

影响我国主要麦区小麦籽粒硫含量的品种(系)与土壤因素

牟文燕¹, 罗一诺¹, 张学美¹, 张露露¹, 黄宁¹, 郭子康¹,
黄翠¹, 孙利谦¹, 魏蕾¹, 王朝辉^{1,2*}, 田汇^{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 / 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】明确我国主要麦区小麦主栽品种(系)籽粒硫含量差异, 研究地点、年份、品种(系)对小麦籽粒硫含量的影响, 为科学施肥和选育优质稳产小麦品种提供依据。【方法】于旱作区、麦玉区和稻麦区共 47 个地点种植当地主栽品种(系), 测定了小麦生物量、收获指数、产量及其构成、籽粒硫累积量, 并对籽粒硫含量与小麦生物量、收获指数、产量构成、硫累积量、籽粒养分含量、土壤肥力指标间的相互关系进行分析。【结果】旱作区、麦玉区和稻麦区主栽小麦品种(系)籽粒硫含量分别介于 1.73~2.27、1.59~2.01 和 1.42~1.73 g/kg, 平均值分别为 1.98、1.78 和 1.53 g/kg。同一麦区内籽粒硫含量主要受品种(系)、地点和年份影响。旱作区, 品种(系)对籽粒硫含量变异的贡献率最高, 为 13.1%; 麦玉区和稻麦区地点对籽粒硫含量变异的贡献率最高, 平均分别为 34.2% 和 52.0%, 品种(系)对籽粒硫含量变异的贡献率平均分别为 25.4% 和 7.1%。收获指数和籽粒硫吸收量对小麦籽粒硫含量的影响大于产量构成要素、硫收获指数和地上部硫吸收量。旱作区籽粒硫含量与千粒重、地上部硫吸收量显著正相关, 麦玉区与产量显著负相关, 与硫收获指数显著正相关, 稻麦区与千粒重及地上部硫吸收量关系不显著。3 个麦区内, 小麦籽粒硫含量与籽粒氮、磷、镁、铁、锌和锰含量均显著正相关, 与籽粒钾、钙、铜含量仅在个别试验点相关。在旱作区, 小麦籽粒硫含量与土壤有效磷和有效硫含量显著正相关; 在麦玉区, 与土壤有效铁、锰含量显著正相关; 在稻麦区, 与土壤有效铁显著正相关, 而与 pH、有效锌、有效硫含量显著负相关。【结论】影响小麦籽粒硫含量的主要因素是品种, 其次是土壤养分含量。旱作区较高的土壤有效磷和有效硫含量, 麦玉区较高的有效铁、锰含量, 以及稻麦区较高的土壤有效铁含量均有利于提高小麦籽粒硫含量。

关键词: 小麦; 品种(系); 籽粒; 产量; 硫; 土壤

Cultivar (lines) and soil factors affecting wheat grain sulfur concentration in the major wheat-producing regions of China

MU Wen-yan¹, LUO Yi-nuo¹, ZHANG Xue-mei¹, ZHANG Lu-lu¹, HUANG Ning¹, GUO Zi-kang¹,
HUANG Cui¹, SUN Li-qian¹, WEI Lei¹, WANG Zhao-hui^{1,2*}, TIAN 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 of Crop Stress Biology in Arid Areas, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】The grain sulfur concentration (GSC) of wheat cultivars (lines) in China's main production regions and the effects of year-round climate, cultivar and soil nutrient content on GSC were analyzed to understand the primary factors related to grain sulfur content. 【Methods】Local wheat cultivars were planted at 47 sites in dryland wheat regions (DW), wheat-maize regions (WM), and rice-wheat regions (RW). The wheat biomass, harvest index, yield and its composition, sulfur accumulation and distribution were investigated.

收稿日期: 2022-05-20 接受日期: 2022-12-03

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-3); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200400)。

联系方式: 牟文燕 E-mail: 17854270855@163.com

* 通信作者 王朝辉 E-mail: w-zhaohui@263.net; 田汇 E-mail: 1072561974@qq.com

Correlation analysis between grain sulfur concentrations of leading wheat cultivars (lines) and wheat biomass, harvest index, yield and its composition, and soil factors were analyzed. 【Results】 The GSC of the main wheat cultivars in DW, WM, and RW was 1.73–2.27, 1.59–2.01, and 1.42–1.73 g/kg, respectively, with an average of 1.98, 1.78, and 1.53 g/kg. GSC in the same wheat regions was mainly affected by cultivar, site, and year. In dryland regions, cultivar had the highest contribution to GSC variation (13.1%). In contrast, the planting site recorded the highest contribution (34.2% and 52.0%) in wheat-maize and rice-wheat regions, respectively, followed by cultivars with 25.4% and 7.1% contribution rates. The effects of the harvest index and grain S absorption on wheat GSC were greater than yield components, the S harvest index, and aboveground S absorption. In dryland regions, the GSC showed a positive correlation with 1000 grain weight and aboveground S absorption but was negatively related to yield in wheat-maize regions. No significant relationship was recorded between GSC and yield but not the S harvest index. In rice-wheat regions, there was no relationship between GSC and 1000 grain weight and aboveground S absorption. GSC was positively correlated with grain N, P, Mg, Fe, Zn, and Mn concentrations in all three wheat regions but only correlated with K, Ca, and Cu concentration in several sites. In DW, the higher GSC of Yongshou wheat compared with Yangling may be due to the higher available soil phosphorus and sulfur concentrations in the former. GSC was positively correlated with soil Fe and Mn availability in WM; in RW, GSC was positively correlated with available Fe but negatively correlated with pH, available Zn, and available S. 【Conclusions】 The main factor influencing wheat grain S content is cultivar. The soil nutrients have positive effects on grain S content, depending on the region. They are available P and S in the dryland wheat region; available Fe and Mn in the maize and wheat regions; and an available Fe concentration in the rice-wheat region.

Key words: wheat; cultivar (lines); grain; yield; sulphur; soil

西北旱作区、华北麦玉区、南方稻麦区小麦种植面积 1437.8 万 hm^2 , 产量 11935 万 t, 分别占全国小麦种植总面积和总产的 61.5% 和 88.9%^[1]。硫作为第四大营养元素, 作物对其需求量仅次于氮磷钾^[2], 供应充足条件下, 可以提高旗叶净光合速率、蔗糖和叶绿素含量, 增强二磷酸核酮糖、硝酸还原酶以及超氧化物歧化酶等抗衰老酶活性^[3–5]。缺乏条件下, 则会降低小麦籽粒锌、蛋白质和维生素含量, 降低产量和品质^[6]。籽粒硫含量及氮硫比 (N/S) 可以较好的反映面包体积和面团流变学特性^[2], 一般籽粒 N/S 值处于 14~15 时, 有利于小麦二次加工以及高品质的形成^[7–9]。根据国家 GB/T 17892—2013 籽粒氮含量标准, 满足中强筋、强筋小麦的籽粒硫含量需高于 1.5~1.7 g/kg。保证籽粒硫充足, 是小麦高产优质的前提^[2,7]。目前, 国内外小麦籽粒硫含量介于 1.0~2.0 g/kg^[10–13], 小麦籽粒硫含量亟需提升。研究小麦籽粒硫含量的品种差异和主要土壤影响因素, 对通过育种和合理施肥提高小麦产量和品质有重要意义。

硫对小麦产量的影响主要体现在对穗数、穗粒数及千粒重上。阿根廷的试验表明, 增施硫肥使小麦在开花期至成熟期叶面积指数提高 13%、截获辐射提高 7%, 增加了单位面积穗数^[14]。陕西杨凌的试

验表明, 适当的增施硫肥可以促进花后氮、硫吸收和转运, 提高单位面积穗数和穗粒数, 但对千粒重影响较小^[9]。河北保定试验表明, 合理施用硫肥提高了小麦单位面积穗数、穗粒数和千粒重, 改善了叶片和田间群体光合速率, 提高了小麦产量^[15]。我国小麦籽粒硫含量区域差异大, 汾渭平原、黄土高原、春麦区和绿洲灌区籽粒硫含量均值分别为 1.71、1.62、1.55 和 1.62 g/kg^[16], 山东泰安小麦品种籽粒硫含量平均 1.84 g/kg^[17], 山西、陕西和甘肃不同栽培处理措施下籽粒硫含量平均分别为 1.87、1.74 和 1.85 g/kg^[18]; 山西、河北不同小麦品种籽粒硫含量均值分别为 1.94 和 1.93 g/kg^[16]。小麦籽粒硫含量受土壤 pH、通气性、有效硫含量等因素的影响, 也受施氮量的影响。土壤有效硫低于 10~16 mg/kg 时, 小麦可能会出现缺硫症状, 介于 15~50 mg/kg 时, 小麦生长旺盛^[19]。土壤氮水平与作物体内硫浓度与吸收累积密切相关^[20–21]。山东龙口试验表明, 土壤有效硫为 16.7 mg/kg 时, 高产优质的适宜施氮量为 195~204 kg/hm^2 ^[22]。不同地点土壤肥力和施肥差异较大, 研究影响小麦硫含量的土壤因子有利于提高小麦籽粒产量和硫含量。

