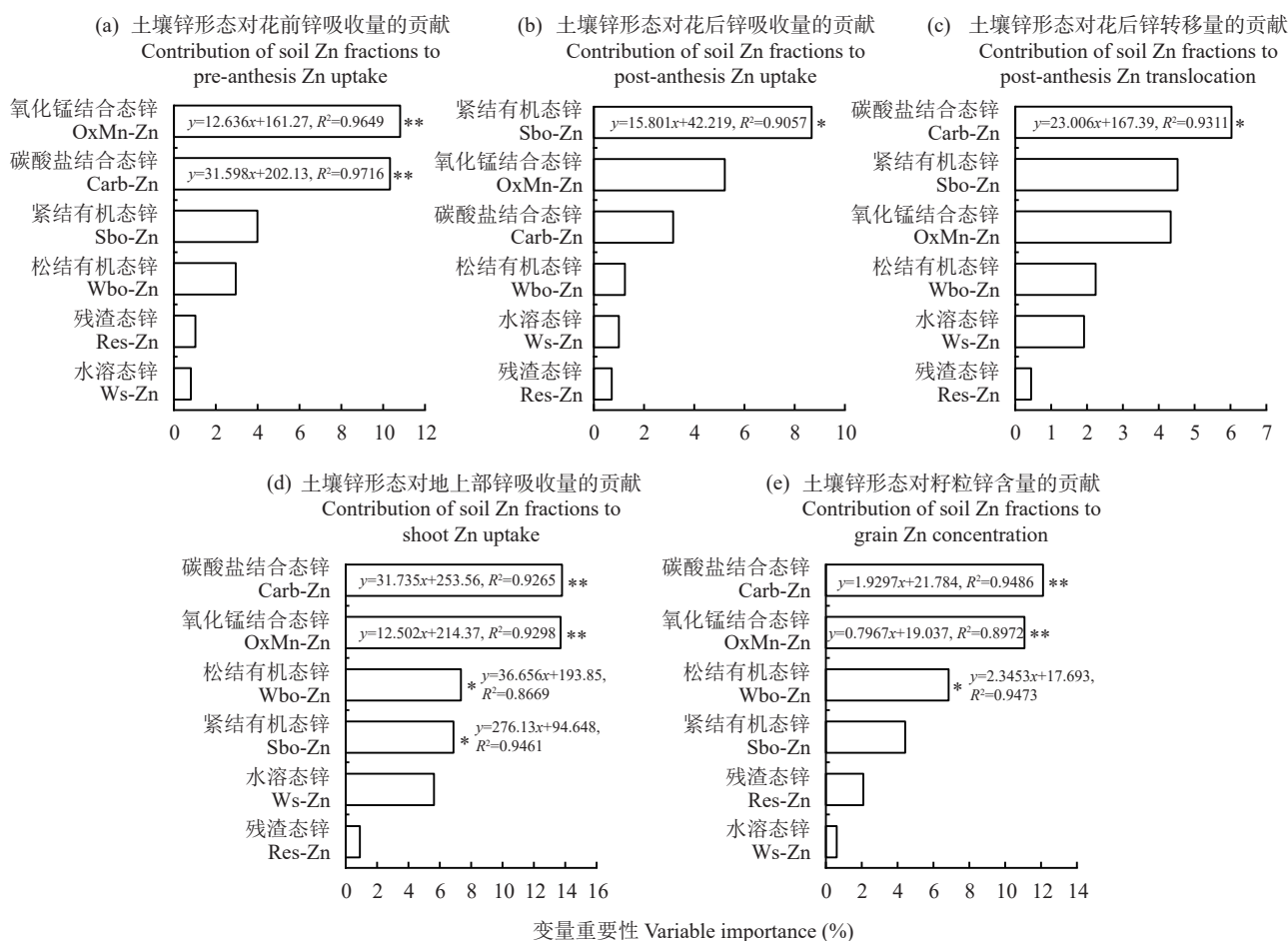


图7 旱地石灰性土壤锌形态对小麦花前花后锌吸收及花后锌转移的贡献

Fig. 7 Contribution of soil Zn fractions to pre- and post-anthesis Zn uptake and post-anthesis Zn transportation of wheat in calcareous soil in dryland

Note: Ws-Zn—Water-soluble Zn; Wbo-Zn—Zn weakly bound to organic matter; Carb-Zn—Carbonate bound Zn; OxMn-Zn—Manganese oxide bound Zn; Sbo-Zn—Zn strongly bound to organic matter; Res-Zn—Residue mineral Zn. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

