

DOI: 10.11766/trxb202003150119

黄婷苗, 王朝辉, 黄倩楠, 侯赛宾. 黄淮麦区小麦籽粒锌含量差异原因与调控[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1496–1506.

HUANG Tingmiao, WANG Zhaohui, HUANG Qiannan, HOU Saibin. Causes and Regulation of Variation of Zinc Concentration in Wheat Grains Produced in Huanghuai Wheat Production Region of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1496–1506.

黄淮麦区小麦籽粒锌含量差异原因与调控*

黄婷苗^{1, 3}, 王朝辉^{1, 2†}, 黄倩楠^{1, 2}, 侯赛宾^{1, 2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 山西农业大学农学院, 山西太谷 030800)

摘要: 小麦高产优质生产对保障我国粮食安全和人们营养健康有重要意义。通过实地调研和取样分析, 研究了黄淮麦区 276 个田块的小麦籽粒锌含量与产量和产量构成、施肥和土壤养分、作物锌吸收利用等参数的关系。结果表明, 黄淮麦区缺锌和非缺锌土壤的比例分别为 42% 和 58%, 两种土壤上的小麦籽粒锌含量分别介于 16~52 和 17~58 mg·kg⁻¹, 分别有 7% 和 9% 样本的籽粒锌达到推荐值 40 mg·kg⁻¹。缺锌田块, 籽粒锌含量与磷肥用量 ($r = -0.273, P < 0.01$)、0~20 cm 土壤有效磷 ($r = -0.283, P < 0.01$) 显著负相关, 高低籽粒锌组的磷肥用量分别为 73 和 137 kg·hm⁻², 土壤有效磷分别为 13 和 20 mg·kg⁻¹, 有效锌分别为 0.8 和 0.7 mg·kg⁻¹, 但籽粒产量低于非缺锌土壤 (7 204 和 7 857 kg·hm⁻²)。非缺锌田块, 籽粒锌含量与磷肥用量显著负相关 ($r = -0.181, P < 0.05$), 与 0~20 cm ($r = 0.236, P < 0.01$) 和 20~40 cm ($r = 0.183, P < 0.05$) 土壤有效磷显著正相关, 高低籽粒锌组的磷肥用量分别为 112 和 145 kg·hm⁻², 0~20 cm 的土壤有效磷分别为 29 和 30 mg·kg⁻¹, 有效锌分别为 3.3 和 2.2 mg·kg⁻¹。因此, 在缺锌土壤上, 应首先解决土壤缺锌问题, 将有效锌提升至临界值 1.0 mg·kg⁻¹ 以上, 非缺锌土壤有效锌保持在 3.0 mg·kg⁻¹ 以上, 同时适当减少磷肥用量和降低土壤有效磷水平, 以减少磷对小麦锌吸收的负面影响, 维持黄淮麦区小麦高产并改善籽粒锌营养。

关键词: 籽粒锌含量; 产量; 肥料用量; 土壤养分; 调控措施

中图分类号: S512.1 文献标志码: A

Causes and Regulation of Variation of Zinc Concentration in Wheat Grains Produced in Huanghuai Wheat Production Region of China

HUANG Tingmiao^{1, 3}, WANG Zhaohui^{1, 2†}, HUANG Qiannan^{1, 2}, HOU Saibin^{1, 2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Area, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030800, China)

Abstract: 【Objective】 China nowadays has approximately 100 million people suffering from zinc (Zn) deficiency, mainly because they live on cereal crops as their staple food and hence fail to take in adequate Zn, especially in the rural areas. As one

* 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-3) 和国家重点研发计划项目 (2018YFD0200400) 资助 Supported by the Modern Agricultural Research System of China (No. CARS-3) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0200400)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: w-zhaohui@263.net

作者简介: 黄婷苗 (1990—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事小麦锌营养研究。E-mail: huangtingmiao@126.com

收稿日期: 2020-03-15; 收到修改稿日期: 2020-06-13; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-08-26

of the major wheat-producing areas, the Huanghuai Plain contributes to about 70% of the wheat (*Triticum aestivum* L.) grain yield of China. So it is of great significance to understand causes of the variation of Zn concentration in wheat grains to guaranteeing high-yield and high-quality wheat production in the region, so as to ensure food security and human health. 【Method】Combined with a two-year *in situ* farm survey, samples of wheat shoot (the aboveground part) and soil in the 0~100 cm layer were collected from 276 randomly selected farmers' fields during the wheat harvesting season in the Huanghuai wheat production region for analysis of Zn concentration. Comparison was made between wheat grains produced in Zn-deficient (DTPA-Zn<1.0 mg·kg⁻¹) and non-Zn-deficient (DTPA-Zn ≥ 1.0 mg·kg⁻¹) soils in grain Zn concentration and correlation analysis performed of grain Zn concentration with grain yield, yield components, fertilization rates, soil nutrients in the 0-100 cm layer, and Zn uptake and utilization of the crop, separately. 【Result】Results show that 42% and 58% of the wheat fields in the region were of Zn-deficient (DTPA-Zn<1.0 mg·kg⁻¹) and non-Zn-deficient (DTPA-Zn ≥ 1.0 mg·kg⁻¹) soils, and produced grains with Zn concentration ranging from 16 to 52 mg·kg⁻¹ and from 17 to 58 mg·kg⁻¹, respectively. About 7% and 9% of the grain samples from the two types of wheat fields met the recommended criterion (≥ 40 mg·kg⁻¹) for grain Zn concentration. Generally, the farmers in the region prefer to grow local specific elite cultivars of wheat, however, it was difficult to identify high-Zn or potentially high-Zn traits of the cultivars due to the limited sample size at a regional scale. In this survey, the selected wheat fields did not receive any Zn fertilizer or other Zn-containing fertilizers, and only 10% and 18% of the fields of Zn-deficient soil and non-Zn-deficient soil were applied with organic manure. In the fields of Zn-deficient soils, grain Zn concentration had nothing to do with nitrogen (N) and potassium (K) fertilization rates, but did negatively, with phosphorus (P) fertilization rate ($r = -0.273$, $P < 0.01$) and available P in the 0-20 cm soil layer ($r = -0.283$, $P < 0.01$). In the two groups of wheat fields, high and low in grain Zn concentration, with soil available P being 13 and 20 mg·kg⁻¹, and available Zn being 0.8 and 0.7 mg·kg⁻¹ in 0-20 cm soil, P₂O₅ fertilizer was applied at 65.8 and 68.4 kg·hm⁻² to achieve targeted grain yield. Also, the grain yield and shoot Zn uptake were observed to be lower in the fields of Zn-deficient soils (7 204 kg·hm⁻² and 279 g·hm⁻²) than in the fields of non-Zn-deficient soils (7 857 kg·hm⁻² and 318 g·hm⁻²). In the fields of non-Zn-deficient soils, grain Zn concentration had nothing to do with N and K fertilization rates, either, but was negatively related to P fertilization rate ($r = -0.181$, $P < 0.05$) and positively to soil available Zn in the 0-20 cm ($r = 0.236$, $P < 0.01$) and 20-40 cm ($r = 0.183$, $P < 0.05$) soil layers. In the two groups of wheat fields of Zn-deficient and non-Zn-deficient soils, with available P being 29 and 30 mg·kg⁻¹, and available Zn being 3.3 and 2.2 mg·kg⁻¹ in the 0-20 cm soil layer, P fertilizer was applied at a rate of 112 and 145 kg P₂O₅·hm⁻², respectively, and P₂O₅ requirement for targeted average grain yield reached 69.2 and 70.8 kg·hm⁻², respectively. 【Conclusion】Therefore, it could be considered that it is advisable to address the problem of lack of available soil Zn first, by increasing the content of soil available Zn up to the critical values of 1.0 and 3.0 mg·kg⁻¹ in the fields of Zn-deficient and non-Zn-deficient soils, respectively, and then to reduce P fertilizer application rate and hence available soil P content, so as to alleviate the negative effect of excessive P on crop Zn uptake and accumulation, for the purpose of maintaining high grain yield and improving grain Zn nutrition simultaneously in winter wheat grown in the Huanghuai wheat production region of China.