小麦品种 (系) 本身也影响硫的吸收和在籽粒的

积累, 因而也影响着硫肥的效果。我们收集了我国当前小麦主要栽培品种(系), 在西北旱作区、华北麦玉区和南方稻麦区布置试验, 研究不同土壤条件下小麦籽粒硫含量, 为选育高产、高硫、优质小麦品种(系), 提高小麦籽粒硫含量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

2017—2020 年在旱作区陕西省 2 个地点布置田间试验, 2016—2020 年在麦玉区 7 个省份 21 个试验点和在稻麦区 8 个省份 13 个试验点布置田间试验, 其中, 稻麦区因品种(系)较少, 各试验点选取两个地点种植。旱作区土壤类型为土垫旱耕人为土, 麦玉区主要土壤类型为潮土和砂姜黑土, 稻麦区主要土壤类型为水稻土和黄壤, 各麦区试验地点土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计与样品采集测定

1.2.1 试验设计 旱作区选取 3 年连续种植品种(系) 103 个, 共 618 个样品。每个品种(系)小区面积为 2.0 m², 区组重复 4 次, 人工点播, 生育期内无灌溉, 播期及农药喷洒、除草等措施与当地农户条件一致。麦玉区、稻麦区选取当年供试点均种植的品种(系), 麦玉区品种(系) 122 个, 共 1464 个样品, 稻麦区品种(系) 38 个, 共 542 个样品。麦玉区、稻麦区各试验点每个品种(系)播种面积 ≥ 300 m², 无重复、机械播种或人工撒播, 播期、施肥量、灌溉及农药喷洒、除草等措施均按当地最适条件进行。麦玉区分为黄淮北片和黄淮南片, 稻麦区分为长江上游和长江中下游。同一麦区各试验点种植品种(系)相同, 均采用完全随机区组设计, 为当地主栽、主推品种(系)或筛选的参试新品种(系)。

1.2.2 样品采集 收获期时, 旱作区采用“盲抽法”, 每个小区内随机抽取 30 穗小麦全株用于化学分析, 人工收获测定产量; 麦玉区、稻麦区在每个品种(系)种植区内随机抽取 100 穗小麦地上部植株用于考种和化学分析^[13, 23], 全区机械收获测定产量。

旱作区各试验点每个区组随机选取 5 个样点, 麦玉区与稻作区各试验点内选取 5 个样点, 用土钻钻取 0—20 cm 土层土壤捏碎混匀, 取 500 g 左右装入样品袋。土壤样品于阴凉处风干, 磨碎, 测定土壤理化性状。

1.2.3 样品处理与测定 植物样品自然风干后, 人工脱粒、称取茎叶、颖壳、籽粒生物量, 测定千粒

重和穗粒数; 取 30 g 籽粒、茎叶和颖壳用自来水和蒸馏水分别快速漂洗 3 次, 65℃ 烘干至恒重, 测定含水量。烘干样品用高通量植物样品球磨仪(Retsch MM400, 德国、氧化锆研磨罐)磨成粉状保存。采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解, 连续流动分析仪测定氮、磷, 火焰光度计测定钾含量; 浓 HNO₃-H₂O₂ 微波消解, 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 美国)测定钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌含量。产量、生物量、收获指数以及不同器官的养分含量均以干重为基数表示。

土样分别过 1 和 0.15 mm 尼龙网筛。过 1 mm 筛土样用来测定有效硫、pH、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾含量, 过 0.15 mm 筛土样用来测定全氮、有机质含量。土壤有效硫用硫酸钡比浊法测定^[24]。pH 用全自动 pH 分析计测定, 水土质量比为 2.5 : 1。土壤硝态氮、铵态氮采用 1 mol/L KCl 浸提, 土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提, 然后用连续流动分析仪(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。有机质、全氮用全自动碳氮分析仪(Primacs SNC100-IC-E, 荷兰)测定。

1.3 数据计算与统计分析

1.3.1 籽粒硫含量分级 根据小麦加工品质对籽粒硫含量的要求, 将小麦籽粒硫含量分为低硫、中硫和高硫 3 组, 对应籽粒硫含量分别为 1.2~1.5、1.5~1.8、≥ 1.8 g/kg。

1.3.2 数据标准化 为了明确不同麦区主栽小麦品种(系)硫含量及其与产量形成、硫素吸收分配的关系, 采用标准化后的观测值进行相关分析和主成分分析, 从而去除年际效应影响, 以得到更为准确的规律。

旱作区标准化:

$$y_j = \frac{1}{Y \times S} \sum_{i=1}^N y_i$$

$$y_i = \frac{x_i}{\bar{x}}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i$$

式中: $N=Y \times S$, Y 代表种植年份数量, S 代表种植地点数量, 旱作区为 3 年 2 个地点 ($N=Y \times S=6$); y_j 为每个品种(系)标准化后的观测值; y_i 为当年给定试验地点每个品种(系)标准值; n 为当年给定试验地点品种(系)总数; x_i 为当年给定试验地点每个品种

表 1 各麦区试验点 0—20 cm 土壤基本理化性质及施肥量

Table 1 Basic physical and chemical properties of the top 0—20 cm of soil and fertilizer application rate at experimental sites in the wheat production regions

试验地点 Experimental site	pH	有机质	全氮	NO ₃ ⁻ -N	碱解氮	有效磷	速效钾	有效硫	施肥量 (kg/hm ²)		
		Organic matter	Total N		Available N	Available P	Available K	Available S	Fertilizer input		
		(g/kg)	(g/kg)			(mg/kg)			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
旱作区 Dryland wheat production regions (2017—2020年均值 Average of 2017—2020)											
陕西杨凌 Yangling, Shaanxi	8.3	16.9	0.9	8.5	0.1	4.3	160.6	5.6	180	100	75
陕西永寿 Yongshou, Shaanxi	8.2	16.8	0.8	13.0	0.3	19.3	140.9	11.4	180	100	75
麦玉区 Wheat-maize production regions (2016—2020年均值 Average of 2016—2020)											
安徽亳州 Bozhou, Anhui	7.0	26.0	1.1	22.7	10.0	57.3	192.6	10.8	261	188	163
安徽合肥 Hefei, Anhui	6.7	31.5	1.3	36.1	14.5	42.8	207.7	14.6	222	110	98
河北沧州 Cangzhou, Hebei	8.4	22.3	1.2	12.2	3.0	51.4	324.4	23.5	330	211	74
河北晋州 Jinzhou, Hebei	8.2	20.5	1.0	13.2	2.6	47.0	117.4	13.9	243	109	55
河北邯郸 Handan, Hebei	8.2	21.9	1.2	24.1	4.0	31.1	162.5	11.3	248	118	118
河北深州 Shenzhou, Hebei	8.2	27.6	1.5	14.3	3.9	35.5	225.6	14.3	362	113	45
河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	8.1	19.1	1.1	17.8	5.0	33.8	140.9	92.4	264	145	60
河南洛阳 Luoyang, Henan	7.9	21.9	1.1	17.5	6.2	20.3	190.7	13.4	184	75	75
河南濮阳 Puyang, Henan	8.2	17.1	0.9	15.3	3.7	15.9	107.8	13.1	221	157	119
河南商丘 Shangqiu, Henan	8.2	20.0	1.0	10.6	6.7	32.5	227.1	10.9	216	145	40
河南郑州 Zhengzhou, Henan	8.1	18.5	0.8	18.7	6.2	14.7	182.5	12.6	265	128	46
河南驻马店 Zhumadian, Henan	5.4	23.0	1.1	12.8	12.9	56.7	171.8	17.5	202	110	77
江苏淮安 Huaian, Jiangsu	7.0	30.5	1.6	31.4	31.2	62.4	291.4	34.4	236	91	88
山东滨州 Binzhou, Shandong	8.2	19.3	0.9	33.8	5.8	21.4	121.1	26.5	221	181	58
山东菏泽 Heze, Shandog	8.0	15.5	0.7	17.1	5.2	12.8	142.3	25.7	234	181	75
山东济南 Jinan, Shandong	8.1	21.3	1.0	18.4	6.0	22.0	160.2	12.8	189	108	108
山东泰安 Tai'an, Shandong	7.1	25.2	1.3	29.5	6.5	69.6	233.6	17.8	260	120	64
山东潍坊 Weifang, Shandong	6.7	23.3	1.2	20.4	5.1	80.9	188.9	34.1	407	121	114
山西临汾 Linfen, Shanxi	8.1	32.6	1.4	27.7	4.3	35.1	197.4	14.3	264	142	54
陕西杨凌 Yangling, Shaanxi	8.3	19.5	0.9	15.4	3.5	23.0	238.6	29.9	255	113	73
陕西咸阳 Xianyang, Shaanxi	8.1	22.2	1.1	20.6	6.4	24.7	179.5	11.4	222	110	74
稻麦区 Rice wheat production regions (2016—2020年均值 Average of 2016—2020)											
安徽六安 Luan, Anhui	5.2	31.3	1.5	12.7	10.5	35.7	194.6	29.5	205	93	81
河南信阳 Xinyang, Henan	5.1	18.1	1.0	15.1	17.8	27.3	166.4	18.7	224	85	107
湖北武汉 Wuhan, Hubei	5.3	27.0	1.2	18.1	8.6	30.8	164.7	15.6	150	107	111
湖北襄阳 Xiangyang, Hubei	5.7	29.2	1.4	22.2	23.3	33.5	170.8	24.3	211	94	63
江苏扬州 Yangzhou, Jiangsu	6.0	30.1	1.4	13.7	8.7	29.4	135.0	16.3	216	113	113
江苏南京 Nanjing, Jiangsu	7.2	28.7	1.5	23.4	8.1	29.6	90.1	39.7	223	93	61
江苏扬州 Yangzhou, Jiangsu	6.5	32.9	1.6	32.5	13.9	27.3	169.1	15.0	250	84	80
贵州贵阳 Guiyang, Guizhou	6.7	40.5	2.0	13.5	18.9	21.8	186.0	31.2	127	50	50
四川成都 Chengdu, Sichuan	7.0	47.5	2.5	7.8	8.3	16.6	119.1	67.4	126	66	70
四川绵阳 Mianyang, Sichuan	6.5	25.8	1.3	7.9	8.4	25.9	133.3	32.2	142	83	77
四川内江 Neijiang, Sichuan	7.4	27.4	1.3	18.8	4.7	32.5	222.8	19.0	132	60	72
云南昆明 Kunming, Yunnan	6.6	34.8	1.8	30.1	14.9	25.5	186.6	25.6	180	61	73
重庆永川 Yongchuan, Chongqing	5.8	23.7	1.1	9.9	9.3	14.4	153.0	32.6	186	55	36

