

## 渭北旱塬豆科绿肥提高冬小麦籽粒锌的效应与影响因素研究

刘苡轩<sup>1</sup>, 黄冬琳<sup>1</sup>, 刘娜<sup>1</sup>, 姚致远<sup>1</sup>, 尹丹<sup>1</sup>, 蒙元永<sup>1</sup>, 赵护兵<sup>1</sup>, 高亚军<sup>1</sup>, 王朝辉<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>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)

**摘要:**【目的】针对渭北旱塬石灰性土壤有效锌含量低, 小麦籽粒锌含量不高的问题, 研究不同豆科绿肥轮作对小麦籽粒锌的作用, 揭示其提高小麦籽粒锌含量的影响因素, 为改善居民锌摄入水平提供思路及实践依据。

【方法】2016—2017 年在永寿和长武两地开展田间试验, 完全随机区组设计。永寿试验地处理为休闲-小麦、黑麦豆-小麦和绿豆-小麦 3 种处理; 长武试验地为休闲-小麦、怀豆-小麦和绿豆-小麦 3 种处理。采集永寿、长武两地的绿肥、小麦和土壤样品进行分析。【结果】与休闲相比, 永寿各豆科绿肥-小麦轮作的小麦各器官生物量显著降低了 19.2%—38.3%; 长武各豆科绿肥-小麦轮作显著减少了小麦茎叶、颖壳生物量, 降幅为 19.9%—33.2%。永寿黑麦豆-小麦和长武怀豆-小麦轮作较休闲显著提高了小麦籽粒锌含量, 分别增加了 14.2%和 18.6%。黑麦豆-小麦、怀豆-小麦轮作对小麦的增锌作用一定程度上补偿了减产对小麦锌累积量的影响, 长武怀豆-小麦轮作的小麦各器官及地上部锌累积量与休闲无显著差异。小麦籽粒锌含量与豆科绿肥的锌吸收量呈显著正相关关系, 豆科绿肥锌吸收量每增加 1.0 g·hm<sup>-2</sup>, 小麦籽粒锌含量增加 0.23 mg·kg<sup>-1</sup>。黑麦豆、怀豆的锌、氮吸收量相对较高, C/N 较绿豆分别低了 18.6%和 20.4%。黑麦豆-小麦、怀豆-小麦轮作较休闲在小麦收获期显著提高了土壤硝态氮含量, 增幅分别为 36.7%和 69.1%。豆科绿肥-小麦轮作在小麦生长过程中对土壤 DTPA-Zn 含量基本无显著影响。

【结论】黑麦豆、怀豆两种豆科绿肥因自身比较高的锌、氮吸收量以及较低的 C/N, 可显著提高后茬小麦籽粒锌含量。同时绿肥自身富集锌的能力可作为筛选小麦适宜增锌绿肥品种的依据。总之, 豆科绿肥-小麦轮作模式是提高小麦籽粒锌含量, 改善居民膳食锌摄入的有效生物强化手段。

**关键词:** 渭北旱塬; 豆科绿肥; 轮作; 冬小麦; 籽粒; 锌含量

## The Increasing Effect and Influencing Factors of Leguminous Green Manure on Wheat Grain Zn in Weibei Highland

LIU YiXuan<sup>1</sup>, HUANG DongLin<sup>1</sup>, LIU Na<sup>1</sup>, YAO ZhiYuan<sup>1</sup>, YIN Dan<sup>1</sup>, MENG YuanYong<sup>1</sup>, ZHAO HuBing<sup>1</sup>, GAO YaYun<sup>1</sup>, WANG ZhaoHui<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>2</sup>Northwest A&F University/State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Yangling 712100, Shaanxi)

**Abstract:** 【Objective】Weibei Highland is one of important winter wheat production areas in northwest China, where Zn concentration in wheat grain are generally low due to soil bioavailable Zn deficiency. So we decided to study leguminous green manure-wheat rotations whether could improve wheat Zn concentration in different regions of Weibei Highland, and to explore the factors affecting wheat Zn biofortification by leguminous green manure-wheat rotations. 【Method】Two field experiments were carried out during 2016-2017 cropping seasons in Yongshou and Changwu with a completely randomized block design. There were three main treatments: Summer fallow-wheat (FW) as CK, black kidney bean-wheat (KW) and mung bean-wheat (MW) in Yongshou;

收稿日期: 2018-05-10; 接受日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (41401330)、国家重点研发计划 (2018YFD0200401)、国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503124)

联系方式: 刘苡轩, E-mail: liuyixuan930720@126.com。通信作者黄冬琳, E-mail: dlynnhuang@nwfau.edu.cn

Summer fallow-wheat (FW) as CK, huai bean-wheat (HW) and mung bean-wheat (MW) in Changwu. Plant samples of legumes, wheat and 0-20 cm soil samples at different wheat growing stages were collected for chemical analysis. 【Result】 In Yongshou, compare with FW, wheat grain yield and biomass were decreased by 19.2%-38.3% under leguminous green manure-wheat rotations,. In Changwu, leguminous green manure-wheat rotations did not significantly reduce wheat grain yield, but reduced wheat glumes and straw biomass by 19.9%-33.2%. KW rotation in Yongshou and HW rotation in Changwu significantly increased grain Zn concentration by 14.2% and 18.6%, respectively, which partially compensated the potential reduction of wheat grain Zn export and aboveground shoot Zn uptake by increasing Zn concentrations of wheat grain and straw Zn concentration due to the shrink of wheat yield and biomass. There was no significant difference of wheat Zn uptake between HW and FW treatments in Changwu. Wheat grain Zn concentration was positively correlated with leguminous manure shoot Zn uptake. Wheat grain Zn concentration increases  $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  when green manure shoot Zn uptake increases  $1.0 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ , correspondingly. Besides, the Zn, N content of black kidney bean and huai bean were both higher than that of mung bean. Moreover, compared with mung bean, C/N of black kidney bean and huai bean were lower by 18.6% and 20.4%, respectively. At wheat maturity stage, soil nitrate of KW and HW rotations were both higher than that of FW by 36.7% and 69.1%, respectively. Leguminous green manure-wheat rotations had rarely significant effect on soil DTPA-Zn concentration during the growth of wheat. 【Conclusion】 Relatively higher Zn and N content and lower in C/N of black kidney bean and huai bean made them more readily improved subsequently wheat Zn uptake and accumulation than that of mung bean. The positive correlation between wheat grain Zn concentration and leguminous green manure shoot Zn uptake could be the guidance for screening and optimizing green manure varieties for wheat Zn biofortification. Therefore, leguminous green manure-wheat rotations could be an effective biofortification method to enhance wheat Zn nutrition for residents which suffered from Zn deficiency.