Key words: Grain Zn concentration; Grain yield; Fertilizer rates; Soil nutrients; Regulation measures

黄淮麦区是我国粮食主产区, 小麦种植面积约 1 100 万 hm², 占我国小麦总面积的 44%^[1]。长期以来受“施肥越多, 产量越高”观念影响, 过量施用化学肥料不仅造成了土壤养分残留, 施肥的增产效应下降, 还导致作物营养品质降低^[2-3]。锌是人体必需的微量营养元素, 全球 10%~32%人口遭受锌营养失调威胁, 以发展中国家和农村人口更为严重^[4]。

我国以谷物为主食的人群锌摄入量不足, 约 1 亿人口锌营养不良^[5]。满足人体正常营养需求的小麦籽粒锌含量应达到 40~60 mg·kg⁻¹^[6], 而 2009—2011 年对我国小麦主产区调研表明, 黄淮麦区的小麦籽粒锌含量平均为 30 mg·kg⁻¹^[7], 亟待改善和提高。

一般认为, 籽粒锌不足应归于较低的土壤供锌水平^[8]。有效锌缺乏时, 作物减产、锌吸收降低,

富锌品种小麦锌积累也会受阻^[9-10]。根据土壤有效锌分级标准,有效锌含量低于 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为缺锌或潜在性缺锌土壤,高于 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为非缺锌土壤^[11]。在黄淮麦区,北京的田间试验发现,有效锌为 $2.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的石灰性冲积土上,氮肥用量从 0 增加至 $130 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,小麦籽粒锌含量由 $17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,施氮量为 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,籽粒锌含量不再增加,为 $29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[12]。山东有效锌为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 砂壤土的田间试验中,不同氮肥用量的小麦籽粒锌含量介于 $47.5\sim 52.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[13]。河北石灰性冲积土有效锌为 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,低施磷处理的小麦籽粒锌含量也会达 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14]。河南安阳 265 个小麦品种的试验表明,籽粒锌含量存在较大变异,介于 $21.4\sim 58.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[15]。说明除了土壤有效锌,其他因素也可能对籽粒锌含量的变异起决定作用,而其他因素的作用是否会因土壤有效锌水平而异尚不明确。

本研究依托分布于黄淮麦区的 28 个国家小麦产业技术体系综合试验站,开展了农户小麦锌含量

与栽培施肥和土壤养分关系研究,以期明确在缺锌和非缺锌土壤上小麦籽粒锌含量变异及原因,探讨不同土壤上小麦籽粒锌含量的调控措施,为区域小麦高效优质生产提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黄淮冬麦区主要包括山东全部、河南中北部、河北中南部、江苏和安徽淮北地区以及陕西、山西、甘肃三省部分地区。该区夏季降水集中,雨热同期,为温带湿润半湿润季风气候,年均温 $11\sim 14^\circ\text{C}$ 、降水 $570\sim 1\ 000 \text{ mm}$ 。冬小麦-夏玉米轮作是主要的粮食作物种植制度,一年两熟。小麦、玉米秸秆均还田。小麦季一般灌水 1~4 次,农户种植的小麦品种为当地推荐的主栽品系。土壤类型以黄潮土为主,部分为黄土和棕壤,壤土和砂壤土质地为主。0~20 cm 土层土壤的基本理化性状如表 1。

表 1 黄淮麦区 0~20 cm 土层土壤的基本理化性状 ($n = 276$)

Table 1 Basic soil physicochemical properties in the 0-20 cm soil layer in the Huanghuai wheat production region of China ($n = 276$)

土壤参数 Soil parameters	单位 Unit	平均值 Mean	范围 Range	中位数 Median
pH		8.15	6.18~9.01	8.32
OM	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	18.9	7.77~31.1	18.1
TN	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.12	0.52~1.79	1.08
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	19.3	0.02~80.5	14.5
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.95	0~14.6	3.14
Olsen-P	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	24	3.3~70.6	19.4
$\text{NH}_4\text{OAc-K}$	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	147	41~345	124
DTPA-Fe	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	15.8	1.7~74.7	9.2
DTPA-Mn	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.5	1.22~53.8	8.00
DTPA-Cu	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.45	0.39~3.61	1.33
DTPA-Zn	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.69	0.18~9.82	1.16

注: OM: 有机质, TN: 全氮, $\text{NO}_3^- \text{-N}$: 硝态氮, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$: 铵态氮, Olsen-P: 有效磷, $\text{NH}_4\text{OAc-K}$: 速效钾, DTPA-Fe: 有效铁, DTPA-Mn: 有效锰, DTPA-Cu: 有效铜, DTPA-Zn: 有效锌。下同。Note: OM: Organic matter, TN: Total N, $\text{NO}_3^- \text{-N}$: Nitrate N, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$: Ammonium N, Olsen-P: Available P, $\text{NH}_4\text{OAc-K}$: Available K, DTPA-Fe: Available Fe, DTPA-Mn: Available Mn, DTPA-Cu: Available Cu, DTPA-Zn: Available Zn. The same below.