化锰结合态锌和松结有机态锌,三者每增加 1.0 mg/kg,籽粒锌含量分别增加 1.9、0.8 和 2.3 mg/kg。综上所述,碳酸盐结合态锌、氧化锰结合态锌、松结有机态锌和紧结有机态锌对小麦花前花后锌吸收及花后锌转移及籽粒锌含量提升有重要作用。

3 讨论

3.1 旱地小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与籽粒锌含量的关系

本研究表明,黄土高原旱地石灰性土壤上施用锌肥使小麦花前锌吸收量和花前吸收的锌在花后向籽粒的转移量分别显著提高 25.5%~65.6% 和 24.2%~56.3%。河北保定试验表明,随着施锌量增加,小麦花前锌吸收量提高 17.3%~29.4%,花后锌转移量提高 20.3%~34.1%^[19];曲周试验表明,施锌后两个小麦生长季花前锌吸收量分别提高 27.4%~

166.3% 和 27.1%~193.4%^[6]。陕西杨凌的试验也表明,在小麦灌浆前喷施锌肥两个生长季小麦花后锌转移量分别提高 462.5%~668.8% 和 314.6~475.6%^[25]。可见,锌肥施用能促进小麦花前锌吸收,使营养器官锌累积及其向籽粒的转移量增加。另外,本研究发现,从两年均值来看,施锌没有提高小麦花后锌吸收量和花后吸收的锌对小麦籽粒锌的贡献率。主要原因是在旱地条件下,小麦在生长后期降雨量较少,导致土壤水分缺乏,降低了土壤中锌的有效性^[26-28],也影响花后根系的活力和养分吸收能力,降低锌吸收能力。2023 年小麦花后锌吸收量在施锌处理下增加,这是由于小麦生育后期降水多,籽粒锌吸收量增加,提高了锌的有效性,从而增强了小麦花后锌吸收能力。如在本研究中,2022 和 2023 年两个生长季小麦播前的夏闲期降雨量分别为 389 和 317 mm,生育期降雨量分别为 294 和

393 mm, 生长后期降雨量分别为 94 和 198 mm, 不利于小麦灌浆期对土壤锌的吸收。对此, 前人的研究并无类似报道。

籽粒锌含量高低是小麦锌吸收和转移共同作用的结果。本研究还表明, 随着施锌量增加, 小麦花前锌吸收量、花后锌转移量、花后锌转移对籽粒的贡献率及成熟期地上部锌吸收总量均与籽粒锌含量呈显著正相关。陕西杨凌和河北曲周的试验结果也表明, 小麦花前锌吸收量和花后锌转移量与籽粒锌含量显著正相关^[6, 25]。但本研究发现, 2022 和 2023 年小麦花后锌吸收量均与籽粒锌含量相关不显著, 但就两年平均结果的分析表明, 小麦花后锌吸收量与籽粒锌含量呈正相关, 表明在旱地条件下花后小麦锌吸收受到抑制, 其对籽粒锌含量贡献较小且因年季而变化。另外, 在本研究中, 花后锌转移效率和花后锌吸收贡献率均与籽粒锌含量呈负相关。这应是一种表现现象, 因为随着施锌量的增加, 小麦花后锌转移量增加, 说明施锌提高了花后锌从营养器官向籽粒的转移, 从而提高了籽粒锌含量, 但花后锌转移效率是通过花后锌转移量与开花期小麦地上部锌吸收量的比值计算的, 转移量增加 24.2%~56.3%, 吸收量增加 25.5%~65.6%, 吸收量的增加大于转移量, 所以随着施锌量增加, 在籽粒含量提高的同时, 锌转移效率降低, 两者表现出负相关。另外, 随着施锌量增加, 小麦籽粒锌吸收量提高, 花后锌吸收量没有增加, 作为花后锌吸收量和籽粒锌吸收量比值的花后锌吸收贡献率因此降低, 其与施锌后籽粒锌含量提高就表现出了负相关, 也说明如果花后锌吸收量能增加, 从而提高花后锌吸收贡献率, 可能会进一步提升旱地小麦籽粒的锌含量。可见, 通过提升小麦花前及花后锌吸收量, 从而提高小麦地上部锌的吸收总量和花前吸收的锌在花后向籽粒的转移, 是提高旱地石灰性土壤小麦籽粒锌含量的关键。