**Key words:** Weibei highland; leguminous green manure; rotation; winter wheat; grain; Zn concentration

## 0 引言

【研究意义】锌是维持人体健康不可缺少的必要营养元素,参与生长发育中重要的生理生化过程。人体缺锌会引发诸如生长发育迟缓,新陈代谢缓慢,免疫力低下等一系列严重的健康问题<sup>[1-4]</sup>。日常膳食是人体补充锌营养的主要途径<sup>[3]</sup>,小麦是我国北方的主粮作物,小麦锌含量的高低直接影响以小麦为主食人群的锌营养状况。渭北旱塬土壤是典型的石灰性土壤,高 pH、碳酸盐含量高、土壤有机质低和土壤水分缺乏等因素严重制约了土壤锌生物有效性<sup>[5]</sup>,该区域生产的小麦籽粒锌含量平均值低于  $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[6-9]</sup>,远低于满足人体锌需求的小麦籽粒推荐锌含量  $40-60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[5]</sup>,因此研究活化土壤锌、增加小麦籽粒锌含量的有效途径并探索其可能的影响因素,改善以小麦为主食人群的锌摄入状况,具有重要的科学意义。【前人研究进展】通过小麦育种获取锌高效型品种是提高小麦富锌能力的重要途径之一,但科研投入较高,耗时较长且依赖于土壤锌含量的高低<sup>[9]</sup>。施用锌肥是较为常用、可短期提高小麦籽粒锌含量的农艺措施,但不同于土耳其等低锌地区研究结果<sup>[10-11]</sup>,我国石灰性土壤上的试验发现土施锌肥无法有效提高小麦锌含量<sup>[7,12]</sup>。而喷施锌肥虽能够显著增加小麦锌含量<sup>[7,12]</sup>,但需要多次喷施,耗费人力,在我国目前

农村缺乏劳力的情况下,喷施锌肥并不经济。豆科作物自古以来作为绿肥被广泛用于提高土壤有机质含量,改善土壤结构,并为后茬作物提供养分<sup>[13-14]</sup>。近期有研究表明,豆科绿肥轮作还能够活化土壤锌,增加后茬作物锌含量。印度的小麦水稻轮作体系中,插播豆科绿肥能够显著提高小麦籽粒锌含量  $21.1\%$ <sup>[15]</sup>。伊朗低锌石灰性土壤种植豆科作物后显著增加后茬小麦籽粒锌含量<sup>[16-18]</sup>。我国黄土高原进行的一年田间试验也发现,绿豆、怀豆和大豆 3 种豆科绿肥与小麦轮作均可显著提高小麦籽粒锌含量,增幅在  $7.1\%-28.6\%$ <sup>[5]</sup>。【本研究切入点】渭北旱塬地区小麦籽粒锌含量偏低,当地居民膳食锌营养无法满足的问题亟待解决。利用豆科绿肥与小麦轮作模式,以生物强化途径提高小麦籽粒锌含量的研究较少,石灰性土壤地区不同地点不同种类豆科绿肥与小麦轮作对小麦锌含量的影响是否存在差异,产生这些差异的影响因素是什么,尚不清楚。【拟解决的关键问题】本研究通过渭北旱塬地区永寿和长武两个地点开展的田间试验,分析测定 2016—2017 年的绿肥、小麦及土壤样品,研究渭北旱塬永寿长武两地不同种类豆科绿肥与小麦轮作对小麦的增锌作用,并对绿肥自身性质和吸锌特点、土壤氮素及有效锌含量变化与小麦籽粒锌含量的关系进行分析,明确豆科绿肥与小麦轮作提高小麦籽粒锌含量的影响因素,为优选适宜小

麦增锌的豆科绿肥品种，改善当地居民的锌营养状况提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016—2017 年在陕西省永寿县御中村(东经 108°11'34", 北纬 34°43'38")及长武县十里铺村(东经 107°40'30", 北纬 35°12'00")进行。永寿县试验是 2015 年开始的田间定位试验, 该试验地海拔 972 m, 年平均气温 10.5℃, 年平均蒸发量 1 100 mm, 年平均

降水量 530 mm, 2016 年 7 月至 2017 年 6 月降雨量为 445 mm (图 1), 土壤类型为黄绵土。长武县试验地是 2009 开始的田间定位试验, 试验地海拔 1 220 m, 年均温 9.1℃, 年平均蒸发量 967 mm, 年平均降雨量 550 mm, 2016 年 7 月至 2017 年 6 月降雨量为 562 mm (图 1), 土壤为黄盖黏黑垆土。两试验地均位于黄土高原, 为旱地雨养农业区, 主要耕作制度为一年一熟, 冬小麦生长期为 9 月下旬到次年的 6 月份, 夏闲期为 7—9 月, 该时期内耕地为裸地休闲。供试土壤基础理化性质见表 1。

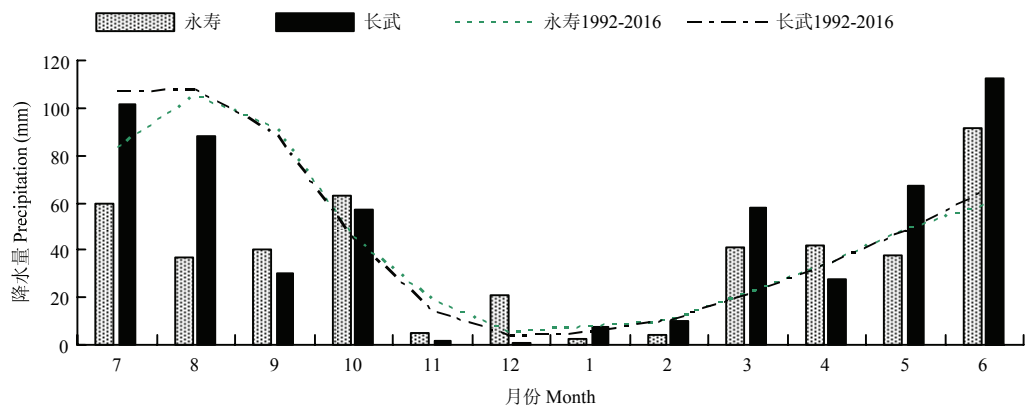


图 1 2016—2017 年及 25 年 (1992-2016) 平均降水量

Fig. 1 Precipitation from 2016 to 2017 and 25 year average precipitation (from 1992 to 2016)