1.2 样品采集与处理

在 2014—2015 年和 2015—2016 年两个小麦生长季,分别选择代表性农户地块 128 和 148 个,包括 126 个小麦品种。采用问卷调查获得所选地块的肥料

用量、小麦品种、种植模式等信息。其中,施有机肥的田块均折合氮、磷、钾纯养分计入肥料用量。小麦收获时,每个田块选择 $10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 长势均匀的区域作为采样区。在样区内随机选择三个有代表性的 1

m² 样方，测定穗数，并随机采集包含 100 个穗的小麦全株^[6]，剪除根系，地上部秸秆和穗作为考种和化学分析样品，风干后脱粒。分取籽粒、秸秆和颖壳样品 30~40 g，快速用自来水和去离子水冲洗三次，于 65℃ 烘干至恒重，计算风干样品含水量。测定小麦千粒重，计算穗粒数和收获指数。烘干的植物样品用碳化钨研磨罐的球磨仪（MM400，德国）研细混匀，密封待测。籽粒、秸秆（包括茎叶、颖壳和穗轴）生物量和千粒重均以烘干质量表示。

在采样区的小麦行间，随机选择三个样点，20 cm 为一层，用不锈钢土钻采 0~100 cm 的土壤样品，同层的土样捏碎混匀，取 500 g 作为分析样品。风干后，研磨过 1 mm 尼龙筛，用于测定土壤 pH、硝态氮和铵态氮、有效磷、速效钾和有效铁、有效锰、有效铜、有效锌含量；研磨过 0.15 mm 尼龙筛，用于分析土壤有机质和全氮。

1.3 样品测定

植株样品用浓 HNO₃-H₂O₂ 微波消解，电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS（iCAP Qc，美国）测定锌含量。以小麦粉国家标准物质（GWB10011，GSB-2）监控消解、测定过程质量。

土壤 pH 采用 2.5 : 1 水土比、pH 计（PHS-3C，雷磁，上海）测定；1 mol·L⁻¹ KCl 浸提、高分辨连续流动分析仪（AA3，SEAL，德国）测定硝态氮、铵态氮含量；0.5 mol·L⁻¹ 的 NaHCO₃ 浸提、连续流动分析仪测定有效磷；1 mol·L⁻¹ 的 NH₄OAc 浸提、火焰光度计（Model 410，Sherwood，英国）测定速效钾；有效铁、有效锰、有效铜、有效锌用 pH 7.30

的二乙三胺五乙酸-氯化钙-三乙醇胺（DTPA-CaCl₂-TEA）浸提、原子吸收分光光度计（Z-2000，Hitachi，日本）测定；有机质用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 氧化法测定；全氮用浓 H₂SO₄ 加混合催化剂消煮、连续流动分析仪测定。

1.4 数据计算与分析

籽粒产量以三要素的乘积表示，锌吸收量和锌收获指数计算公式如下：

$$\text{籽粒(秸秆)锌吸收量} / (\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{籽粒(秸秆)生物量} / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{籽粒(秸秆)锌含量} / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / 1000$$

$$\text{锌收获指数} / \% = \text{籽粒锌吸收量} / (\text{籽粒锌吸收量} + \text{秸秆锌吸收量}) \times 100$$

为了便于土壤锌营养调控与管理，根据 0~20 cm 土层的有效锌含量将调研田块划分为缺锌土壤（DTPA-Zn < 1.0 mg·kg⁻¹）和非缺锌土壤（DTPA-Zn ≥ 1.0 mg·kg⁻¹）两类^[11]。两类土壤间的差异用独立样本成组数据 *t* 检验分析；缺锌、非缺锌土壤，不同指标与籽粒锌含量的关系用皮尔森（Pearson）相关系数表示，显著性水平设为 0.05。所有分析均用统计软件 SPSS 21.0 完成。

2 结果

2.1 黄淮麦区小麦籽粒锌含量

黄淮麦区土壤缺锌和非缺锌的田块比例分别为 42% 和 58%。分析表明（图 1），缺锌田块籽粒锌含量

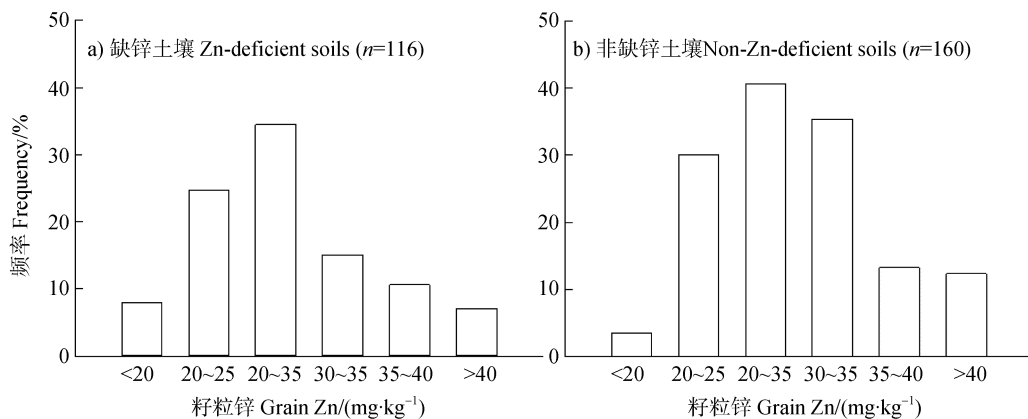


图 1 黄淮麦区缺锌 (a) 和非缺锌 (b) 土壤的小麦籽粒锌含量频率分布

Fig. 1 Frequency distributions of wheat grain Zn concentration in wheat fields of Zn-deficient soils (a) and non-Zn-deficient soils (b) investigated in the Huanghuai wheat production region of China

介于 16~52 mg·kg⁻¹, 平均为 29 mg·kg⁻¹, 7% 的样本籽粒锌达到满足人体锌营养需求的 40~60 mg·kg⁻¹ 推荐值。非缺锌田块, 籽粒锌含量介于 17~58 mg·kg⁻¹, 平均为 30 mg·kg⁻¹, 9% 的样本超过 40 mg·kg⁻¹。黄淮海区小麦籽粒锌含量平均为 30 mg·kg⁻¹。