(系) 区组间平均值; $\bar{x}$ 为当年给定试验地点所有品种 (系) 平均值。

在麦玉区与稻麦区, 对年际有重复的对照品种 (系) 按上述流程标准化, 对只在一年种植的品种 (系) 直接取 y_i 作为该品种 (系) 标准化后的观测值。

1.3.3 数据计算与统计分析

收获指数 (%) = 产量/生物量 × 100

籽粒硫吸收量 (kg/hm²) = 籽粒硫含量 × 籽粒产量

地上部硫吸收量 (kg/hm²) = 籽粒硫含量 × 籽粒产量 + 茎叶硫含量 × 茎叶生物量 + 颖壳硫含量 × 颖壳生物量

硫收获指数 (%) = 籽粒硫吸收量/地上部硫吸收量 × 100

式中各器官硫含量单位为 g/kg; 产量、生物量单位为 t/hm²。

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理, IBM SPSS Statistics 25.0 进行简单相关、回归及主成分分析, 采用 Origin 2021 作图。文中所用数据均为品种 (系) 均值。

2 结果与分析

2.1 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 的产量及籽粒硫含量

我国不同麦区小麦的产量及籽粒硫含量均因种植区域和品种 (系) 而异 (图 1)。旱作区小麦产量均值为 5.9 t/hm², 籽粒硫含量介于 1.73~2.27 g/kg, 均值为 1.98 g/kg; 麦玉区小麦产量均值为 8.1 t/hm², 籽粒硫含量介于 1.59~2.01 g/kg, 均值为 1.78 g/kg; 稻麦区小麦产量均值为 5.9 t/hm², 籽粒硫含量介于 1.42~1.73 g/kg, 均值为 1.53 g/kg。不同麦区小麦品种 (系) 的产量及籽粒硫含量存在显著差异, 产量高低为旱作区、稻麦区 < 麦玉区, 籽粒硫含量为稻麦区 < 麦玉区 < 旱作区。

2.2 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 籽粒硫含量的年际地点分析

对不同麦区小麦籽粒硫含量进行方差分析 (表 2) 发现, 年份、地点、品种 (系) 对籽粒硫含量的影响大小不同。由于麦玉区及稻麦区不同片区及年份品种 (系) 不同, 进行方差分析时分为黄淮北片、黄淮南片、长江上游区、长江中下游区。旱作区, 年份、地点、品种 (系) 对籽粒硫含量影响显著, 贡献率分别为 2.2%、1.1% 和 13.1%, 其中以品种 (系) 贡献率最大。黄淮北片, 2017—2020 年品种 (系)、地

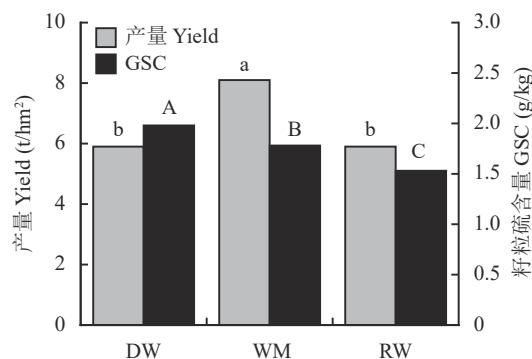


图 1 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 的产量及籽粒硫含量

Fig. 1 Yield and grain sulfur concentration (GSC) for leading wheat cultivars (lines) in main wheat production regions of China

注: DW—旱作区; WM—麦玉区; RW—稻麦区。柱上不同小写字母表示产量平均值间差异达显著水平 ($P < 0.05$), 柱上不同大写字母表示籽粒硫含量平均值间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: DW—Dryland wheat production regions; WM—Wheat-maize production regions; RW—Rice-wheat production regions. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among yield average values ($P < 0.05$), different capital letters above the bars indicate significant difference among grain sulfur concentration average values ($P < 0.05$).

点均对籽粒硫含量有显著影响, 最高贡献率分别为 41.6% 和 31.1%。黄淮南片, 4 年品种 (系)、地点均对籽粒硫含量有显著影响, 最高贡献率分别为 23.0% 和 52.8%。长江中下游, 2016—2017 年品种 (系)、地点, 2017—2018、2019—2020 年地点对籽粒硫含量有显著影响, 品种 (系)、地点的最高贡献率分别为 18.2% 和 65.0%。长江上游, 2017—2018 年品种 (系)、地点, 2018—2019、2019—2020 年地点对籽粒硫含量有显著影响, 品种 (系)、地点的最高贡献率分别为 10.4% 和 72.6%。

2.3 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 的籽粒硫含量与小麦产量形成的关系

小麦品种 (系) 的籽粒硫含量与籽粒产量、生物量、收获指数以及产量构成三要素的关系因麦区而异 (图 2a)。旱作区, 籽粒硫含量与千粒重呈显著正相关, 相关系数为 0.213, 与收获指数呈显著负相关, 相关系数为 -0.302; 麦玉区, 籽粒硫含量与籽粒产量、收获指数显著负相关, 与收获指数的相关系数为 -0.297, 与产量的相关系数为 -0.193; 稻麦区, 均无显著关系; 从全国范围来看, 籽粒硫含量与千粒重呈显著正相关, 相关系数为 0.188, 与收获指数呈显著负相关, 相关系数为 -0.293。旱作区及麦玉区主栽小麦品种 (系) 中, 没有低硫品种 (系); 稻麦区

表 2 我国主要麦区主栽小麦品种(系)籽粒硫含量年际地点变化
Table 2 Yearly variance of grain sulfur concentration of the tested wheat cultivars (lines)
in the main wheat production regions of China

年份 Year	变量来源 Source of variables	黄淮北片 North-Huanghuai		黄淮南片 South-Huanghuai		长江中下游区 Middle and lower of Yangtze River reaches		长江上游区 Upper of Yangtze River reaches	
		F值	贡献率 (%)	F值	贡献率 (%)	F值	贡献率 (%)	F值	贡献率 (%)
		F value	Contribution rate	F value	Contribution rate	F value	Contribution rate	F value	Contribution rate
2016—2017	品种(系) Cultivar (line)	5.34**	30.7	5.67 **	21.1	5.63**	18.2		
	地点 Location	10.13**	23.3	32.41**	52.8	6.46**	46.1		
2017—2018	品种(系) Cultivar (line)	4.98 **	23.6	5.34 **	23.0	0.73	2.2	3.14**	10.4
	地点 Location	11.01**	29.0	17.37**	42.7	3.95 **	65.0	10.20**	56.4
2018—2019	品种(系) Cultivar (line)	4.03**	21.3	4.46**	21.2	0.98	8.3	1.36	3.6
	地点 Location	11.12**	31.1	14.35**	36.1	1.28	16.1	12.18**	72.6
2019—2020	品种(系) Cultivar (line)	10.49 **	41.6	3.93 **	21.0	0.79	3.7	0.69	3.0
	地点 Location	11.41**	22.6	17.69**	36.1	13.83**	53.6	8.81**	54.1
2017—2020年整个旱作区试验数据的方差分析 ANOVA of whole data in dryland wheat production regions									
变量来源 Source of variables		F 值 F value		贡献率 Contribution rate (%)					
年份 Experimental year (Y)		33.29**		2.2					
地点 Location (L)		34.24**		1.1					
品种(系) Cultivar (line) (C)		3.85**		13.1					
年份×地点 Y×L		17.78**		1.2					
年份×品种(系) Y×C		1.22*		8.3					
地点×品种(系) L×C		1.07		3.7					
年份×地点×品种(系) Y×L×C		1.17		8.0					