3.2 旱地小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与土壤有效锌的关系

本研究表明, 施用锌肥显著提高土壤有效锌含量, 表层 0—20 和 20—40 cm 土壤有效锌含量比不施锌分别提高 11.6 和 11.3 倍, 最高达 9.20 和 3.57 mg/kg, 深层 40—60、60—80 和 80—100 cm 土壤提高 4.4、1.8 和 1.9 倍, 最高达 0.54、0.28 和 0.29 mg/kg。陕西长武 18 年的长期定位试验结果表明, 多年连续施锌使表层 0—20 和 20—40 cm 土壤有效锌含量分别提高 357.8% 和 95.5%, 达 2.6 和 0.7 mg/kg, 深层

40—60、60—80 和 80—100 cm 土壤分别提高 13.9%、31.7% 和 70.3%, 达 0.4、0.3 和 0.3 mg/kg^[29]。河北曲周两年的试验结果表明, 施锌使 0—30 cm 土层土壤有效锌含量增加 86.2%, 最高达 17.5 mg/kg^[30]。美国 9 年 14 个锌肥试验结果表明, 随着施锌量的增加表层 0—20 cm 土壤有效锌含量显著提高, 达 0.6~2.4 mg/kg^[31]。可见, 施用锌肥提升了土壤有效锌含量。另外, 本研究中施锌后土壤有效锌含量表层 0—20 和 20—40 cm 增幅高于深层 40—100 cm 土壤。这可能是因为在旱地石灰性土壤上, 没有灌溉条件, 且有限的降雨量和高蒸发量导致结合耕作整地施入土壤的锌主要分布在表层, 使得表层土壤有效锌大幅度提高, 同时由于施锌后作物主要由表层土壤中吸收有效锌, 而减少了对深层土壤有效锌的吸收, 从而使深层土壤在施用锌肥后有效锌含量也出现提升。

本研究表明, 随着施锌量增加, 小麦花前锌吸收量、花后锌转移量、成熟期地上部锌吸收量及籽粒锌含量均与土壤有效锌呈显著正相关。河北曲周的试验结果表明, 施锌使小麦花前锌吸收量显著提高, 其与土壤有效锌正相关^[6]。北京海淀的试验表明, 土施锌肥、土施+叶面喷锌肥, 使小麦籽粒锌含量分别提高 24.6% 和 62.6%, 且与土壤有效锌呈正相关^[32]。这表明, 小麦花前吸收的土壤锌及其在花后向籽粒的转移对籽粒锌含量提高有重要作用。本研究中, 与表层土壤相比, 深层土壤有效锌每增加 1.0 mg/kg 时, 花前锌吸收量、花后锌转移量、成熟期地上部锌吸收量及籽粒锌含量的增加值要高, 表观上看深层土壤对小麦锌吸收的贡献更大。然而, 实际情况并非如此, 施锌使 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤有效锌两年均值提高幅度大于深层 40—100 cm。如以花前锌吸收量为例, 由于 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤有效锌每增加 1.0 mg/kg, 小麦花前锌吸收量增加值分别为 15.8 和 36.7 g/hm², 增加总量分别为 344.5 和 328.3 g/hm²; 深层 40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 土壤有效锌含量每增加 1.0 mg/kg, 花前锌吸收量增加值分别为 204.5、625.7 和 501.8 g/hm², 增加总量分别为 305.1、301.6 和 281.7 g/hm²。所以, 表层土壤有效锌对小麦锌吸收转移及籽粒锌含量提升的贡献更大。同时, 小麦根系主要分布在表层土壤, 根系鲜重、表面积和根长密度大于深层土层^[6, 28, 33], 因此, 小麦根系分布与在表层的有效锌分布高低耦合, 也使得表层较高的土壤有效锌对小麦的锌吸收产生较大的贡献。此外, 本研究

中, 小麦花后锌吸收量与土壤有效锌无显著相关性。这同样是由于在旱地施锌条件下, 小麦生长后期降雨量少, 影响了小麦对土壤有效锌的吸收和利用, 虽然土壤有效锌达到了较高的水平, 但小麦吸收利用的较少。可见, 在旱地条件下, 施用锌肥虽然提高了土壤有效锌含量, 但只能促进小麦花前锌吸收及花前吸收的锌在花后向籽粒的转移, 但无法提高花后锌吸收量。