2.2 小麦产量和锌吸收利用与籽粒锌关系

分析表明, 土壤缺锌与否影响小麦籽粒产量和

地上部锌吸收(表 2)。与非缺锌田块相比, 缺锌田块的籽粒产量和收获指数分别降低 9% 和 3%, 籽粒和秸秆锌吸收分别降低 13% 和 10%。相关分析表明, 无论缺锌还是非缺锌田块, 小麦籽粒锌含量与籽粒、秸秆锌吸收量均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与产量、秸秆生物量、产量构成及锌收获指数无显著相关。

表 2 黄淮海区缺锌和非缺锌土壤的小麦产量、产量构成、锌吸收利用及其与籽粒锌含量的关系 ($n = 276$)

Table 2 Grain yield, yield composition, and Zn uptake and utilization of the wheat crop and their relationships with grain Zn concentration relative to soil Zn levels (deficient and non-deficient) in the Huanghuai wheat production region of China ($n = 276$)

描述性统计 Descriptive statistics	土壤锌水平 Soil Zn status	籽粒产量 Grain yield/ (kg·hm ⁻²)	秸秆生物量 Straw biomass/ (kg·hm ⁻²)	穗数 Spike number/ (10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand kernel weight/g
平均值 Mean	缺锌 ^①	7 204b	8 171a	563a	31.8a	41.5a
	非缺锌 ^②	7 857a	8 380a	573a	33.2a	41.7a
范围 Range	缺锌 ^①	3 843~12 817	4 150~14 940	259~871	18.2~51.7	29.8~52.7
	非缺锌 ^②	3 639~12 994	4 443~14 504	348~884	17.0~51.8	28.5~54.2
中位数 Median	缺锌 ^①	7 010	7879	538	31.1	41.6
	非缺锌 ^②	7 637	8012	567	32.9	41.8
相关系数 ^③	缺锌 ^①	0.039	0.151	-0.017	0.107	-0.106
	非缺锌 ^②	-0.069	0.002	-0.056	-0.107	0.114

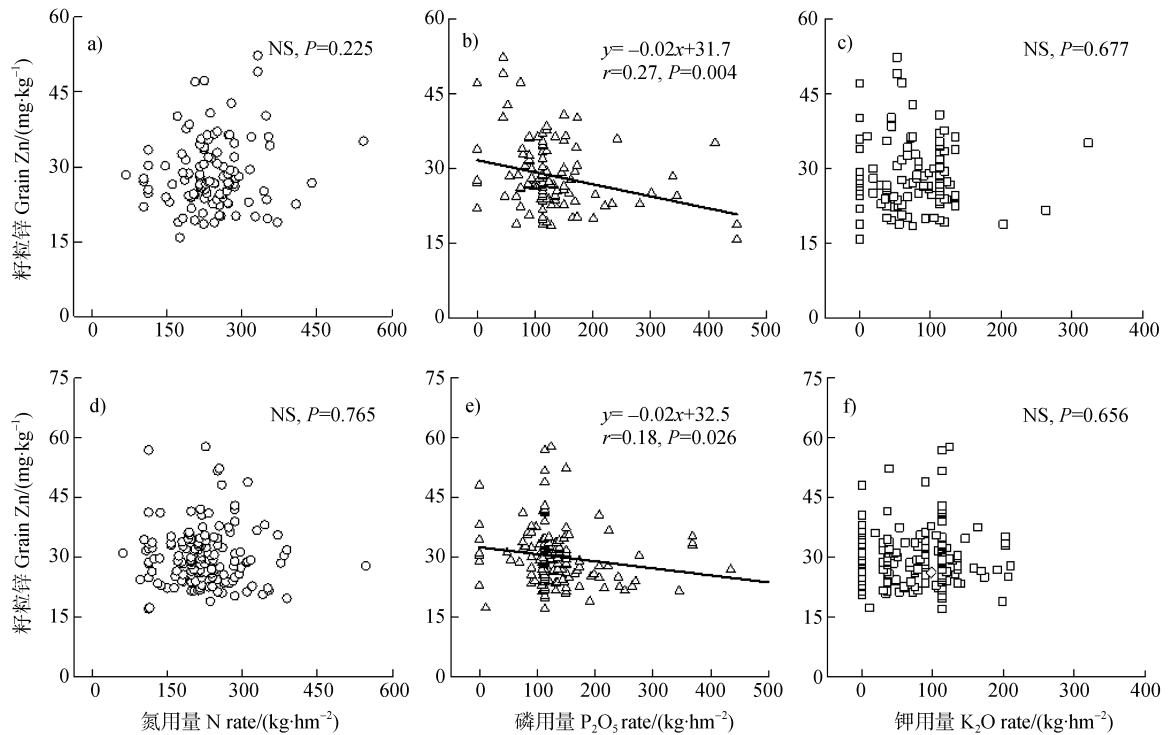
描述性统计 Descriptive statistics	土壤锌水平 Soil Zn status	收获指数 Harvest index/ %	籽粒锌吸收 Grain Zn uptake/ (g·hm ⁻²)	秸秆锌吸收 Straw Zn uptake/ (g·hm ⁻²)	锌收获指数 Zn harvest index/ %
平均值 Mean	缺锌 ^①	46.9b	206b	73b	74a
	非缺锌 ^②	48.3a	237a	81a	74a
范围 Range	缺锌 ^①	30.7~57.7	86~433	26~312	53~88
	非缺锌 ^②	34.3~57.8	103~449	30~188	53~87
中位数 Median	缺锌 ^①	48	188	63	75
	非缺锌 ^②	49	219	73	74
相关系数 ^③	缺锌 ^①	-0.146	0.705**	0.386**	0.157
	非缺锌 ^②	-0.092	0.652**	0.356**	0.15

注: 同列不同小写字母表示两种土壤的差异达 5% 显著水平, * 和 ** 分别代表相关性达显著和极显著水平, 下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between two soils at 0.05 level of *t*-test, and * and ** represent significance of the correlations at $P < 0.05$ and at $P < 0.01$ level, respectively. ① Zn-deficiency, ② Non-Zn-deficiency, ③ Correlation coefficients. The same below.

2.3 肥料用量与籽粒锌关系

调研区域均未施用锌肥, 缺锌、非缺锌田块, 分别有 10% 和 18% 的农户施用了有机肥。回归分析表明, 两类土壤的籽粒锌含量均随磷肥用量增加明

显下降, 而与氮钾肥用量无关(图 2)。缺锌田块, 平均氮、磷、钾肥用量分别为 241、128 和 78 kg·hm⁻², 磷肥用量为 69~203 kg·hm⁻² 时, 籽粒锌含量介于 (27.6±13.0)~(30.3±13.0) mg·kg⁻¹。非缺锌田块,



注：NS，不显著，下同。 Note: 'NS' means no significant. The same below.