注：*、**分别表示变量效应在 0.05、0.01 水平显著。
Note: * and ** indicate the effect of variable is significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

主栽小麦品种(系)中,没有高硫品种(系)。按籽粒硫含量水平,将小麦品种(系)的籽粒产量、生物量、收获指数以及产量构成三要素平均值进行方差分析(表 3),发现在各麦区均无显著差异。为了便于实际生产中参考利用,也将数据实际观测值进行了相关分析(图 2b)。分析发现,旱作区,实际观测值的分析结果与标准值的相关分析结果一致;麦玉区,籽粒硫含量与籽粒产量的实际观测值的相关分析结果与标准值的相关分析结果一致;稻麦区,除千粒重外,实际观测值的分析结果与标准值的相关分析结果均与籽粒硫含量无显著相关。全国范围来看,籽粒硫含量与收获指数在实际观测值的相关分析结果中与标准值的相关分析结果中均显著负相关,与千粒重显著正相关。

2.4 我国主要麦区主栽小麦品种(系)的籽粒硫含量与硫素吸收分配的关系

相关分析(图 2a)表明,在旱作区,小麦品种(系)的籽粒硫含量与地上部和籽粒硫吸收量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.373 和 0.496;在麦玉区,籽粒硫含量与籽粒硫吸收量和硫收获指数呈显著正相关,相关系数分别为 0.398 和 0.194;在稻麦区均无显著关系;在全国范围内,籽粒硫含量与地上部硫吸收量和籽粒硫吸收量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.287 和 0.415。按籽粒硫含量水平,对小麦品种(系)的籽粒硫素吸收分配指标进行方差分析(表 3)发现,籽粒硫吸收量和硫收获指数在麦玉区不同硫含量水平品种(系)间差异显著,高硫品种(系)比中硫品种(系)分别高 1.0 kg/hm² 和 1.7 个百分点,

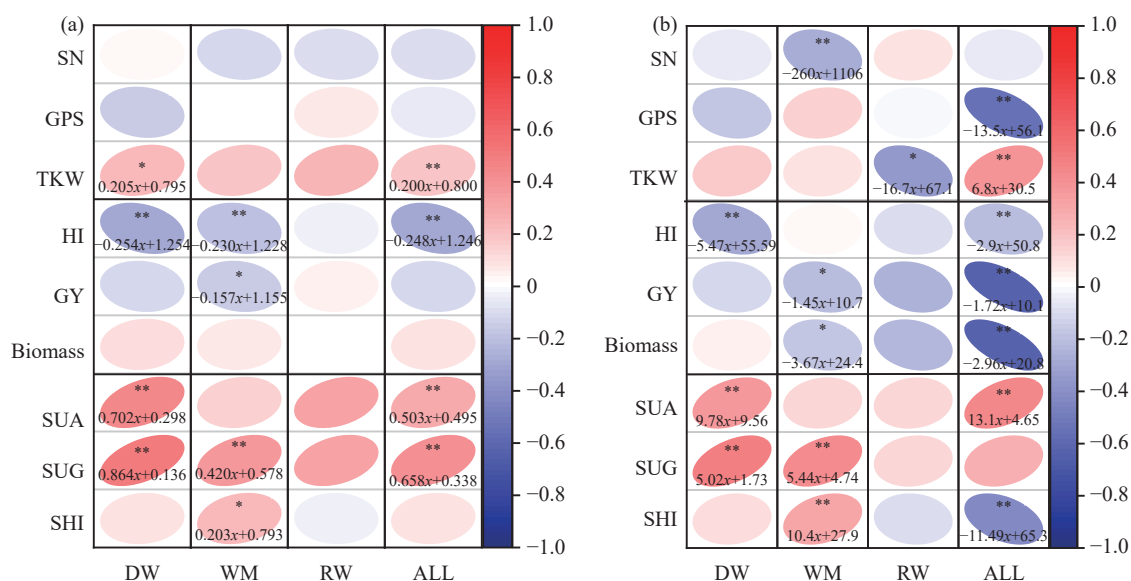


图2 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 籽粒硫含量与干物质累积分配及硫素吸收分配的相关分析

Fig. 2 Correlation analyses of grain sulfur concentration, dry matter accumulation and distribution and sulfur absorption and distribution of leading wheat cultivars (lines) in the main wheat production regions of China

注: DW—旱作区; WM—麦玉区; RW—稻麦区 ALL—总麦区。图 a 中相关分析及线性回归分析使用数据为标准化数据, 图 b 中相关分析及线性回归分析使用数据为原始数据; 红色代表正相关, 蓝色代表负相关, 其中颜色越深、椭圆形越窄代表相关系数越大; 回归方程中 x 表示籽粒硫含量。SN—穗数; GPS—穗粒数; TKW—千粒重; HI—收获指数; GY—籽粒产量; Biomass—生物量; SUA—地上部硫吸收量; SUG—籽粒硫吸收量; SHI—硫收获指数。*、**分别表示在 0.05、0.01 水平相关性显著。

Note: DW—Dryland wheat production regions; WM—Wheat-maize production regions; RW—Rice-wheat production regions; ALL—Whole wheat production regions. The correlation and linear regression analysis used standardized data in figure a and original data in figure b. Red represents positive correlation and blue represents negative correlation, the darker the color and the narrower the ellipse, the greater the correlation coefficient. In the regression equation, x represents the sulfur concentration of grain. SN—Spike number; GPS—Grain per spike; TKW—1000-grain weight; HI—Harvest index; GY—Grain yield; SUA—S uptake in aboveground; SUG—S uptake in grain; SHI—S harvest index. * and ** indicate that the correlation is significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

其他两个麦区均没有显著差异。数据实际观测值的相关分析结果见图 2b。分析发现, 旱作区、麦玉区与稻麦区实际观测值的分析结果与标准值的相关分析结果一致。全国范围来看, 籽粒硫含量与地上部硫吸收量在实际观测值的相关分析结果中与标准值的相关分析结果中一致, 而与籽粒硫收获指数、籽粒硫吸收量不一致, 这可能是因为年际效应与地点效应造成的。

2.5 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 籽粒硫含量与其它营养成分含量的关系

对各麦区小麦品种 (系) 籽粒硫含量与籽粒中其它大、中、微量元素间相关性分析 (图 3a) 表明, 旱作区, 小麦品种 (系) 的籽粒硫含量与籽粒氮、磷、钾、镁、铁、锰、锌含量均呈显著正相关; 麦玉区, 小麦品种 (系) 的籽粒硫含量与籽粒氮、磷、钙、镁、铁、锰、锌含量均呈显著正相关; 稻麦区, 小麦品种 (系) 的籽粒硫含量与籽粒氮、磷、镁、铁、铜、锌含量均呈显著正相关; 全国小麦品种 (系) 的籽粒硫含量与籽粒氮、磷、钾、钙、镁、铁、锰、锌含

量均呈显著正相关。不同籽粒硫含量水平下, 我国主要麦区小麦品种 (系) 籽粒大中微量元素含量的均值见表 4, 方差分析发现, 籽粒氮、磷、硫含量在旱作区、麦玉区高硫品种 (系) 显著高于中硫品种 (系), 稻麦区中硫品种 (系) 显著高于低硫品种 (系), 籽粒铁、锰、锌含量在旱作区和麦玉区高硫品种 (系) 显著高于中硫品种 (系), 籽粒钙含量在麦玉区高硫品种 (系) 显著高于中硫品种 (系)。同样, 为了便于实际生产利用, 数据实际观测值的相关分析结果列于图 3b。分析发现, 旱作区, 氮磷钾、钙、铁锰铜锌实际观测值的分析结果与标准值的相关分析结果一致; 麦玉区, 氮磷钾、钙、铁锰铜锌实际观测值的分析结果与标准值的相关分析结果一致; 稻麦区, 氮磷钾、钙镁实际观测值的分析结果与标准值的相关分析结果一致。全国范围来看, 氮、钙、铁锰实际观测值的相关分析结果与标准值的相关分析结果一致。