3.3 旱地小麦花前花后锌吸收及花后锌转移与土壤不同形态锌的关系

本研究表明, 施用锌肥显著提高了土壤各形态锌含量, 表层 0—20 cm 土壤水溶态、碳酸盐结合态、松结有机态、氧化锰结合态和紧结有机态锌含量比不施锌增加 54.5%~1178.0%, 20—40 cm 增加 34.4%~551.7%。陕西杨凌 2 年试验结果表明, 在有效锌为 0.77 mg/kg 的土壤上, 施锌仅使表层 0—20 cm 土壤松结有机态、碳酸盐结合态锌分别增加 75.0% 和 53.0%^[34]。陕西长武基于 1984—2001 年开展的长期定位试验, 对 2001 年土壤测定结果表明, 在有效锌为 0.84 mg/kg 的土壤上, 施锌使松结有机态、碳酸盐结合态、氧化锰结合态和紧结有机态锌含量分别提高 14.0%~66.0%、25.0%~466.0%、50.0%~100.0% 和 877.0%~1266.0%^[35]。河南郑州 1 年试验结果表明, 在有效锌为 1.02 mg/kg 的土壤上, 施锌显著提高了碳酸盐结合态、松结有机态和残渣态锌^[15]。可见, 施用锌肥可以提高土壤不同形态锌的含量。本研究中, 不同形态锌含量增幅不一致, 施用锌肥使水溶态锌增幅较小, 最高仅达 0.17 mg/kg, 这是由于其在土壤中锌含量本身较低, 施入锌肥后, 很快被植物直接吸收利用, 而松结有机态、碳酸盐结合态和氧化锰结合态锌含量增幅较大, 分别达 5.70、5.24 和 15.52 mg/kg, 是由于黄土高原旱地碳酸钙含量较高, 达 261.0 g/kg, HCO_3^- 浓度过高时, 会抑制作物对锌的吸收和向地上部转移, 使锌肥施入土壤后大部分以碳酸盐结合态存在^[36]。同时, 土壤中 90% 以上的锌被吸附固定在铁锰氧化物、碳酸盐和硅酸盐矿物中, 随着施锌量的增加, 形成较多的氧化物和碳酸盐^[14]。可见, 在黄土高原旱地石灰性土壤上, 施用锌肥后土壤中主要以碳酸盐结合态、氧化锰结合态和松结有机态锌的形式存在。

小麦锌吸收转移及籽粒锌含量与土壤锌形态及其含量密切相关。本研究中随机森林模型结果表明, 氧化锰结合态和碳酸盐结合态锌对小麦花前锌

吸收量贡献显著, 其中, 氧化锰结合态锌贡献最大; 紧结有机态锌对花后锌吸收量贡献显著, 其贡献度也最大, 碳酸盐结合态锌对花后锌转移量贡献显著, 其贡献度最大; 碳酸盐结合态、氧化锰结合态、松结有机态和紧结有机态锌对成熟期地上部锌累积量贡献显著, 前三者对小麦籽粒锌含量贡献显著, 其中, 碳酸盐结合态对地上部锌累积量和籽粒锌含量均贡献最大。表明从小麦整个生长期来看, 氧化锰结合态、紧结有机态、碳酸盐结合态和松结有机态锌对花前花后锌吸收转移、地上部锌累积及籽粒锌含量提升有重要作用。但在锌营养供应中, 水溶态和松结有机态锌可直接被植物吸收利用, 而碳酸盐结合态、氧化锰结合态和紧结有机态锌具有较强的可交换性及活性可作为潜在的锌库, 可对水溶态和松结有机态锌进行补充, 在不同程度上反映土壤锌的有效性, 而以残渣态形式存在的锌主要被土壤胶体专性吸附或形成磷酸盐沉淀, 难以促进小麦锌吸收利用^[37-39]。因此, 在旱地石灰性土壤上, 施用锌肥后碳酸盐结合态、氧化锰结合态和紧结有机态锌显著增加, 对小麦花前花后锌吸收转移、地上部锌累积及籽粒锌含量提升表现出较大贡献, 但其不能被植物直接吸收利用, 只有在转化为松结有机态和水溶态锌后才能被植物吸收利用。

4 结论

黄土高原旱地石灰性土壤上, 土施锌肥显著提高了小麦花前锌吸收量、花后锌转移量, 从而提高了小麦成熟期地上部锌吸收量及籽粒锌含量, 对花后锌吸收量的影响因年份而异, 总体不显著。施锌提高了不同土层土壤有效锌含量, 特别是 0—40 cm 土层增幅较大, 达 3.57~9.20 mg/kg, 这是花前锌吸收、花后锌转移及籽粒锌含量提升的主要原因。施锌对土壤松结有机态、碳酸盐结合态和氧化锰结合态锌提升幅度较大, 其通过向水溶态锌的转化, 维持了施锌后土壤有效锌提升, 促进了小麦花前锌吸收。生长后期干旱缺水影响了旱地小麦花后锌吸收, 抑制了施锌后籽粒锌含量的进一步提升, 是制约旱地小麦籽粒锌营养强化的关键。

参 考 文 献:

- [1] Mcclung J P. Iron, zinc, and physical performance[J]. *Biological Trace Element Research*, 2019, 188(1): 135-139.
- [2] Cakmak I, Kutman U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 172-180.