图 2 黄淮麦区缺锌 (a) ~ c)) 和非缺锌 (d) ~ f)) 土壤小麦籽粒锌含量与氮、磷、钾肥用量的关系

Fig. 2 Relationships of grain Zn concentration with N, P and K fertilization rates in fields of Zn-deficient soils (a) -c)) and non-Zn-deficient soils (d) -f)) investigated in the Huanghuai wheat production region of China

平均氮、磷、钾肥用量分别为 224、135 和 80 kg·hm⁻²，磷肥用量为 80~214 kg·hm⁻² 时，籽粒锌含量介于 (28.2±14.0) ~ (30.9±14.0) mg·kg⁻¹。

2.4 土壤养分与籽粒锌关系

分析表明 (图 3)，决定小麦籽粒锌含量变异的主要土壤养分因土壤锌情况而异。相关分析发现，缺锌田块，籽粒锌含量与 0~20 cm 有效磷极显著负相关，与 60~80 cm 铵态氮显著正相关；回归分析表明，0~20 cm 土壤有效磷为 5.5~34 mg·kg⁻¹ 时，籽粒锌含量介于 (26.1±11.8) ~ (30.6±11.8) mg·kg⁻¹ (图 4a)。非缺锌田块，籽粒锌含量与 0~40 cm 有效锌和 0~20 cm 有效铁均呈显著正相关关系；回归分析表明，0~20 cm 土壤有效锌为 1.1~4.9 mg·kg⁻¹ 时，籽粒锌含量介于 (28.9±13.8) ~ (32.7±13.8) mg·kg⁻¹ (图 4b)。

3 讨论

3.1 黄淮麦区小麦籽粒锌含量变异

在黄淮麦区，无论是缺锌还是非缺锌土壤，小

麦籽粒锌含量均存在较大变异 (图 1)，与伊朗、塞尔维亚和我国黄土高原等地的结果类似^[17-19]，两种土壤上，分别有 7% 和 9% 的样本籽粒锌达到满足人体锌营养需求的 40 mg·kg⁻¹。调研中，农户小麦种植并不施用锌肥，说明通过合理的农艺措施调控，即使不施锌肥，也可使小麦籽粒锌含量提高至目标需求值。两种土壤上的小麦籽粒锌含量均与产量无关 (表 2)，可见“产量稀释”效应或者不存在，或者被其他因素的作用削弱，在实际生产中它并不是改善农户小麦籽粒锌营养的限制因素。品种也可能是籽粒锌含量变异的一个因素。虽然调研区域农户种植的品种繁多，且多为当地主栽品种，但相同品种出现频次有限，如种植最广泛的济麦 22，在缺锌、非缺锌田块出现的次数分别为 11 和 20，多数品种不足三次，较少的样本量限制了品种对籽粒锌贡献的分析，同时也从另一方面说明田间管理、土壤条件等对改善区域小麦籽粒锌营养的重要性。因此，施肥和土壤养分引起的作物锌吸收利用差异应得到重视。

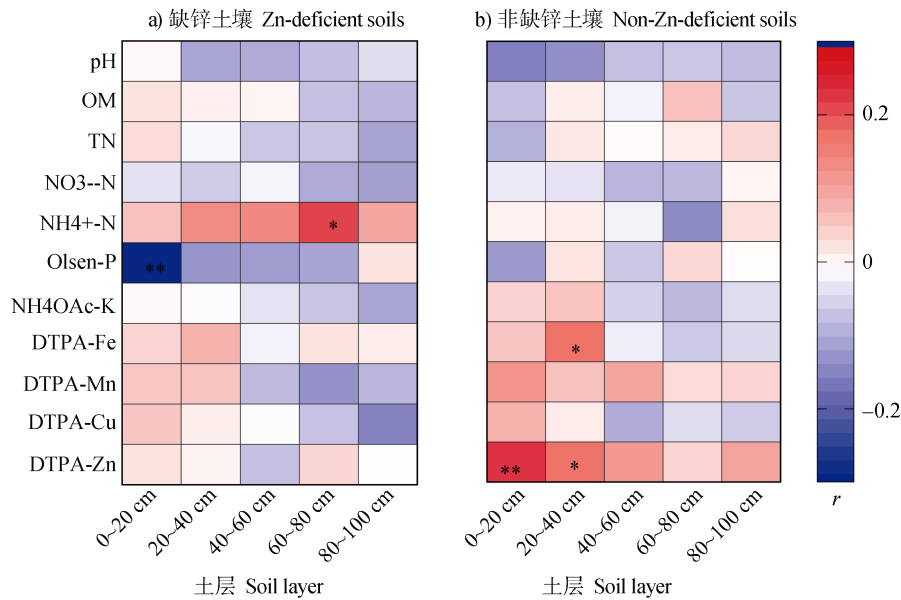


图 3 黄淮麦区缺锌 (a)、非缺锌 (b) 土壤的小麦籽粒锌含量与 0~100 cm 土壤养分的简单相关关系

Fig. 3 Pearson correlations between grain Zn concentration and soil nutrients in the 0-100 cm soil layers in the fields of Zn-deficient soils (a) and non-Zn-deficient soils (b) investigated in the Huanghuai wheat production region of China

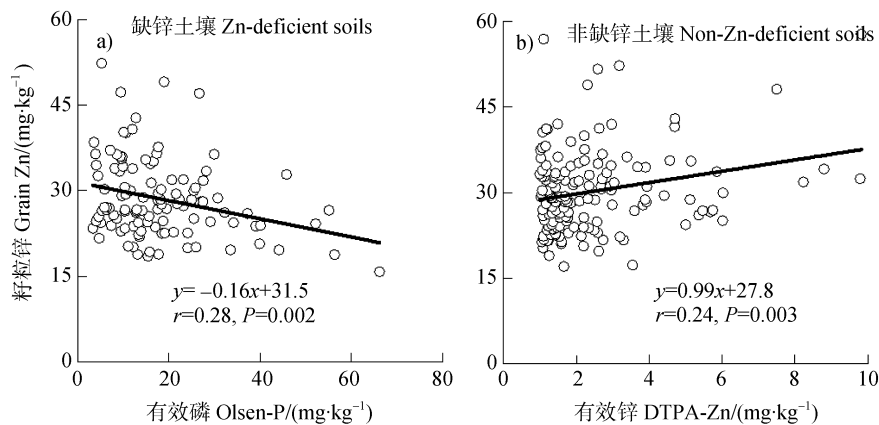


图 4 黄淮麦区缺锌土壤 0~20 cm 有效磷与籽粒锌含量 (a) 及非缺锌土壤 0~20 cm 有效锌与籽粒锌含量 (b) 的关系

Fig. 4 Relationships of grain Zn concentration with soil available P (a) and Zn (b) in the 0-20 cm soil layer of the fields of Zn-deficient and non-Zn-deficient soils investigated in the Huanghuai wheat production region of China, respectively