2.6 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 籽粒硫含量与土壤养分的关系

对小麦籽粒硫含量和土壤因子的主成分分析

表 3 我国主栽小麦品种(系)不同籽粒硫含量水平下的产量构成、生物量累积及硫素吸收分配

Table 3 Yield components, biomass and sulfur absorption and distribution for leading wheat cultivars (lines) with different grain sulfur concentration levels in China

指标 Index	旱作区 DW			麦玉区 WM			稻麦区 RW		
	低硫	中硫	高硫	低硫	中硫	高硫	低硫	中硫	高硫
	Low S	Medium S	High S	Low S	Medium S	High S	Low S	Medium S	High S
穗数 Spike number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	—	509 a	486 a	—	653 a	627 a	397 a	403 a	—
穗粒数 Grain number per spike	—	28.6 a	29.0 a	—	31.8 a	31.8 a	38.9 a	37.7 a	—
千粒重 1000-grain weight (g)	—	45.8 a	45.3 a	—	41.5 a	41.8 a	42.1 a	41.0 a	—
收获指数 Harvest index (%)	—	45.4 a	45.3 a	—	45.9 a	46.2 a	46.0 a	45.6 a	—
产量 Yield (t/hm^2)	—	6.2 a	5.9 a	—	8.2 a	8.0 a	6.1 a	5.8 a	—
生物量 Biomass (t/hm^2)	—	14.0 a	13.4 a	—	18.1 a	17.5 a	13.4 a	12.8 a	—
地上部硫吸收量 (kg/hm^2) S uptake in aboveground	—	27.2 a	29.5 a	—	31.0 a	31.8 a	18.8 a	18.9 a	—
籽粒硫吸收量 S uptake in grain (kg/hm^2)	—	11.0 a	12.1 a	—	14.0 b	15.0 a	8.9 a	9.1 a	—
硫收获指数 S harvest index (%)	—	40.6 a	40.8 a	—	45.6 b	47.3 a	48.6 a	48.4 a	—

注：“—”表示该籽粒硫含量等级下无对应品种(系)。同行数据后不同小写字母表示同一区域不同硫水平品种(系)各指标平均值间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

Note: DW—Dryland wheat production regions; WM—Wheat-maize production regions; RW—Rice-wheat production regions. “—” indicates that there is no corresponding cultivars (lines). Values followed by different lowercase letters in a row indicate significant difference between average values of each index of different cultivars (lines) with different S levels ($P<0.05$).

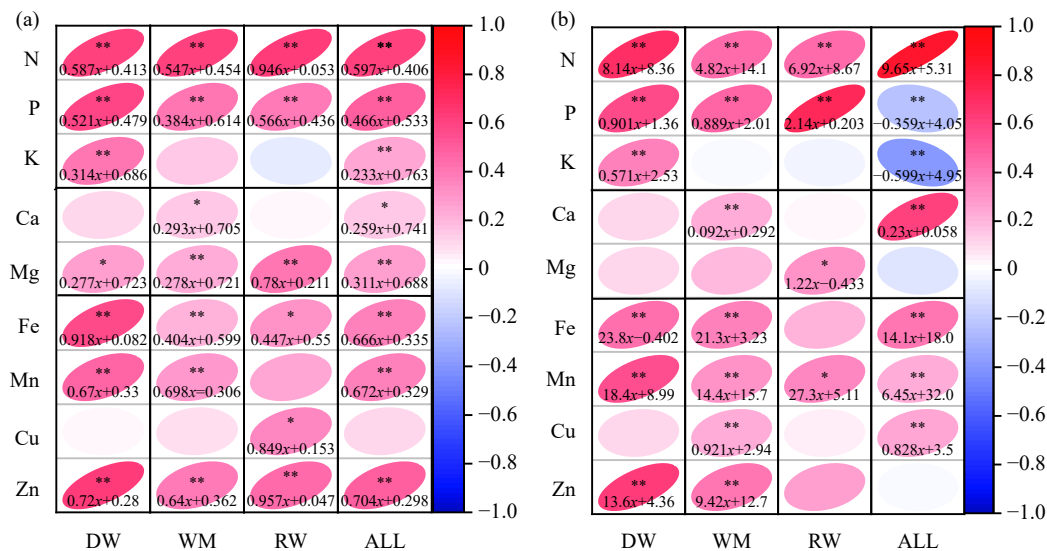


图 3 我国主要麦区主栽小麦品种(系)籽粒硫含量与籽粒矿质元素含量的相关分析

Fig. 3 Correlation between sulfur concentration and mineral element concentrations in grain of leading wheat cultivars (lines) in the main wheat production regions of China

注：DW—旱作区；WM—麦玉区；RW—稻麦区；ALL—总麦区。图 a 中相关分析及线性回归分析使用数据为标准化数据，图 b 中相关分析及线性回归分析使用数据为原始数据；图中红色代表正相关，蓝色代表负相关，其中颜色越深、椭圆形越窄代表相关系数越大；回归方程中 x 表示籽粒硫含量。*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平相关性显著。

Note: DW—Dryland wheat production regions; WM—Wheat-maize production regions; RW—Rice-wheat production regions; ALL—Whole wheat production regions. The correlation and linear regression analysis used standardized data in figure a and original data in figure b. Red represents positive correlation and blue represents negative correlation, the darker the color and the narrower the ellipse, the greater the correlation coefficient. In the regression equation, x represents the sulfur concentration of grain. * and ** indicate that the correlation is significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 4 我国不同麦区主栽小麦品种 (系) 不同籽粒硫含量水平下籽粒矿质元素含量

Table 4 Mineral element contents in grain of leading wheat varieties (lines) in the main wheat production regions of China

元素 Element	旱作区 DW			麦玉区 WM			稻麦区 RW		
	低硫 Low S	中硫 Medium S	高硫 High S	低硫 Low S	中硫 Medium S	高硫 High S	低硫 Low S	中硫 Medium S	高硫 High S
氮 N (g/kg)	—	22.3 b	24.9 a	—	22.3 b	23.2 a	18.6 b	19.7 a	—
磷 P (g/kg)	—	2.9 b	3.2 a	—	3.5 b	3.7 a	3.3 b	3.6 a	—
钾 K (g/kg)	—	3.7 a	3.7 a	—	4.0 a	3.9 a	4.1 a	4.1 a	—
钙 Ca (g/kg)	—	0.48 a	0.54 a	—	0.45 b	0.47 a	0.39 a	0.40 a	—
镁 Mg (g/kg)	—	1.27 a	1.36 a	—	1.52 a	1.62 a	1.32 a	1.49 a	—
硫 S (g/kg)	—	1.77 b	2.02 a	—	1.71 b	1.88 a	1.46 b	1.57 a	—
铁 Fe (mg/kg)	—	41.1 b	47.5 a	—	39.5 b	43.4 a	42.7 a	44.6 a	—
锰 Mn (mg/kg)	—	39.7 b	46.1 a	—	40.3 b	43.0 a	44.9 a	48.1 a	—
铜 Cu (mg/kg)	—	5.45 a	5.65 a	—	4.52 a	4.65 a	5.48 a	5.55 a	—
锌 Zn (mg/kg)	—	27.7 b	31.8 a	—	29.0 b	30.1 a	34.6 a	35.9 a	—

注: “—”表示该籽粒硫含量等级下无对应品种(系)。同行数据后不同小写字母表示同一区域不同硫水平品种 (系)各指标平均值间差异达到 0.05 显著水平 ($P<0.05$)。
Note: DW—Dryland wheat production regions; WM—Wheat-maize production regions; RW—Rice-wheat production regions. “—” indicates that there is no corresponding cultivars (lines). Values followed by different lowercase letters in a row indicate significant differences between average values of each index of different cultivars (lines) with different S levels ($P<0.05$).