- [3] Cakmak I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways[J]. *Plant and Soil*, 2002, 247: 3–24.
- [4] Chen X, Zhang Y, Tong Y, *et al.* Harvesting more grain zinc of wheat for human health[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7016.
- [5] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2): 1–17.
- [6] Liu D Y, Liu Y M, Zhang W, *et al.* Zinc uptake, translocation, and remobilization in winter wheat as affected by soil application of Zn fertilizer[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 426.
- [7] 王张民, 潘斐, 刘琦, 等. 拔节期土壤施锌对小麦籽粒中锌生物有效性影响评估[J]. *土壤*, 2018, 50(6): 1222–1228.
Wang Z M, Pan F, Liu Q, *et al.* Effect of zinc application at jointing stage on zinc bioavailability in wheat grain[J]. *Soils*, 2018, 50(6): 1222–1228.
- [8] Yilmaz A B D I, Ekiz H, Torun B, *et al.* Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(4/5): 461–471.
- [9] 李孟华, 王朝辉, 李强, 等. 低锌旱地土施锌肥对小麦产量和锌利用的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2168–2174.
Li M H, Wang Z H, Li Q, *et al.* Effects of soil Zn application on grain yield and Zn utilization of wheat in Zn deficient dryland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2168–2174.
- [10] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31(5): 537–548.
- [11] 林蕾, 陈世宝. 土壤中锌的形态转化、影响因素及有效性研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(2): 221–229.
Lin L, Chen S B. Transformation and influence factors of speciation of zinc in soils and its effect on zinc bioavailability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 221–229.
- [12] Ma Y B, Uren N C. The fate and transformations of zinc added to soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, 35(4): 727–738.
- [13] 林亲铁, 朱伟浩, 陈志良, 等. 土壤重金属的形态分析及生物有效性研究进展[J]. *广东工业大学学报*, 2013, 30(2): 113–118.
Lin Q T, Zhu W H, Chen Z L, *et al.* Progress in species and bioavailability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2013, 30(2): 113–118.
- [14] Vodyanitskii Y N. Zinc forms in soils (review of publications)[J]. *Eurasian Soil Science*, 2010, 43(3): 269–277.
- [15] 聂兆君, 赵鹏, 秦世玉, 等. 氮锌配施对冬小麦根土界面锌有效性及形态分级的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1185–1193.
Nie Z J, Zhao P, Qin S Y, *et al.* Effects of combined application of nitrogen and zinc on the availability and fraction of zinc in root-soil interface of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1185–1193.
- [16] Alvarez J M, Rico M I. Effects of zinc complexes on the distribution of zinc in calcareous soil and zinc uptake by maize[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(19): 5760–5767.
- [17] Impa S M, Morete M J, Ismail A M, *et al.* Zn uptake, translocation and grain Zn loading in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes selected for Zn deficiency tolerance and high grain Zn[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(10): 2739–2751.
- [18] Waters B M, Uauy C, Dubcovsky J, *et al.* Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(15): 4263–4274.
- [19] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英, 等. 施锌对小麦开花后氮、磷、钾、锌积累和运转的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 313–320.
Han J L, Li Y M, Ma C Y, *et al.* Effects of zinc fertilization on accumulation and transportation of N, P, K and Zn after anthesis of wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(3): 313–320.
- [20] 黄宁, 王朝辉, 王丽, 等. 我国主要麦区主栽高产品种产量差异及其与产量构成和氮磷钾吸收利用的关系[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(1): 81–93.
Huang N, Wang Z H, Wang L, *et al.* Yield variation of winter wheat and its relationship to yield components, NPK uptake and utilization of leading and high yielding wheat cultivars in main wheat production regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(1): 81–93.
- [21] 牟文燕, 褚宏欣, 黄宁, 等. 中国主要麦区小麦品种(系)产量与需硫特征关系分析[J]. *作物学报*, 2022, 48(12): 3192–3202.
Mu W Y, Chu H X, Huang N, *et al.* Relationship between grain yield and sulfur requirement characteristics of wheat cultivars (lines) in main wheat production regions of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(12): 3192–3202.
- [22] 蒋廷惠, 胡霁堂, 秦怀英. 土壤锌、铜、铁、锰形态区分方法的选择[J]. *环境科学学报*, 1990, 10(3): 280–286.
Jiang T H, Hu A T, Qin H Y. Fractions of soil zinc copper iron and manganese[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 10(3): 280–286.
- [23] Tessier A P, Campbell P G C, Bisson M X. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844–851.
- [24] Yang J, Xu J, Wang Z, *et al.* High-Zn wheat alleviates P-Zn antagonism by improving Zn activation, acquisition, and translocation at key growth stages[J]. *Field Crops Research*, 2023, 304: 109149.
- [25] 王少霞, 李萌, 田霄鸿, 等. 锌与氮磷钾配合喷施对小麦锌累积、分配及转移的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 296–305.
Wang S X, Li M, Tian X H, *et al.* Effects of combined foliar application of Zn with N, P, or K on Zn accumulation, distribution and translocation in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 296–305.
- [26] 李孟华, 于荣, 杨月娥, 王朝辉. 低锌旱地土壤水分对小麦产量和锌利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 388–394.
Li M H, Yu R, Yang Y E, WANG Zhao-hui. Effects of soil moisture on wheat grain yield and zinc utilization in zinc-deficient dryland soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2): 388–394.
- [27] Deng X, Shan L, Zhang H, *et al.* Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1-3): 23–40.