3.2 缺锌土壤的籽粒锌含量变异原因及调控

缺锌田块, 籽粒锌含量与磷肥用量、0~20 cm 的土壤有效磷显著负相关。说明较高的磷肥投入和表层土壤有效磷是该地区小麦籽粒锌含量低的主要原因。大量研究表明, 磷肥施用会降低根系锌吸收、锌由根系向地上部转移以及菌根侵染, 进而诱导作物缺锌, 降低籽粒锌含量^[20-21]。在河北曲周有效磷为 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的石灰性冲积土上, 纯磷施用量由 0 增加至 $100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 小麦籽粒锌含量由 $46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[22], 相应的表层土壤有

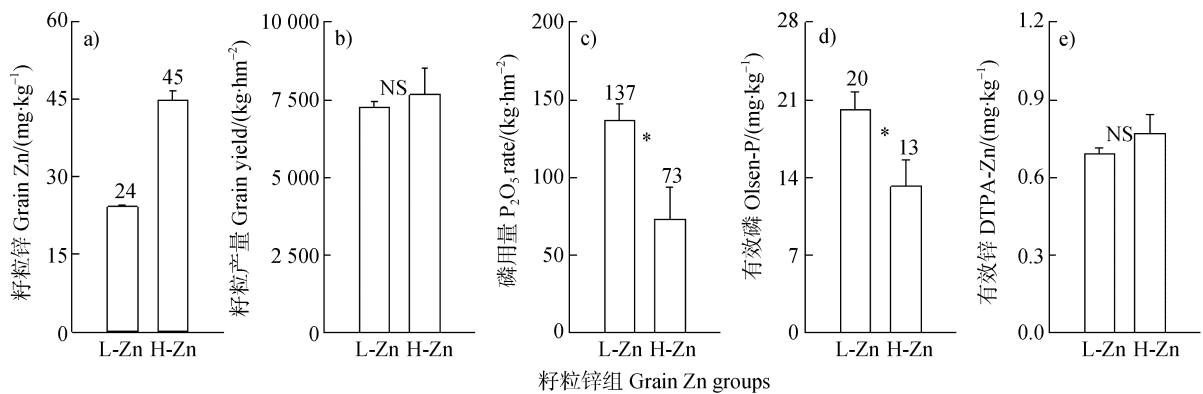
效磷从 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14]。本研究中, 缺锌田块 0~20 cm 土壤有效磷平均为 $18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 4), 高于优化作物生长所需的适宜范围 $11\sim 15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[23-24], 平均磷肥用量 $128 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 也高于当地定位试验推荐的最佳磷肥用量 $114 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[25]。因此, 在保障小麦不减产的前提下, 应适当减少磷肥投入, 降低土壤有效磷, 改善小麦锌营养。

需注意的是, 本研究中小麦籽粒锌含量与土壤有效锌无关, 而与地上部锌吸收呈显著正相关 (表 2)。小麦籽粒锌来源于土壤锌, 但即使在土壤

锌缺乏的情况下，还会有其他因素促使小麦吸收了更多的锌，以提高其籽粒锌含量。除了品种外，氮肥的投入可能是另外一个重要原因。黄土高原缺锌土壤上，氮肥用量由 0 增加至 $320 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，小麦籽粒锌含量从 $22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，地上部锌吸收由 $127 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增至 $243 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ [26]。华北平原石灰性缺锌土壤的研究也表明，氮肥用量由 0 增至 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，小麦根系和地上部锌吸收分别增加了 108% 和 304%，籽粒锌含量由 $26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [27]。黄淮麦区，农户施氮量普遍较高，平均 $241 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。充足的氮营养可增强小麦锌吸收和锌在韧皮部的移动，进而增加籽粒锌的累积 [28-29]。

可见，对于缺锌田块，降低磷肥投入和土壤有效磷是提高籽粒锌含量的主要措施。为调控籽粒锌至目标值，将籽粒锌含量高于 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本定为高锌组，低于平均值 ($29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的定为低锌

组 (图 5)。低、高锌组的小麦平均籽粒锌含量分别为 24 和 $45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，籽粒产量为 $7\ 267$ 和 $7\ 669 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，施磷量 137 和 $73 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，土壤有效磷 20 和 $13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有效锌 0.7 和 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见，改善缺锌土壤的小麦籽粒锌营养，不会以牺牲产量为代价，且两组平均产量对应的需磷 (P_2O_5) 量分别为 65.8 和 $68.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [30]，与高锌组的施磷量 $73 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 接近。因此，应减少当前较高的磷肥投入，使与作物从土壤带走的磷量保持一致。黄淮麦区约有 42% 的田块为缺锌土壤，土壤有效锌的差异虽然不能解释籽粒锌变异 (图 3)，但与非缺锌土壤相比，缺锌土壤的小麦产量确实降低 (表 2)。说明减施磷肥的同时，也应解决土壤缺锌问题，补施锌肥或有机无机配施等 [31-32]，使缺锌田块的有效锌至少先提升至临界值 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上，以实现小麦增产提锌。



注：L-Zn，低锌组为籽粒锌含量低于平均值的样本，H-Zn，高锌组为籽粒锌含量高于 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本。误差线为均数标准误；*表示低高锌组的差异达 5% 显著水平，NS 代表两组间差异不显著，下同。Note: 'L-Zn' means grain samples lower than the mean value in Zn concentration in the group of fields of Zn-deficient soils, and 'H-Zn', those higher than $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in Zn concentration in the group of fields of non-Zn-deficient soils. Error bars are standard deviations of the means. The symbols of * and NS represents significant difference and insignificant difference between the low and high Zn groups by *t*-test at 0.05 level, respectively. The same below.