(图 4a) 显示, 麦玉区, 主成分 1 与主成分 2 共解释了总变异的 60.1%; 稻麦区, 主成分 1 和主成分 2 共解释了总变异的 56.6%。小麦籽粒硫含量和土壤因子的关系因麦区而异。对小麦籽粒硫含量和硫吸收利用与相关土壤因子的相关分析 (图 4b) 表明, 麦玉区, 小麦籽粒硫含量与土壤有效铁、锰含量显著正相关, 相关系数分别为 0.500 和 0.447; 稻麦区, 小麦籽粒硫含量与 pH 和土壤有效锌、硫含量显著负相关, 相关系数分别为-0.828、-0.581 和-0.570, 与土壤有效铁显著正相关, 相关系数为 0.629。对不同籽粒硫含量水平下 2 个麦区相关关系显著的土壤因子分析 (图 5) 表明, 旱作区, 永寿小麦的籽粒硫含量 (2.01 g/kg) 高于杨凌 (1.93 g/kg), 土壤有效磷和速效钾在两地之间差异显著, 土壤有效磷含量分别为 19.3 mg/kg (永寿) 和 4.3 mg/kg (杨凌), 速效钾含量分别为 140.9 mg/kg (永寿) 和 160.6 mg/kg (杨凌); 麦玉区, 土壤因子在中硫和高硫两组之间无显著差异; 稻麦区, 土壤有效铁和有效锰在低硫和中硫两组之间差异显著, 其中土壤有效铁含量分别为 70.9 mg/kg (低硫组) 和 81.4 mg/kg (中硫组), 有效锰含量分别为 18.9 mg/kg (低硫组) 和 32.8 mg/kg (中硫组)。

分别以籽粒硫含量为因变量, 土壤 pH 及有效硫、铁、锌、锰为自变量进行多元线性回归分析,

得到结果如下:
麦玉区: $GSC=0.69375+0.12906pH+0.00299Fe+0.00542Mn-0.02798Zn+0.00008S$
稻麦区: $GSC=1.69530-0.00605pH-0.00070Fe+0.00087Mn+0.01971Zn-0.00403S$
基于土壤 pH 及有效硫、铁、锌、锰这 5 个土壤指标可以对两个麦区小麦籽粒硫含量进行预测, 麦玉区多元线性回归模型 R^2 为 0.36, 稻麦区多元线性回归模型 R^2 为 0.34。

3 讨论

3.1 小麦品种 (系) 籽粒硫含量与干物质累积、产量构成及硫吸收分配的关系

我国旱作区小麦籽粒硫含量与收获指数显著负相关, 麦玉区小麦籽粒硫含量与收获指数、产量显著负相关, 而在稻麦区小麦籽粒硫含量与产量、生物量以及收获指数无显著相关性。旱作区和麦玉区, 小麦籽粒硫含量从中硫到高硫水平, 产量分别降低了 0.3 和 0.2 t/hm²; 稻麦区, 籽粒硫含量从低硫到中硫水平, 产量降低了 0.3 t/hm², 存在一定的产量稀释效应, 但未达到显著水平。而收获指数作为影响产量变化的主要因素, 与产量显著正相关, 因此, 收获指数与籽粒硫含量的关系与产量一致。本

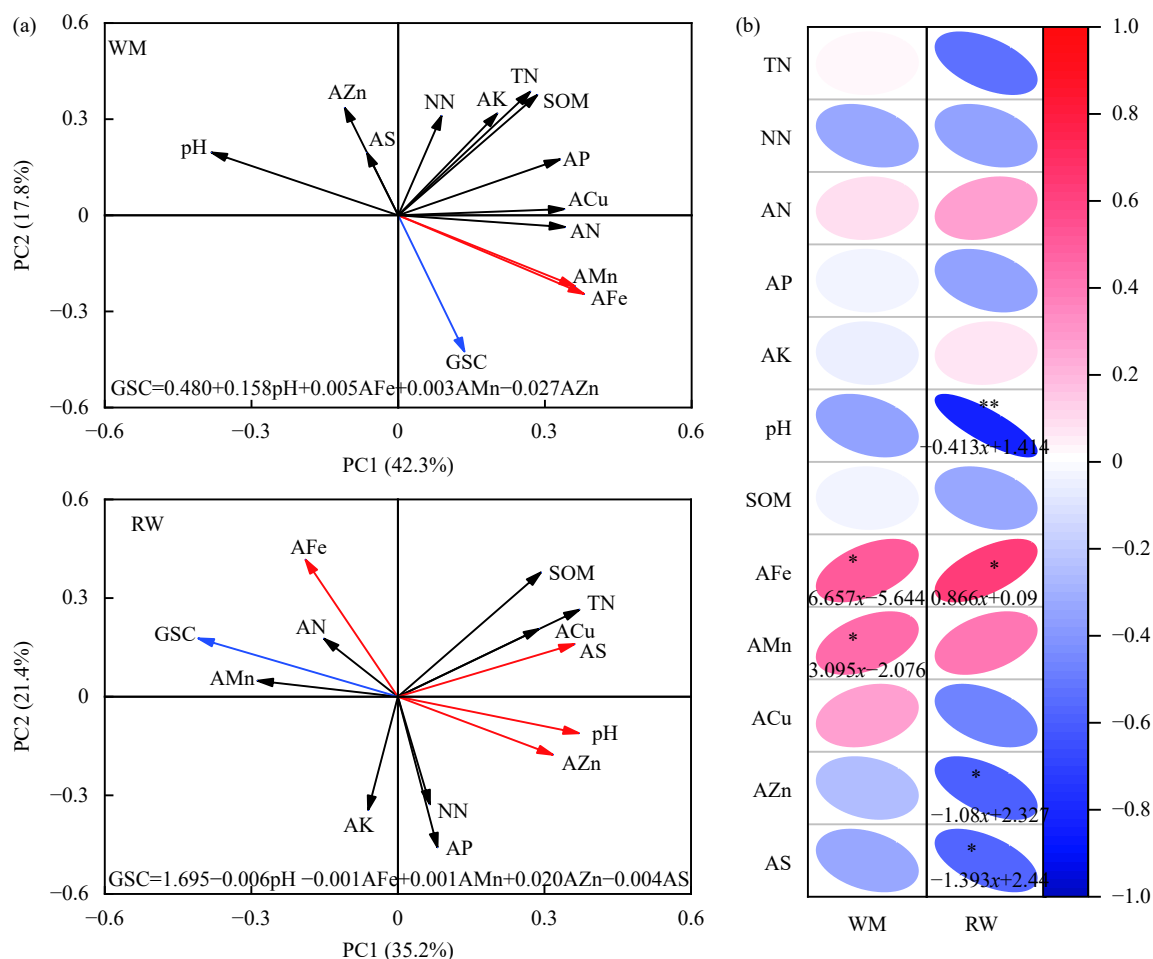


图 4 我国主要麦区主栽小麦品种(系)籽粒硫含量与土壤因子主成分分析(a)及相关分析(b)

Fig. 4 Principal component analysis (a) and correlation analysis (b) between grain sulfur concentrations of leading wheat cultivars (lines) and soil factors in the main wheat-growing areas of China

注: WM—麦玉区; RW—稻麦区; GSC—籽粒硫含量(g/kg); SOM—土壤有机质(g/kg); TN—土壤全氮(g/kg); NN—土壤硝态氮(mg/kg); AN—土壤铵态氮(mg/kg); AP—土壤有效磷(mg/kg); AK—土壤速效钾(mg/kg); AFe、AMn、ACu、AZn、AS—土壤有效铁、锰、铜、锌、硫含量(mg/kg)。*、**分别表示在0.05、0.01水平相关性显著。

Note: WM—Wheat-maize production regions; RW—Rice-wheat production regions; GSC—Grain S concentration; SOM—Soil organic matter; TN—Soil total N; NN—Soil nitrate N; AN—Soil ammonium N; AP—Soil available P; AK—Soil available K; AFe, AMn, ACu, AZn and AS, the concentration of soil available Fe, Mn, Cu, Zn, S. * and ** indicate that the correlation is significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

研究结果说明,相似种植条件下产量对籽粒硫含量的稀释作用并不是绝对的,可以通过选育品种(系)实现籽粒硫含量和产量的同步提高。

旱作区千粒重和籽粒硫含量显著正相关;麦玉区和稻麦区籽粒硫含量与穗数、穗粒数和千粒重无显著相关关系。大田和温室试验表明,硫缺乏会减少小麦小穗和小花的分化,影响灌浆前期籽粒可溶性糖和蔗糖含量,造成穗数和千粒重降低^[25-26]。陕西杨凌施用150 kg/hm²硫肥,籽粒硫含量增加55.6%,千粒重增加0.81 g,增幅达到极显著水平^[9],河南和山东大田试验也表明,施硫增加籽粒硫含量,提高千粒重^[27-28],这与本研究中旱作区千粒重与籽粒硫含量关系一致。但麦玉区和稻麦区籽粒硫含量与穗

数、穗粒数和千粒重无显著相关关系,这可能与研究的品种(系)数量以及土壤有效硫含量不同等有关。山东泰安的研究中,小麦品种仅有2个,且同时施用了45~90 kg/hm²的硫肥,这可能在一定程度上影响了小麦的穗数与穗粒数^[28]。

本研究发现,旱作区,籽粒硫含量与地上部硫吸收量、籽粒硫吸收量极显著正相关;麦玉区,籽粒硫含量与籽粒硫吸收量和硫收获指数显著正相关;稻麦区,籽粒硫含量与地上部硫吸收量、籽粒硫吸收量和硫收获指数无显著相关关系。地上部硫吸收量以及硫再分配能力决定小麦籽粒硫含量,硫收获指数受地上部硫吸收量和籽粒硫吸收量的影响。总体来看,随地上部硫吸收量的增加,硫素向