表 1 土壤基础理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils (0-20 cm)

地点 Site	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Olsen-P (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )	矿质氮 Inorganic nitrogen		DTPA-Zn (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
					NO <sup>3</sup> -N (mg·kg <sup>-1</sup> )	NH <sup>4</sup> +-N (mg·kg <sup>-1</sup> )		
永寿县 Yongshou	12.92	0.82	11.2	134.0	11.9	4.75	0.44	8.5
长武县 Changwu	11.80	0.77	4.5	131.9	13.1	2.55	0.33	8.1

1.2 试验设计

试验以夏休闲为对照, 采用不同豆科绿肥与小麦轮作模式, 完全随机区组设计。永寿试验地 3 个处理分别为休闲—小麦 (FW)、黑麦豆—小麦 (KW) 和绿豆—小麦 (MW); 长武试验地 3 个处理为休闲—小麦 (FW)、怀豆—小麦 (HW) 和绿豆—小麦 (MW)。永寿试验小区面积为 66 m<sup>2</sup> (6 m×11 m), 小区间距 40 cm, 重复 4 次。长武试验小区面积是 30 m<sup>2</sup> (5 m×6 m), 小区间距 30 cm, 重复 3 次。

黑麦豆和怀豆分别是永寿、长武地区当地豆科品种, 绿豆品种为横山绿豆。黑麦豆和怀豆播量为 165

kg·hm<sup>-2</sup>, 绿豆为 135 kg·hm<sup>-2</sup>。永寿、长武两地的小麦品种分别为小偃 22 和长武 521, 播量均为 120 kg·hm<sup>-2</sup>。绿肥季不施氮磷肥, 小麦播前氮磷肥一次施入, 永寿氮磷用量为 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>和 160 kg N·hm<sup>-2</sup>, 长武为 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>和 162 kg N·hm<sup>-2</sup>, 磷肥为过磷酸钙, 氮肥为尿素, 同一试验地所有小区氮磷用量一致。永寿和长武试验分别于 2016 年 7 月 4 日和 6 月 24 日播种豆科绿肥, 2016 年 9 月 7 日和 9 月 5 日豆科绿肥盛花期收获, 后使用秸秆还田机切碎, 并进行原地翻压还田。同年 9 月 28 日和 9 月 25 日播种冬小麦, 2017 年 6 月 10 日和 6 月 25 日收获小麦。作物生长期间的田间管理同当地农户。

1.3 样品采集与测定

绿肥使用 4 个 1 m<sup>2</sup> 样方计产。每个小区随机采集 30 株完整绿肥样品，分茎叶和根系，量取部分样品用去离子水清洗后 90℃ 杀青 0.5 h，65℃ 烘至恒重，用氧化锆球磨仪（莱驰 MM400，德国）粉碎，用于后续分析。小麦收获采用 4 个 1 m<sup>2</sup> 样方计产。每个小区随机采集 50 株小麦，将植株连根拔起之后在茎根结合部剪掉根系，分为籽粒、茎叶、颖壳 3 部分用于后续分析，样品处理方法同绿肥。绿肥翻压前、小麦播前及小麦收获期，每小区随机选取 3 点采集 0—20 cm 土壤构成混合样品，室内阴凉处自然风干，去除植物残体，过 2 mm 尼龙筛备用。

粉碎的植物样品用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 微波消解仪（安东帕 MWPro）消解后，使用原子吸收分光光度计（日立 Z2000）测定豆科绿肥和小麦各器官锌含量；豆科绿肥茎叶样品的碳氮含量采用有机元素分析仪（Elementar Vario micro）测定；土壤硝态氮含量采用 KCl 浸提法浸提、连续流动分析仪（德国 Seal，AA3）测定；土壤有效锌含量采用 DTPA 浸提法浸提、原子吸收分光光度计测定。

1.4 数据计算与分析

试验中相关指标及其计算公式：

锌累积量 (g·hm<sup>-2</sup>) = 生物量 (kg·hm<sup>-2</sup>) × 锌含量 (mg·kg<sup>-1</sup>) / 1000<sup>[19]</sup>；

收获指数 (%) = 小麦产量 (kg·hm<sup>-2</sup>) / 地上部生物量 (kg·hm<sup>-2</sup>) × 100；

锌收获指数 (%) = 籽粒锌累积量 (g·hm<sup>-2</sup>) / 地上部锌累积量 (g·hm<sup>-2</sup>) × 100<sup>[20-21]</sup>。

试验数据采用 Excel 2016 软件进行整理与计算，并通过 DPS7.05 和 SPSS 19.0 统计分析软件分析，多重比较采用 LSD（least significant difference）法，差异显著性水平为 5%。

2 结果

2.1 豆科绿肥—小麦轮作对小麦产量、生物量和收获指数的影响

较休闲—小麦（FW）处理，永寿、长武两地不同种类豆科绿肥—小麦轮作均不同程度影响了后茬小麦籽粒产量、颖壳、茎叶和地上部生物量（表 2）。永寿试验地，夏闲期（7—9 月）的降水量较 25 年同期平均降水量减少了 51.3%（图 1），绿肥生长也消耗大量土壤水分，黑麦豆—小麦（KW）和绿豆—小麦（MW）轮作处理较 FW 处理显著降低了小麦籽粒产量、颖壳生物量、茎叶生物量和地上部生物量，降低幅度分别为 28.5%和 19.2%，37.8%和 28.3%，38.3%和 26.2%，34.3%和 23.6%。长武试验地，夏闲期降水量较当地 25 年同期平均降水量减少了 27.4%（图 1），怀豆—小麦（HW）和绿豆—小麦（MW）轮作处理相比于 FW 处理显著降低了小麦颖壳、茎叶生物量及地上部生物量，降幅分别为 21.5%和 33.2%，25.0%和 26.0%，19.9%和 22.4%。同时，HW 和 MW 轮作处理有降低小麦籽粒产量的趋势，但未达显著差异。永寿长武两地不同豆科绿肥—小麦轮作较 FW 处理，对小麦收获指数均无显著影响。

永寿、长武两地的 MW 轮作处理之间相比，小麦各器官生物量有显著差异。永寿 MW 轮作处理的小麦籽

表 2 豆科绿肥—小麦轮作对小麦产量、各器官和地上部生物量及收获指数的影响

Table 2 Effects of different leguminous green manure-wheat rotations on yield, biomass and harvest index of winter wheat