图 5 缺锌田块低高锌组的籽粒锌含量 (a)、籽粒产量 (b)、磷用量 (c)、土壤有效磷 (d) 和有效锌 (e)

Fig. 5 Grain Zn concentration (a), grain yield (b), P fertilization rate (c), and soil available P (d) and Zn (e) in the fields relative to soil Zn levels

3.3 非缺锌土壤的籽粒锌含量变异原因及调控

研究表明，黄淮麦区 58% 的田块属于非缺锌土壤。非缺锌田块，籽粒锌含量与磷肥用量显著负相关、而与土壤有效磷无关。土壤有效锌为 $2.3\sim 2.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的盆栽试验中，磷供应从 $20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，小麦籽粒产量增加了 113%，锌含量降低了 38% [33]。华北平原农户施磷肥常过高 [34]，本调研中磷肥用量介于 $0\sim 518 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，平均

为 $135 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，籽粒产量 $7\ 857 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，土壤有效磷高达 $29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，已是小麦生长最佳土壤有效磷范围的近 2 倍 [23-24]。说明过高的磷供应已成为抑制小麦锌吸收的根本原因。多数关于磷锌互作的田间研究主要集中于缺锌土壤 [21, 35-36]，对非缺锌土壤的磷锌作用机理有待进一步探索。再者，本研究中，小麦籽粒锌含量与土壤有效锌、地上部锌吸收均呈显著正相关 (图 3b, 表 2)，证明在施磷过高、土壤

有效磷也过高的非缺锌土壤,较高的土壤有效锌对小麦籽粒锌含量提高亦重要。河北小麦-玉米轮作体系连续三年施用锌肥的试验表明,小麦籽粒锌含量与土壤有效锌呈线性-平台的关系,当有效锌高于 $7.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,籽粒锌含量不再增加,保持在 $53.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [37]。本研究中,非缺锌田块 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土壤的有效锌介于 $1.0\sim 9.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,多数农田有效锌仍低于 $7.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 4b)。墨西哥黏壤土的有效锌高达 $9.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不会出现作物生长受阻和环境风险 [38],同样,河北石灰性土壤连续 8 年施锌的研究也表明,合理锌肥用量 ($5.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 明显改善籽粒锌营养的同时,不会引起其他重金属元素 (如 Cu、Cd、Pb、Cr、As) 积累带来的健康风险 [39]。因此,在黄淮麦区,降低磷肥用量和土壤有效磷含量,提高土壤有效锌,对改善小麦籽粒锌

营养非常重要。

同样,将籽粒锌含量高于 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本定为高锌组,低于平均值 $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的定为低锌组 (图 6)。在非缺锌土壤上,低、高锌组的小麦籽粒锌含量分别为 25 和 $46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,籽粒产量为 $7\ 840$ 和 $7\ 189 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥用量 145 和 $112 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,土壤有效磷 30 和 $29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效锌 2.2 和 $3.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6),说明可在不减产的前提下,提高非缺锌田块的小麦籽粒锌含量。两组平均产量对应的需磷 (P_2O_5) 量分别为 69.2 和 $70.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [30],低于农户施磷量。因此,在非缺锌土壤上,更需减少磷肥用量,因有效磷过高,有效锌成了决定小麦籽粒锌的主要因素 (图 3),降低磷肥用量的同时,也应注重土壤有效锌的提高,如提倡施用锌肥或配施有机肥等 [40-41],保持有效锌在 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上。

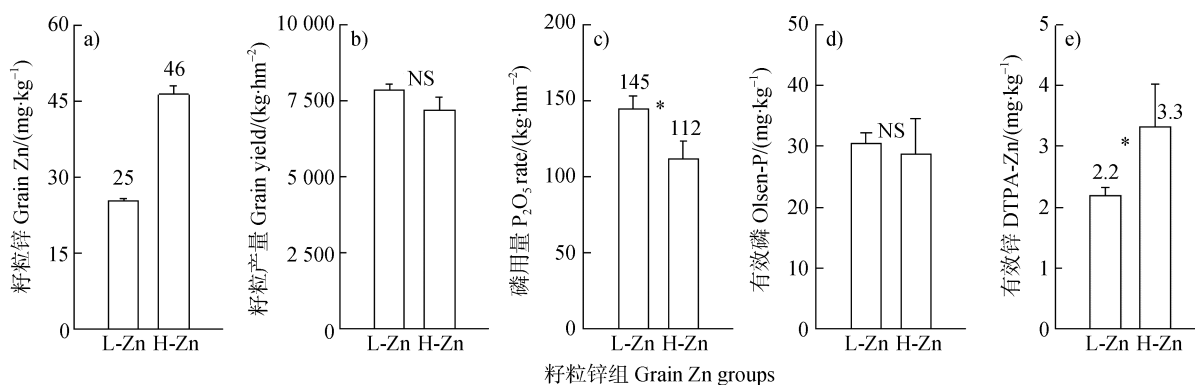


图 6 非缺锌田块低高锌组的籽粒锌含量 (a)、籽粒产量 (b)、磷用量 (c)、土壤有效磷 (d) 和有效锌 (e)
Fig. 6 Grain Zn concentration (a), grain yield (b), P fertilization rate (c), and soil available P (d) and soil available Zn (e) in the fields relative to soil Zn levels

4 结论

黄淮麦区农田土壤缺锌和非缺锌的比例为 42% 和 58%,两种土壤的小麦籽粒锌含量均存在较大变异,分别有 7%和 9%的样本籽粒锌达到 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 推荐标准。无论土壤是否缺锌,籽粒锌含量不受“产量稀释”效应影响,但缺锌田块的籽粒产量、地上部锌吸收明显低于非缺锌田块。较高的磷肥用量和土壤有效磷及较低的有效锌是实现小麦高产增锌的主要障碍因子。缺锌土壤,首先应解决土壤缺锌问题,至少先将有效锌提高至临界值 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,非缺锌土壤的有效锌保持在 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,同时减少磷肥用量、降低土壤有效磷,以减轻磷-锌拮抗

作用,维持小麦高产并改善籽粒锌营养。

致谢 感谢国家小麦产业技术体系综合试验站科研人员、技术推广工作者和当地农户在样品采集方面的给予的协作和支持。

参考文献 (References)

- [1] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.[中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2019.]
- [2] Liu H, Wang Z H, Yu R, et al. Optimal nitrogen input for higher efficiency and lower environmental impacts of winter wheat production in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 224: 1—11.