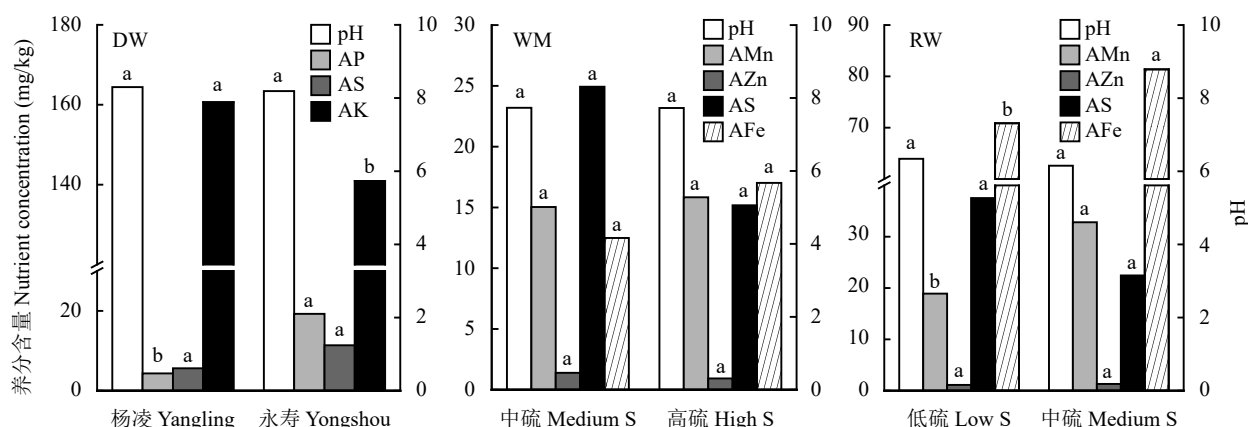


图5 不同小麦品种 (系) 籽粒硫含量水平下的土壤 pH 及养分含量

Fig. 5 Soil pH and nutrient contents under different grain sulfur concentration levels of the tested wheat cultivars (lines) in China

注: AP—土壤有效磷; AK—土壤速效钾; AFe、AMn、AZn、AS—土壤有效铁、锰、锌、硫; DW—旱作区; WM—麦玉区; RW—稻麦区。柱上不同小写字母表示不同籽粒硫含量水平土壤因子间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: AP—Soil available P; AK—Soil available K; AFe, AMn, AZn and AS, the concentration of soil available Fe, Mn, Zn, S; DW—Dryland wheat production regions; WM—Wheat-maize production regions; RW—Rice-wheat production regions; YL—Yangling; YS—Yongshou. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among soil factors under different grain sulfur concentration levels ($P < 0.05$).

籽粒的再分配能力加强, 籽粒硫含量增加, 籽粒硫吸收量随籽粒硫含量的增加而增加。小麦品种 (系) 不同, 硫吸收利用能力也不同, 旱作区、麦玉区和稻麦区内小麦品种 (系) 对籽粒硫含量的贡献率分别为 13.1%、25.4% 和 7.1% (表 2), 贡献达到极显著水平。王凡等^[29]研究发现, 籽粒硫含量高的小麦品种能够更多地吸收利用土壤硫, 不同品种的籽粒硫含量差异最高达 76.9%, 地上部硫吸收总量差异最高达 73.6%。

3.2 小麦品种 (系) 籽粒硫含量和其它养分含量的关系

综合来看, 籽粒硫含量在各麦区均与氮、磷、镁、铁、锌、锰显著正相关, 而与钾、钙、铜仅在个别麦区相关。旱作区和麦玉区, 籽粒硫含量从中硫到高硫水平, 籽粒氮含量分别提高了 11.7% 和 3.9%; 稻麦区, 籽粒硫含量从低硫到中硫水平, 籽粒氮含量提高了 6.0%。大量研究表明, 氮、硫作为小麦体内蛋白质合成的主要元素, 其吸收与同化具有高度协同性^[11, 30-31], 充足的土壤硫含量会导致最大的氮响应, 诱导氮吸收同化有关基因的表达, 提高植株对氮的吸收同化能力, 而较高的氮素供应水平可以提高硫转运蛋白对硫酸根的亲和力, 促进对硫的吸收^[20-21], 施用硫肥可以提高 3.7%~11.4% 的氮肥利用率, 施用氮肥可以提高 12.9%~35.3% 的硫肥利用率^[27]。硫与磷也存在相似的交互效应, 即在一定浓度下, 硫可以促进植株对磷的吸收, 但在土壤硫含

量较低时, 过量施磷导致土壤硫胁迫^[32]。本研究中 3 个麦区籽粒硫含量均与磷含量显著正相关, 旱作区和麦玉区, 籽粒硫含量从中硫到高硫水平, 籽粒磷含量分别提高了 10.1% 和 4.5%; 稻麦区, 籽粒硫含量从低硫到中硫水平, 籽粒磷含量提高了 6.4%。

本研究表明, 籽粒硫含量与镁含量显著正相关, 随籽粒硫含量的增加, 旱作区、麦玉区和稻麦区镁含量分别增加了 7.3%、6.6% 和 13.4%, 即高浓度的硫促进了小麦对镁的吸收能力。这可能是因为在作物体内参与碳水化合物以及蛋白质、脂肪的形成过程^[33]。除此之外, 籽粒硫含量与铁、锰、锌显著正相关, 随籽粒硫含量的增加, 旱作区籽粒铁、锰、锌含量分别增加了 15.7%、16.2% 和 15.0%; 麦玉区分别增加了 9.9%、6.8% 和 3.9%, 均达到极显著水平; 稻麦区分别增加了 4.5%、7.1% 和 3.9%。前人研究表明, 适当的施用硫肥能降低土壤 pH, 促进 Fe、Mn、Zn 的吸收, 提高其在土壤中的有效性, 在重金属超标的土壤中, 硫与重金属形成金属螯合态, 缓解植物重金属的中毒反应^[34-35]。硫作为植物的必需元素, 不仅能提高产量, 还能促进作物对其它养分的调控能力, 维持养分平衡^[6, 33]。

3.3 我国主要麦区主栽小麦品种 (系) 籽粒硫含量和土壤肥力的关系

在旱作区、麦玉区和稻麦区试验地点对小麦籽粒硫含量的贡献率分别为 1.1%、34.2% 和 52.0% (表 2), 贡献率达到极显著水平。不同麦区影响小麦

籽粒硫含量的土壤因子不同。旱作区,永寿籽粒硫含量高于杨凌的原因可能与土壤有效磷和有效硫含量有关。永寿与杨凌相比,土壤有效磷和有效硫含量分别提高了 14.9 和 5.7 mg/kg。低磷水平下,磷硫之间表现为协同效应,磷含量的提高有利于增加土壤中离子的交换位点,提高土壤硫的有效性,从而提高籽粒硫含量^[16]。永寿土壤有效硫含量高出杨凌 102.0%,籽粒硫吸收量比杨凌高出 24.0%,充足的土壤有效硫供应使得永寿籽粒硫含量高于杨凌,与王丽等^[13]研究结果一致。

在麦玉区,小麦籽粒硫含量与土壤有效铁和有效锰含量显著正相关,籽粒硫含量从中硫到高硫水平,土壤有效铁和有效锰含量分别提高了 4.5 和 0.8 mg/kg,这说明土壤中高浓度的有效态铁和锰能促进硫素向籽粒转移。一般认为,籽粒硫含量与土壤有效硫含量密切相关^[2, 19, 36-38],但本研究中,麦玉区小麦籽粒硫含量与土壤有效硫含量无显著相关关系,可能受不同品种(系)对硫的吸收利用能力的影响,同时不同地点土壤碳氮供应状况以及其它理化性质差异造成土壤硫有效性也不同^[39]。山东硫肥试验表明,相同处理下,泰安小麦籽粒硫含量无显著变化,而河北沧州试点小麦籽粒硫含量随土壤有效硫含量增加而增加,受不同地点土壤理化性质影响,籽粒硫含量提高的土壤有效硫临界值不同^[40]。

在稻麦区,小麦籽粒硫含量与土壤有效铁含量显著正相关,与 pH 以及土壤有效锌、有效硫含量显著负相关。籽粒硫含量从低硫到中硫水平,土壤有效铁含量提高了 10.5 mg/kg, pH 降低了 0.19,有效硫含量降低了 15.1 mg/kg。稻麦区土壤 pH 均值为 6.23,土壤有效铁、锰含量均值分别高达 76.1 和 25.9 mg/kg, pH 与有效铁、锰含量负相关,与有效硫含量正相关。淹水的酸性土壤条件下,土壤有效铁、锰含量增加,硫酸盐被还原,并与土壤中高浓度的铁、锰形成难溶性的硫化物^[41]。因此,虽然南方土壤有效硫含量高,但难以被作物吸收利用,且淹水条件下,土壤有机硫矿化速度缓慢^[30],随着籽粒硫含量的增加,土壤有效硫含量下降。土壤有效锌含量与籽粒硫含量的关系主要受 pH 和土壤有效铁和锰含量的影响, pH 与土壤锌吸附正相关,淹水条件下,铁、锰与硫形成硫化物,铁锰氧化态中的锌被释放,土壤有效锌含量增加^[42]。