地点	处理	籽粒产量	颖壳生物量	茎叶生物量	地上部生物量	收获指数
Site	Treatment	Grain yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	Glume biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	Stem biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	Shoot biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	Harvest index (%)
永寿 Yongshou	休闲—小麦 FW	4272a	1373a	5008a	10652a	40.5a
	黑麦豆—小麦 KW	3053b	854b	3092b	6999b	43.8a
	绿豆—小麦 MW	3452b*	984 ab*	3698b*	8135b*	42.5a
	平均 Mean	3592	1070	3933	8595	42.3
长武 Changwu	休闲—小麦 FW	2624a	967a	3444a	7036a	37.3a
	怀豆—小麦 HW	2291a	759b	2583b	5633b	40.6a
	绿豆—小麦 MW	2246a	646b	2547b	5458b	40.9a
	平均 Mean	2387	791	2858	6042	39.6

同列数据后不同小写字母表示同一地点不同豆科绿肥—小麦轮作处理之间差异性检验显著（P<0.05）。\*代表绿豆—小麦轮作处理在永寿长武两地同一指标的差异性检验显著（P<0.05）。下同

Different small letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level among different leguminous green manure-wheat rotation treatments at the same site. \* indicates significant difference at 0.05 level between mung bean-wheat rotation treatment at Yongshou and Changwu. The same as below

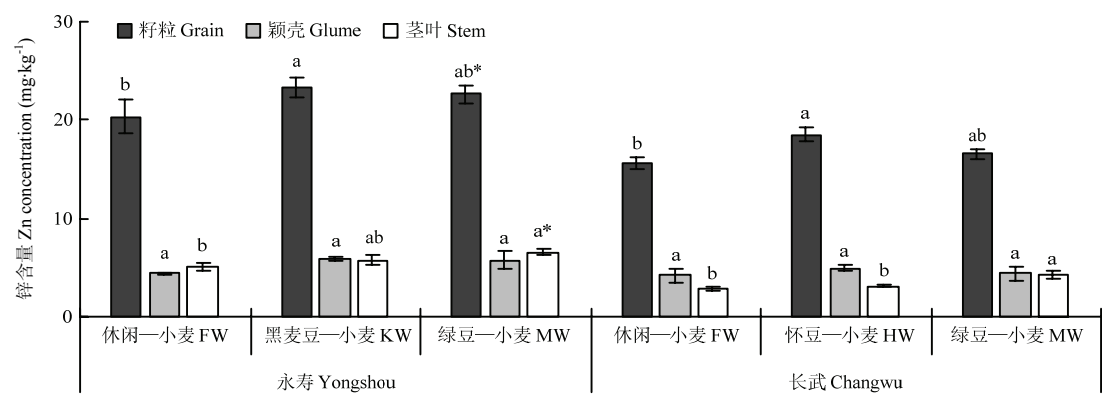
粒、颖壳、茎叶和地上部生物量较长武 MW 轮作处理分别显著增加了 53.7%、52.3%、45.2%和 49.0%。永寿长武两地 MW 轮作处理对小麦收获指数影响无显著差异。

2.2 豆科绿肥—小麦轮作对小麦锌含量的影响

与 FW 处理相比，永寿、长武两地不同豆科绿肥—小麦轮作均可显著提高小麦籽粒和茎叶的锌含量，但对颖壳锌含量无显著影响（图 2）。永寿 KW 轮作处理的小麦籽粒锌含量为 23.3 mg·kg<sup>-1</sup>，较 FW 处理显著提高了 14.2%；长武 HW 轮作处理较 FW 处理显著提高了小麦籽粒锌含量 18.6%，为 18.5 mg·kg<sup>-1</sup>。永寿、长武两地 MW 轮作处理均有提高小麦籽粒锌含量的趋势，但均未达显著差异。永寿、长武 MW 轮作处理皆可显著提高小麦茎叶锌含量，较 FW 处理分别增加

了 29.4%和 44.8%，为 6.6 和 4.2 mg·kg<sup>-1</sup>。  
永寿、长武两地 MW 轮作处理之间相比，永寿 MW 轮作处理的小麦籽粒和茎叶锌含量较长武 MW 轮作处理分别显著提高了 37.1%和 55.1%，但两地 MW 轮作处理的小麦颖壳锌含量无显著差异。  
2.3 豆科绿肥—小麦轮作对小麦锌累积量及锌收获指数的影响

永寿长武两地，不同豆科绿肥—小麦轮作对小麦各器官和地上部锌累积量影响不一（表 3）。永寿 KW 和 MW 轮作处理较 FW 处理显著降低了小麦籽粒和地上部锌累积量，降幅分别为 23.1%和 15.2%，24.4%和 12.7%。KW 和 MW 轮作处理均有降低小麦颖壳和茎叶锌累积量的趋势，但未达显著差异水平。在长武，对比 FW 处理，HW 和 MW 轮作处理没有显著降低小



图中相同类型的方柱上不同小写字母表示同一地点不同豆科绿肥—小麦轮作处理之间差异性检验显著 ( $P<0.05$ )，\*代表绿豆—小麦轮作处理在永寿长武两地同一指标的差异性检验显著 ( $P<0.05$ )  
Different small letters above the bars with the same symbols indicate significant differences at 0.05 level among different leguminous green manure-wheat rotation treatments at the same site. \* indicates significant differences at 0.05 level between mung bean-wheat rotation treatment at Yongshou and Changwu

图 2 豆科绿肥—小麦轮作对小麦各器官锌含量的影响

Fig 2 Effects of different leguminous green manure-wheat rotations on Zn concentration of winter wheat (mg·kg<sup>-1</sup>)

表 3 豆科绿肥—小麦轮作对小麦各部分锌累积量和锌收获指数的影响

Table 3 Effects of different leguminous green manure-wheat rotations on Zn accumulation and Zn harvest index of winter wheat

地点	处理	锌累积量 Zn content (g·hm <sup>-2</sup> )				锌收获指数
Site	Treatments	籽粒 Grain	颖壳 Glume	茎叶 Stem	地上部 Shoot	Zn harvest index (%)
永寿 Yongshou	休闲—小麦 FW	92.3a	6.0a	25.7a	124.0a	74.8a
	黑麦豆—小麦 KW	71.0c	4.8a	17.9a	93.8c	75.7a
	绿豆—小麦 MW	78.3b*	5.7a*	24.3a*	108.3b*	72.3a
	平均 Mean	80.5	5.5	22.7	108.7	74.3
长武 Changwu	休闲—小麦 FW	40.8a	4.1a	9.9a	54.9a	74.5a
	怀豆—小麦 KW	42.6a	3.7a	11.0a	57.3a	74.3a
	绿豆—小麦 MW	36.9a	2.8a	7.9a	47.6a	77.3a
	平均 Mean	40.1	3.5	9.6	53.2	75.4