- [28] Rose T J, Impa S M, Rose M T, *et al.* Enhancing phosphorus and zinc acquisition efficiency in rice: A critical review of root traits and their potential utility in rice breeding[J]. *Annals of Botany*, 2013, 112(2): 331–345.
- [29] 魏孝荣, 郝明德, 田梅霞. 长期定位施锌土壤-作物系统锌分布特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 96–98.
Wei X R, Hao M D, Tian M X. Distribution of zinc in soil-crop system after long-term located application of zinc fertilizer[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2): 96–98.
- [30] Liu D, Zhang W, Yan P, *et al.* Soil application of zinc fertilizer could achieve high yield and high grain zinc concentration in maize[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1-2): 47–55.
- [31] Martínez Cuesta N, Carciocchi W, Salvagiotti F, *et al.* DTPA-extractable zinc threshold for wheat grain yield response to zinc fertilization in Mollisols[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(5): 1858–1862.
- [32] 陶焱金, 井凌琨, 王琪, 等. 锌肥施用对我国小麦籽粒锌含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 660–666.
Tao Y J, Jing L K, Wang Q, *et al.* Effects of zinc fertilizer application on zinc content of wheat (*Triticum aestivum* L.) grains in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 660–666.
- [33] Zhang Y, Pang L, Yan P, *et al.* Zinc fertilizer placement affects zinc content in maize plant[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(1-2): 81–92.
- [34] 贾舟, 陈艳龙, 赵爱青, 等. 硫酸锌和EDTA-Zn不同施用方法对第二季小麦籽粒锌和土壤锌有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1595–1602.
- Jia Z, Chen Y L, Zhao A Q, *et al.* Effects of different application method of ZnSO₄ and EDTA-Zn on wheat grain zinc biofortification and soil zinc availability in the next year[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1595–1602.
- [35] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 黄土高原地区连续施锌条件下土壤锌的形态及有效性[J]. 中国农业科学, 2005, 38(7): 1386–1393.
Wei X R, Hao M D, Zhang C X. Zinc fractions and availability in the soil of the Loess Plateau after long-term continuous application of zinc fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(7): 1386–1393.
- [36] 张万涛, 吉静怡, 李彬彬, 等. 黄土高原不同地貌区农田土壤有机质预测方法研究[J]. 植物营养与肥料学报. 2021, 27(4): 583–594.
Zhang W T, Ji J Y, Li B B, *et al.* Spatial prediction of soil organic matter of farmlands under different landforms in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*. 2021, 27(4): 583–594.
- [37] Kabala C, Singh B R. Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 485–492.
- [38] Lu X, Cui J, Tian X, *et al.* Effects of zinc fertilization on zinc dynamics in potentially zinc-deficient calcareous soil[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(4): 963–969.
- [39] Zhao A, Yang S, Wang B, *et al.* Effects of ZnSO₄ and Zn-EDTA applied by broadcasting or by banding on soil Zn fractions and Zn uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) under greenhouse conditions [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(2): 307–317.