- [3] Pan J X, Zhang L, He X M, et al. Long-term optimization of crop yield while concurrently improving soil quality[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30 (8): 897—909.
- [4] Bouis H E, Eozenou P, Rahman A. Food prices, household income, and resource allocation: Socioeconomic perspectives on their effects on dietary quality and nutritional status[J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2011, 32 (1_suppl1): S14—S23.
- [5] Ma G S, Jin Y, Li Y P, et al. Iron and zinc deficiencies in China: What is a feasible and cost-effective strategy?[J]. *Public Health Nutrition*, 2008, 11 (6): 632—638.
- [6] Bouis H E, Saltzman A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016[J]. *Global Food Security*, 2017, 12: 49—58.
- [7] Liu H, Wang Z H, Li F C, et al. Grain iron and zinc concentrations of wheat and their relationships to yield in major wheat production areas in China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 151—160.
- [8] Dimkpa C O, Bindraban P S. Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36: Article number 7.
- [9] Chattha M U, Hassan M U, Khan I, et al. Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00281>.
- [10] Khoshgoftarmanesh A H, Afyuni M, Norouzi M, et al. Fractionation and bioavailability of zinc (Zn) in the rhizosphere of two wheat cultivars with different Zn deficiency tolerance[J]. *Geoderma*, 2018, 309: 1—6.
- [11] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31 (5): 537—548.
- [12] Shi R L, Zhang Y Q, Chen X P, et al. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 51 (1): 165—170.
- [13] Xia H Y, Xue Y F, Liu D Y, et al. Rational application of fertilizer nitrogen to soil in combination with foliar Zn spraying improved Zn nutritional quality of wheat grains[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 677.
- [14] Zhang W, Liu D Y, Liu Y M, et al. Zinc uptake and accumulation in winter wheat relative to changes in root morphology and mycorrhizal colonization following varying phosphorus application on calcareous soil[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 74—82.
- [15] 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.
- [16] Ma X L, Wang Z H, Cao H B, et al. Yield variation of winter wheat and its relation to yield components, NPK uptake and utilization in drylands of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (5): 1135—1145.[马小龙, 王朝辉, 曹寒冰, 等. 黄土高原旱地小麦产量差异与产量构成及氮磷钾吸收利用的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1135—1145.]
- [17] Karami M, Afyuni M, Khoshgoftarmanesh A H, et al. Grain zinc, iron, and copper concentrations of wheat grown in central Iran and their relationships with soil and climate variables[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57 (22): 10876—10882.
- [18] Nikolic M, Nikolic N, Kostic L, et al. The assessment of soil availability and wheat grain status of zinc and iron in Serbia: Implications for human nutrition[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 141—148.
- [19] She X, Wang Z H, Ma X L, et al. Variation of winter wheat grain zinc concentration and its relation to major soil characteristics in dryland of the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (22): 4338—4349.[余旭, 王朝辉, 马小龙, 等. 黄土高原旱地冬小麦籽粒锌含量差异与主要土壤理化性状的关系[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (22): 4338—4349.]
- [20] Su D, Zhou L J, Zhao Q, et al. Different phosphorus supplies altered the accumulations and quantitative distributions of phytic acid, zinc, and iron in rice (*Oryza sativa* L.) grains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66 (7): 1601—1611.
- [21] Zhu Y G, Smith S E, Smith F A. Zinc (Zn) -phosphorus (P) interactions in two cultivars of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) differing in P uptake efficiency[J]. *Annals of Botany*, 2001, 88(5): 941—945.
- [22] Zhang W, Liu D Y, Liu Y M, et al. Overuse of phosphorus fertilizer reduces the grain and flour protein contents and zinc bioavailability of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65 (8): 1473—1482.
- [23] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372 (1/2): 27—37.
- [24] Tang X, Ma Y B, Hao X Y, et al. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 323 (1/2): 143—151.
- [25] Zhang W. The mechanisms of zinc uptake and accumulation in wheat and maize as affected by phosphorus levels[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. [张伟. 供磷水平对小麦玉米锌吸收、累积的影响及其作用机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.]

- [26] Jin J J, Wang Z H, Dai J, et al. Effects of long-term N and P fertilization with different rates on Zn concentration in grain of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (6): 1358—1367.[靳静静, 王朝辉, 戴健, 等. 长期不同氮、磷用量对冬小麦籽粒锌含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (6): 1358—1367.]
- [27] Xue Y F, Zhang W, Liu D Y, et al. Effects of nitrogen management on root morphology and zinc translocation from root to shoot of winter wheat in the field[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 38—45.
- [28] Kutman U B, Yildiz B, Cakmak I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 53 (1): 118—125.
- [29] Mao H, Wang J, Wang Z, et al. Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14 (2): 459—470
- [30] Huang Q N, Wang Z H, Huang T M, et al. Relationships of N, P and K requirement to wheat grain yield of farmers in major wheat production regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (14): 2722—2734.[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.]
- [31] Grüter R, Costerousse B, Mayer J, et al. Long-term organic matter application reduces cadmium but not zinc concentrations in wheat[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 608—620.
- [32] Chen Y L, Jia Z, Shi J L, et al. Effect of straw return on diffusion, translocation and transformation of zinc in calcareous soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 721—733.[陈艳龙, 贾舟, 师江澜, 等. 秸秆还田对石灰性土壤 Zn 扩散迁移及形态转化的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (3): 721—733.]
- [33] Ova E A, Kutman U B, Ozturk L, et al. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution[J]. *Plant and Soil*, 2015, 393 (1/2): 147—162.
- [34] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349 (1/2): 157—167.
- [35] Ryan M H, McInerney J K, Record I R, et al. Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88 (7): 1208—1216.
- [36] Zhang W, Liu D Y, Li C, et al. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 155—161.
- [37] Liu D Y, Zhang W, Pang L L, et al. Effects of zinc application rate and zinc distribution relative to root distribution on grain yield and grain Zn concentration in wheat[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411 (1/2): 167—178.
- [38] Vaca R, Lugo J, Martínez R, et al. Effects of sewage sludge and sewage sludge compost amendment on soil properties and *Zea mays* L. plants (heavy metals, quality and productivity) [J]. *Revista Internacional de Contamination Ambiental*, 2011, 27: 303—311
- [39] Liu Y M, Liu D Y, Zhang W, et al. Health risk assessment of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, As and Cr) in wheat grain receiving repeated Zn fertilizers[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113581.
- [40] 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.[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.]
- [41] Lu X C, Zou W X, Han X Z, et al. Determination of Zn availability in black soil with physical-chemical methods[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (4): 985—994.[陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 黑土锌有效度的物理化学研究法[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (4): 985—994.]

(责任编辑: 陈荣府)