麦各器官及地上部锌累积量。HW 轮作处理甚至有增加小麦籽粒、茎叶和地上部锌累积量的趋势，但未达显著差异水平。相比 FW 处理，各豆科绿肥—小麦轮作对永寿长武两地小麦锌收获指数无显著影响。

永寿长武两地 MW 轮作处理相比较，永寿试验地 MW 轮作处理的小麦籽粒、颖壳、茎叶和地上部锌累积量较长武 MW 轮作处理分别显著增加了 112.2%、103.5%、207.6%和 127.5%。造成此差异的主要原因是永寿长武两地 MW 轮作处理的小麦产量、生物量和小麦锌含量有差异，影响了小麦各器官锌累积量。永寿长武两地 MW 轮作处理的小麦锌收获指数无显著差异。

2.4 豆科绿肥—小麦轮作处理对小麦锌吸收的影响因素

2.4.1 豆科绿肥生物量及养分含量 两地试验结果表明（表 4），永寿黑麦豆的生物量较绿豆显著提高了 24.1%，2 种豆科生物量分别为 1 886 和 1 520 kg·hm<sup>-2</sup>。而在长武，怀豆和绿豆的生物量并无显著差别，分别为 1 242 和 1 294 kg·hm<sup>-2</sup>。永寿绿豆的生物量较长武

绿豆有提高的趋势，可能与两地不同的土壤环境和气候条件差异有关。

永寿黑麦豆植株的锌含量较绿豆降低了 13.1%。长武怀豆的锌含量较绿豆显著提高了 50.0%，达到 20.4 mg·kg<sup>-1</sup>。永寿绿豆锌含量较长武绿豆显著提高，增幅为 85.3%。永寿黑麦豆的锌吸收量较绿豆有提高的趋势，长武怀豆的锌吸收量对比绿豆亦有增加的趋势，但均未达显著性差异。永寿绿豆的锌累积量较长武绿豆显著提高了 117.5%。

豆科绿肥自身的 C/N、氮含量及氮吸收量的高低均可改变豆科绿肥的腐解速率以及土壤硝态氮含量，进而影响后茬小麦对锌的吸收（表 4）。在永寿，黑麦豆的 C/N 为 13.1，较绿豆降低了 18.6%，相对应黑麦豆的氮含量和氮吸收量较绿豆显著提高，增幅分别为 28.8%和 60.1%。在长武，怀豆的 C/N 对比绿豆显著降低，降幅为 20.4%，怀豆氮含量较绿豆显著增加了 29.1%。怀豆的氮吸收量较绿豆亦有增加的趋势，但未达显著差异水平。永寿长武两地绿豆相比，C/N、氮含量及氮吸收量均无显著差异。

表 4 豆科绿肥地上部生物量及养分含量

Table 4 Shoot biomass and chemical properties of leguminous green manures

地点	处理	生物量	锌含量	锌吸收量	C/N	氮含量	氮吸收量
Site	Treatment	Biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	Zn concentration (mg·kg <sup>-1</sup> )	Zn uptake (g·hm <sup>-2</sup> )		N concentration (g·kg <sup>-1</sup> )	N uptake (kg·hm <sup>-2</sup> )
永寿	黑麦豆—小麦 KW	1886a	21.9b	41.4a	13.1b	33.5a	63.2a
Yongshou	绿豆—小麦 MW	1520 b	25.2a*	38.5a*	16.1a	26.0b	39.5b
长武	怀豆—小麦 KW	1242a	20.4a	25.4a	13.3b	32.8a	40.8a
Changwu	绿豆—小麦 MW	1294a	13.6b	17.7a	16.7a	25.4b	32.7a

2.4.2 小麦籽粒锌含量与豆科绿肥锌吸收量的关系 对小麦籽粒锌含量与豆科绿肥锌吸收量进行相关性分析可知（图 3），小麦籽粒锌含量与豆科绿肥锌吸收量之间呈极显著正相关关系（ $R^2=0.59^{**}$ ），意味着绿肥吸锌能力越强，则其翻压还田后对后茬小麦籽粒锌含量的提升作用越大。绿肥锌吸收量每增加 1.0 g·hm<sup>-2</sup>，小麦籽粒锌含量随之增加 0.23 mg·kg<sup>-1</sup>。绿肥的富锌能力（锌含量×生物量）是影响后茬小麦锌吸收及籽粒锌累积的重要因素。

永寿、长武两地 MW 轮作处理相比，样点在图中分布有所差异，永寿 MW 轮作处理的数据点主要位于右上侧，而长武的则位于左下侧，表明不同地点生长条件下，同一品种绿豆锌吸收量存在差异。锌吸收量直接影响后茬小麦锌含量的变化，豆科绿肥锌吸收量

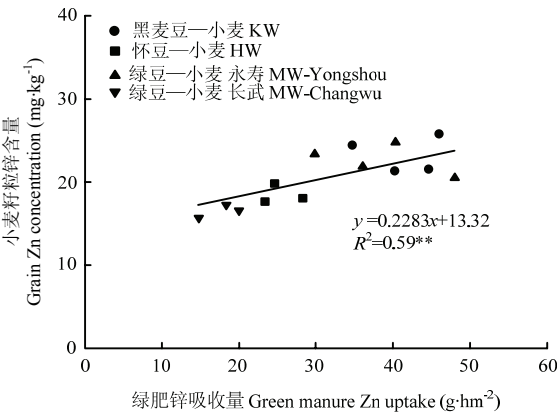


图 3 小麦籽粒锌含量与豆科绿肥锌吸收量的相关关系  
Fig. 3 Correlation between wheat grain Zn concentration and leguminous green manure Zn uptake

越高则后茬小麦籽粒锌含量越高。

**2.4.3 豆科绿肥—小麦轮作对小麦关键生育时期土壤 DTPA-Zn 和硝态氮含量的影响** 除永寿绿肥翻压前, MW 轮作处理较 FW 处理显著提高了土壤 DTPA-Zn 含量, 增幅为 30.4%外, 其他豆科绿肥—小麦轮作处理并未对绿肥翻压前、小麦播前及小麦收获期土壤 DTPA-Zn 的含量产生显著影响(表 5)。永寿、

长武两地 MW 轮作处理间相比, 绿肥翻压前、小麦播前及小麦收获期的土壤 DTPA-Zn 含量亦无显著差异。豆科绿肥—小麦轮作虽未显著提高土壤 DTPA-Zn 含量,但在不同品种豆科绿肥生长和腐解过程中释放的有机酸类物质可能改变了土壤中不同形态锌组分的分布, 促进了较难利用的锌形态向交换态、有机结合态等易被植物吸收的形态转化, 从而促进了小麦对锌的吸收。

表 5 豆科绿肥—小麦轮作在小麦关键生育期对 0—20 cm 土层 DTPA-Zn 及土壤硝态氮含量的影响

Table 5 Effects of different leguminous green manure rotations on the DTPA-Zn and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in 0-20 cm soil at the critical growing stages of wheat (mg·kg<sup>-1</sup>)

地点 Site	处理 Treatment	土壤有效锌含量 DTPA-Zn			土壤硝态氮含量 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N content	
		绿肥翻压前 GMI	小麦播前 SOW	小麦收获期 MAT	小麦播前 SOW	小麦收获期 MAT
永寿 Yongshou	休闲—小麦 FW	0.23b	0.23a	0.52a	9.2a	3.0b
	黑麦豆—小麦 KW	0.29ab	0.27a	0.44a	8.8a	4.1a
	绿豆—小麦 MW	0.30a	0.29a	0.47a	5.0b	3.6ab
	平均 Mean	0.28	0.26	0.48	7.7	3.6
长武 Changwu	休闲—小麦 FW	0.36a	0.34a	0.47a	15.3a	9.7b
	怀豆—小麦 HW	0.35a	0.37a	0.45a	14.6a	16.4a
	绿豆—小麦 MW	0.34a	0.39a	0.44a	16.4a*	13.2ab*
	平均 Mean	0.35	0.37	0.45	15.4	13.1

GMI: 绿肥翻压前 Green manure incorporation stage; SOW: 小麦播前 Sowing stage of wheat; MAT: 小麦成熟期 Maturity stage of wheat

豆科绿肥—小麦轮作处理显著影响了小麦收获期土壤硝态氮含量的变化(表 5)。小麦收获期, 与 FW 处理相比, 永寿 KW 轮作处理和长武 HW 轮作处理均显著增加了土壤硝态氮含量, 增幅分别为 36.7%和 69.1%。永寿长武两地 MW 轮作处理均表现出提高土壤硝态氮含量的趋势, 但未达显著差异。在小麦播前和收获期, 永寿 MW 轮作处理的土壤硝态氮含量较长武 MW 轮作处理显著降低, 降幅分别为 69.5%和 72.7%。

3 讨论

与休闲—小麦(FW)处理相比, 永寿、长武两地豆科绿肥—小麦轮作处理均可显著提高小麦籽粒的锌含量, 且黑麦豆—小麦(KW)和怀豆—小麦(HW)轮作处理的小麦籽粒锌含量较绿豆—小麦(MW)轮作处理显著增加。这与同在渭北旱塬进行的其他研究结果一致, 豆科绿肥与小麦轮作可有效增加小麦籽粒锌含量<sup>[6-7]</sup>。且本研究中黑麦豆—小麦(KW)和怀豆—小麦(HW)轮作处理较绿豆—小麦(MW)轮作处理对小麦的增锌效果更为显著。分析豆科绿肥的各指标可知, 相比绿豆, 黑麦豆与怀豆 C/N 比较低, 且地

上部锌吸收量相对较高(表 4)。小麦籽粒锌含量与绿肥地上部锌吸收量的相关性分析发现, 后茬小麦锌含量与豆科绿肥锌吸收量呈极显著正相关关系(图 3), 说明豆科绿肥吸收富集锌的高低直接影响后茬小麦锌的吸收和累积。C/N 较低的豆科绿肥不仅拥有较低的锌残留率, 能较快的释放体内贮藏的锌进入土壤<sup>[22-23]</sup>, 而且生长和腐解时也更易释放柠檬酸, 苹果酸, 草酸等可溶性有机酸, 降低土壤 pH, 增加土壤溶解性有机碳含量, 而这些有机物质可以通过络合作用解离土壤颗粒固定的锌, 提高土壤溶液的锌含量, 被后茬作物吸收利用, 增加后茬小麦籽粒中的锌含量<sup>[16-18, 24-25]</sup>。黑麦豆和怀豆分别为永寿长武当地的绿肥品种, 相比横山绿豆, 更适应当地土壤环境气候, 生物量更高, 其生长和腐解过程可能释放较多的有机酸类物质, 对土壤中锌的活化作用较强, 是后茬小麦锌含量提高的重要原因<sup>[5, 26-27]</sup>。

绿豆在永寿长武两地生物量、锌含量以及其对后茬小麦产量及锌含量的影响均存在显著差异, 这可能与两地土壤理化性质、降水条件以及两地小麦品种存在差异有关<sup>[28-29]</sup>。永寿绿豆锌含量及锌吸收量较长武

绿豆均显著增加,绿豆翻压还田后,永寿绿豆—小麦(MW)轮作处理对小麦锌含量的提升幅度相比长武绿豆—小麦(MW)轮作处理更高,符合绿肥锌吸收量与小麦籽粒锌含量之间的正相关关系(图3)。

作物锌含量与土壤有效锌含量密切相关,DTPA-Zn 含量一般用于表征中性及碱性土壤有效锌的含量。而土壤中不同锌形态组分对 DTPA-Zn 含量贡献不同,主要由交换态锌、松解有机结合态、碳酸盐结合态、氧化锰结合态、紧结有机结合态锌构成<sup>[30]</sup>。YANG 等<sup>[7]</sup>的研究中发现,种植豆科绿肥并翻压增加了小麦播前、扬花、收获期土壤 DTPA-Zn 含量,也提高了后茬小麦籽粒锌含量。贺建群等<sup>[31]</sup>研究表示土壤 DTPA-Zn 有效锌含量与小麦籽粒锌累积量呈显著正相关关系。但近几年也有研究发现,土壤 DTPA-Zn 含量并非总是能够反映土壤锌的生物有效性的变化,如在黄土高原田间试验中,土施绿肥可显著提高土壤 DTPA-Zn 含量 1.8—3 倍,但小麦锌吸收并未显著增加<sup>[8,32]</sup>。前茬作物还田能够增加小麦锌含量和累积量,但土壤 DTPA-Zn 变化幅度不大<sup>[16]</sup>。本试验结果也发现,永寿 KW 和长武 HW 轮作处理能够显著增加小麦的锌含量,但土壤 DTPA-Zn 含量与 FW 处理无显著差异。这是因为 DTPA-Zn 反映的是土壤交换态、松解有机结合态、碳酸盐结合态、氧化铁锰结合态等形态锌的总和,植物利用这些结合态锌的难易程度有所不同<sup>[30]</sup>。KW、HW 轮作处理虽没有增加 DTPA-Zn 的含量,但会改变土壤锌形态的分布,促进土壤各形态锌之间的转化。绿肥生长和腐解过程产生的小分子有机酸类物质能促进植物较难利用的碳酸盐结合态、氧化铁锰结合态向较易利用的交换态及松结有机结合态转化,从而增加了小麦对锌的吸收和累积<sup>[30,33-34]</sup>。

黑麦豆和怀豆自身的氮含量及氮吸收量相比绿豆更高,且 C/N 均较低,腐解过程中利于自身氮素的释放,增加土壤中硝态氮的含量(表4—5)。有研究表明,土壤硝态氮含量的增加有利于小麦根系对锌的吸收,小麦体内增加的含氮配体也有利于锌的累积和运输,从而提高小麦籽粒锌含量<sup>[35-36]</sup>。与之类似,本研究中永寿 KW 轮作处理和长武 HW 轮作处理在小麦收获期的土壤硝态氮含量相比 FW 处理显著增加,同时 KW 和 HW 轮作处理的小麦籽粒锌含量较 FW 处理也显著提高。因此,豆科绿肥通过释放自身氮,增加土壤硝态氮含量可能也是促进小麦籽粒锌含量增加的重要原因。

此外,各豆科绿肥—小麦轮作处理在永寿长武两

地由于夏闲期降水较少,绿肥生长消耗土壤水分造成了后茬小麦产量显著降低,而籽粒产量的减少可能也会引起豆科绿肥—小麦轮作处理的小麦籽粒锌含量较 FW 处理显著增加<sup>[16-17]</sup>。

虽然本试验中不同豆科绿肥—小麦轮作降低了小麦产量及生物量,但豆科绿肥—小麦轮作通过增加小麦籽粒、茎叶锌含量补偿了小麦产量及生物量降低对小麦锌累积量及地上部锌累积量<sup>[7,16]</sup>的影响,使得豆科绿肥—小麦轮作的小麦锌累积量与 FW 处理相比差异变小,甚至长武 HW 轮作处理有增加小麦籽粒和地上部锌累积量的趋势。

## 4 结论

研究表明渭北旱塬地区豆科绿肥—小麦轮作模式较传统夏休闲—小麦处理可显著提高小麦籽粒锌含量。C/N 是代表豆科绿肥腐解速率的重要指标,同时豆科绿肥生长时富集的锌、氮营养在绿肥腐解过程中会对土壤中锌、氮元素的活性产生作用,从而影响后茬小麦籽粒锌含量的高低。黑麦豆和怀豆由于具有较高的生物量、锌和氮吸收量以及较低的 C/N,能够快速腐解释放自身锌、氮,从而活化土壤锌,增加土壤氮含量促进后茬小麦对锌的吸收和累积,增锌效果显著。同时,豆科绿肥自身富集锌的多少与后茬小麦籽粒锌含量也存在极显著的正相关关系,凭此筛选条件可优选增锌绿肥品种,促进小麦籽粒锌含量增加,减缓该地区居民锌营养摄入偏低状况。

## References

- [1] 黄秋婵,韦友欢,石景芳.微量元素锌对人体健康的生理效应及其防治途径.微量元素与健康研究,2009,26(1):68-70.  
HUANG Q C, WEI Y H, SHI J F. The physiological effects of zinc trace elements on the human health and its measures of preventing. *Studies of Trace Elements & Health*, 2009, 26(1): 68-70. (in Chinese)
- [2] KING J C, BROWN K H, GIBSON R S, KREBS N F, LOWE N M, SIEKMANN J H, RAITEN D J. Biomarkers of nutrition for development (bond)-zinc review. *Journal of Nutrition*, 2016, 146(4): 858-885.
- [3] 欧阳红,何尤琥.缺锌对健康的危害及补锌过程中应注意的问题.广东微量元素科学,2001,8(12):8-11.  
OUYANG H, HE Y H. Harm of zinc deficiency to health and problems during replenishment of zinc. *Guangdong Trace Elements Science*. 2001, 8(12): 8-11. (in Chinese)
- [4] GIBSON R S. Zinc deficiency and human health: Etiology, health



- consequences, and future solutions. *Plant and Soil*, 2012, 361(1/2): 291-299.
- [5] CAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2): 1-17.
- [6] 李可懿, 王朝辉, 赵护兵, 赵娜, 高亚军, LYONS G. 黄土高原旱地小麦与豆科绿肥轮作及施氮对小麦产量和籽粒养分的影响. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 110-116.
- LI K Y, WANG Z H, ZHAO H B, ZHAO N, GAO Y J, LYONS G. Effect of rotation with legumes and N fertilization on yield and grain nutrient contents of wheat in dryland of the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 110-116. (in Chinese)
- [7] YANG N, WANG Z H, GAO Y J, ZHAO H B, LI K Y, LI F C, MALHI S S. Effects of planting soybean in summer fallow on wheat grain yield, total N and Zn in grain and available N and Zn in soil on the loess plateau of China. *European Journal of Agronomy*, 2014, 58(1): 63-72.
- [8] 李孟华, 王朝辉, 王建伟, 毛晖, 戴健, 李强, 邹春琴. 低锌旱地施肥方式对小麦产量和锌利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1346-1355.
- LI M H, WANG Z H, WANG J W, MAO H, DAI J, LI Q, ZOU C Q. Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1346-1355. (in Chinese)
- [9] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 陆欣春, 南雄雄. 小麦和小黑麦籽粒的营养品质及其相关性分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 104-110.
- CAO Y X, TIAN X H, YANG X W, LU X C, NAN X X. Variation of nutritional quality and their relationships in wheat and triticale grain. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2010, 38(1): 104-110. (in Chinese)
- [10] YILMAZ A, EKIZ H, TORUN B, GÜLTEKIN I, KARANLIK S, BAGCI S A, CAKMAK I. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(4/5): 461-471.
- [11] CAKMAK I, KALAYCI M, KAYA Y, TORUN A A, AYDIN N, WANG Y, ARISOY Z, ERDEM H, YAZICI A, GOKMEN O, OZTURK L, HORST W J. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16): 9092-9102.
- [12] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 陆欣春, 陈辉林, 南雄雄, 李秀丽. 土施和喷施锌肥对冬小麦籽粒锌含量及生物有效性的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1394-1401.
- CAO Y X, TIAN X H, YANG X W, LU X C, CHEN H L, NAN X X, LI X L. Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1394-1401. (in Chinese)
- [13] 张达斌. 黄土高原地区种植豆科绿肥协调土壤水分和氮素供应的效应及机理[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- ZHANG D B. Effects of leguminous green manure on soil water and nitrogen supply and its mechanism in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [14] 萧道庸. 中国古代耕作与施肥辑要. 北京: 中国农业出版社, 2014: 328-338.
- XIAO D Y. *The Introduction of Tillage and Fertilization in Ancient China*. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 328-338. (in Chinese)
- [15] SINGH A, SHIVAY Y S. Residual effect of summer green manure crops and Zn fertilization on quality and Zn concentration of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under a Basmati rice-durum wheat cropping system. *Biological Agriculture and Horticulture*, 2013, 29(4): 271-287.
- [16] SOLTANI S, KHOSHGOFTARMANESH A H, AFYUNI M, SHRIVANI M, SCHULIN R. The effect of preceding crop on wheat grain zinc concentration and its relationship to total amino acids and dissolved organic carbon in rhizosphere soil solution. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 50(2): 239-247.
- [17] HABIBY H, AFYUNI M, KHOSHGOFTARMANESH A H, SCHULIN R. Effect of preceding crops and their residues on availability of zinc in a calcareous Zn-deficient soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(7): 1061-1067.
- [18] KHOSHGOFTARMANESH A H, NOROUZI M, AFYUNI M, SCHULIN R. Zinc biofortification of wheat through preceding crop residue incorporation into the soil. *European Journal of Agronomy*, 2017, 89: 131-139.
- [19] 靳静静, 王朝辉, 戴健, 王森, 高雅洁, 曹寒冰, 于荣. 长期不同氮、磷用量对冬小麦籽粒锌含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1358-1367.
- JIN J J, WANG Z H, DAI J, WANG S, GAO Y J, CAO H B, YU R. Effects of long-term N and P fertilization with different rates on Zn concentration in grain of winter wheat. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1358-1367. (in Chinese)
- [20] XUE Y F, YUE S C, ZHANG Y Q, CUI Z L, CHEN X P, YANG F C, CAKMAK I, MCGRATH S P, ZHANG F S, ZOU C Q. Grain and shoot zinc accumulation in winter wheat affected by nitrogen management. *Plant and Soil*, 2012, 361(1/2): 153-163.
- [21] ZHANG W, LIU D, LI C, CUI Z L, CHEN X P, RUSSELL Y, ZOU C

- Q. Zinc accumulation and remobilization in winter wheat as affected by phosphorus application. *Field Crops Research*, 2015, 184(6): 155-161.
- [22] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 曹群虎, 李敏, 曹卫东, 高亚军. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1179-1187.
- ZHAO N, ZHAO H B, YU C W, CAO Q H, LI M, CAO W D, GAO Y J. Nutrient releases of leguminous green manures in rainfed lands. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1179-1187. (in Chinese)
- [23] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 耿明建, 李小坤, 曹卫东. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 216-223.
- PAN F X, LU J W, LIU W, GENG M J, LI X K, CAO W D. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of three kinds of green manure crops. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 216-223. (in Chinese)
- [24] ANDREW E J. Influence of low molecular weight organic acids on zinc distribution within micronutrient pools and zinc uptake by wheat1. *Journal of Plant Nutrition*, 1991, 14(12): 1307-1318.
- [25] GRÜTER R, MEISTER A, SCHULIN R, TANDY S. Green manure effects on zinc and cadmium accumulation in wheat grains (*Triticum aestivum* L.) on high and low zinc soils. *Plant and Soil*, 2018, 422(1/2): 437-453.
- [26] TARIQ M, HAMEED S, MALIK K A, HAFEEZ F Y. Plant root associated bacteria for zinc mobilization in rice. *Pakistan Journal of Botany*, 2007, 39(1): 245-253.
- [27] 芦小军, 李博文, 杨卓, 贾莹, 李术娜. 微生物对土壤 Cd Pb 和 Zn 生物有效性的影响研究. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1315-1319.
- LU X J, LI B W, YANG Z, JIA Y, LI S N. Effects of microorganisms on the bioavailability of cadmium, lead and zinc in soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1315-1319. (in Chinese)
- [28] 王浩, 马艳明, 李增嘉, 赵春, 宁堂原, 焦念元. 不同土壤类型对优质小麦品质及产量的影响. *新疆农业大学学报*, 2005, 24(3): 17-20.
- WANG H, MA Y M, LI Z J, ZHAO C, NING T Y, JIAO N Y. Effect of different soil types on quality traits and grain yield of the high-quality wheat. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2005, 24(3): 17-20. (in Chinese)
- [29] 居辉, 熊伟, 许吟隆, 林而达. 气候变化对我国小麦产量的影响. *作物学报*, 2005, 31(10): 1340-1343.
- JU H, XIONG W, XU Y L, LIN E D. Impacts of climate change on wheat yield in China. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(10): 1340-1343. (in Chinese)
- [30] 丁婷婷. 土壤各形态锌对 DTPA-Zn 的贡献量及土壤供锌能力的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- DING T T. Contribution of zinc fractions to DTPA-Zn and zinc supply capacity[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [31] 贺建群, 许嘉琳. 土壤中有有效态 Cd, Cu, Zn, Pb 提取剂的选择. *农业环境保护*, 1994, 13(6): 246-251.
- HE J Q, XU J L. Study of the extractants for available Cd, Cu, Zn and Pb in soils. *Agro-Environmental Protection*, 1994, 13(6): 246-251. (in Chinese)
- [32] 贾舟, 陈艳龙, 赵爱青, 刘娟花, 李萌, 王少霞, 刘珂, 田霄鸿. 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. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1595-1602.
- JIA Z, CHEN Y L, ZHAO A Q, LIU J H, LI M, WANG S X, LIU K, TIAN X H. Effects of different application method of ZnSO<sub>4</sub> and EDTA-Zn on wheat grain zinc biofortification and soil zinc availability in the next year. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1595-1602. (in Chinese)
- [33] BERTIN C, YANG X H, WESTON L A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 2003, 256(1): 67-83.
- [34] CHANTIGNY M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*, 2003, 113(3): 357-380.
- [35] ERENOGLU E B, KUTMAN U B, CEYLAN Y, YILDIZ B, CAKMAK I. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root-to-shoot translocation and remobilization of zinc ((65) Zn) in wheat. *New Phytologist*, 2011, 189(2): 438-448
- [36] CAKMAK I, KUTMAN U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 172-180.

(责任编辑 杨鑫浩)