小麦籽粒硫含量与不同麦区土壤肥力的相关分析结果表明,调控小麦籽粒硫含量应因地制宜。旱作区,稳定土壤 pH,提高土壤有效磷和有效硫含

量;麦玉区,稳定土壤 pH,提高土壤有效铁和有效锰含量;稻麦区,改善土壤酸化条件,提高土壤硫供应能力。

4 结论

品种是影响小麦籽粒硫含量主要且稳定的因素。不同麦区影响小麦籽粒硫含量的土壤养分不同,麦玉区小麦籽粒硫含量与土壤有效铁、锰含量显著正相关,稻麦区与土壤有效铁显著正相关,而与 pH、有效锌、有效硫含量显著负相关,旱作区与土壤有效磷和有效硫含量有正相关关系。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[R]. 北京: 中国统计出版社. 2021.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[R]. Beijing: China Statistic Press, 2021.
- [2] 朱云集, 沈学善, 李国强, 郭天财. 硫吸收同化分配及其对小麦产量和品质影响的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 134-138.
Zhu Y J, Shen X S, Li G Q, Guo T C. Advance in sulphur uptake, assimilation distribution and its effects on yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(6): 134-138.
- [3] Smith I K. Regulation of sulfate assimilation in tobacco cells[J]. *Plant Physiology*, 1980, 66(5): 877-883.
- [4] Saccocmani M, Cacco G, Ferrari G. Efficiency of the first steps of sulfate utilization by maize hybrids in relation to their productivity[J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 53(2): 101-104.
- [5] Mcgrath S P, Zhao F J. Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*)[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1996, 126: 53-62.
- [6] 朱英华, 屠乃美, 关广晟, 王中美. 作物硫营养的研究进展[J]. 作物研究, 2006, 20(5): 522-525.
Zhu Y H, Tu N M, Guan G S, Wang Z M. Research progress of crop sulfur nutrition[J]. *Crop Research*, 2006, 20(5): 522-525.
- [7] 王东, 金士鹏, 孙亮, 张民. 不同小麦品种氮、硫积累特性与子粒品质的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 41-47.
Wang D, Jin S P, Zhang L, Zhang M. Relationship between nitrogen and sulfur accumulation characteristics and grain quality of different wheat varieties[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(1): 41-47.
- [8] Dhillon J, Dhital S, Lynch T, et al. In-season application of nitrogen and sulfur in winter wheat[J]. *Agrosystems Geosciences & Environment*, 2019, 2(1): 1-8.
- [9] 赵玉霞, 李娜, 王文岩, 等. 施用硫肥对陕西关中地区冬小麦氮、硫吸收与转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1321-1328.
Zhao Y X, Li N, Wang W Y, et al. Effects of sulfur application rate on the absorption and translocation of nitrogen and sulfur and grain

- yield of winter wheat in Guanzhong area of Shaanxi[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1321–1328.
- [10] Zhao F, Hawkesford M, McGrath S. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat[J]. *Journal Cereal Science*, 1999, 30: 1–17.
- [11] Zhao F, Salmon S E, Withers P J A, *et al.* Variation in the bread making quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions[J]. *Journal Cereal Science*, 1999, 30(1): 19–31.
- [12] Walter D, Carciochi, Guillermo A, *et al.* Sulfur affects root growth and improves nitrogen recovery and internal efficiency in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40(9): 1231–1242.
- [13] 王丽, 王朝辉, 郭子糠, 等. 黄土高原不同地点小麦籽粒矿质元素的含量差异[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(17): 3527–3540.
- Wang L, Wang Z H, Guo Z K, *et al.* Differences of main nutrient concentration in wheat grain between typical locations of the loess plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(17): 3527–3540.
- [14] Salvagiotti F, Miralles D J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(3): 282–290.
- [15] 马春英, 李雁鸣, 韩金玲. 不同施硫量对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(2): 211–216.
- Ma C Y, Li Y M, Han J L. Effects of different dose of sulfur fertilizer on photosynthetic characteristics and grain yield in winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(2): 211–216.
- [16] 李永华. 北方麦区土壤和小麦籽粒钙镁硫的分布特征[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2021.
- Li Y H. Distribution of calcium, magnesium and sulfur in soil and wheat grain in northern China[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2021.
- [17] 王东, 桑晓光, 周杰, 等. 不同类型冬小麦氮、硫积累分配及利用效率的差异[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(22): 4587–4597.
- Wang D, Sang X G, Zhou J, *et al.* Differences in accumulation and distribution and use efficiency of nitrogen and sulfur in different types of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(22): 4587–4597.
- [18] 罗来超, 王朝辉, 惠晓丽, 等. 覆膜栽培对旱地小麦籽粒产量及硫含量的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(6): 886–896.
- Luo L C, Wang Z H, Hui X L, *et al.* Effects of plastic film mulching on grain yield and sulfur concentration of winter wheat in dryland of loess plateau[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(6): 886–896.
- [19] 王东, 鞠正春, 于振文, 等. 山东省麦田土壤有效硫含量及分布[J]. *山东农业科学*, 2011, (5): 50–54.
- Wang D, Ju Z C, Yu Z W, *et al.* Content and distribution of available sulfur in wheat field soil in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2011, (5): 50–54.
- [20] 吴静, 刘宝存, 孙明德. 冬小麦对硫的吸收及在体内的分布规律[J]. *华北农学报*, 2000, 15(3): 103–108.
- Wu J, Liu B C, Sun M D. Study on the characteristics of sulfur nutrition of winter wheat[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2000, 15(3): 103–108.
- [21] 赵玉霞, 周芳, 李雪芳, 等. 氮硫配施对冬小麦氮硫吸收转运及利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(9): 1020–1028.
- Zhao Y X, Zhou F, Li X F, *et al.* Effects of nitrogen and sulfur interaction on their accumulation, translocation and use efficiency in winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9): 1020–1028.
- [22] 王东, 于振文. 施氮量对强筋小麦品种济麦20氮硫积累与再分配及籽粒品质的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(9): 1439–1445.
- Wang D, Yu Z W. Effects of nitrogen application rate on the accumulation and redistribution of nitrogen and sulphur, and grain quality of wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(9): 1439–1445.
- [23] 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.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] 祝小捷. 氮硫配施对小麦产量和品质的调控及其生理学基础[D]. 河南郑州: 河南农业大学硕士学位论文, 2008.
- Zhu X J. Regulation in nitrogen fertilizer application combined sulphur on yield and quality of wheat and its physiological base[D]. Zhengzhou, Henan: MS Thesis of Henan Agricultural University, 2008.
- [26] Archer M J. A sand culture experiment to compare the effects of sulphur on five wheat cultivars (*T. aestivum* L.)[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1974, 25(3): 369–380.
- [27] 李国强, 朱云集, 郭天财, 等. 硫氮配施对强筋小麦豫麦34籽粒灌浆特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(2): 98–102.
- Li G Q, Zhu Y J, Guo T C, *et al.* Effect of sulfur and nitrogen fertilizer combined application on grain filling characteristics of wheat Yumai 34 with high gluten[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(2): 98–102.
- [28] 王东, 于振文, 樊广华, 潘庆民. 硫素对冬小麦品质和产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2000, (6): 10–12.
- Wang D, Yu Z W, Fan G H, Pan Q M. Effect of sulfur on quality and yield of winter wheat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2000, (6): 10–12.
- [29] 王凡, 朱云集, 郭天财, 等. 不同基因型小麦硫素利用效率研究[J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(6): 999–1004.
- Wang F, Zhu Y J, Guo T C, *et al.* Genotypic variations of sulfate use efficiency in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(6): 999–1004.
- [30] 褚磊, 于君宝, 管博. 土壤有机硫矿化研究进展[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 240–245.
- Chu L, Yu J B, Guan B. Research progress of soil organic sulfur mineralization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 240–245.
- [31] Khan N A, Mobin M, Samiullah. The influence of gibberellic acid and sulfur fertilization rate on growth and S-use efficiency of mustard

- (*Brassica juncea*)[J]. *Plant and Soil*, 2005, 270(1): 269–274.
- [32] 马春英. 硫对小麦光合特性及产量和品质的影响规律研究[D]. 河北保定: 河北农业大学硕士学位论文, 2003.
- Ma C Y. A study on the effects of sulfur on photosynthetic performance and grain yield and quality of wheat[D]. Baoding, Hebei: MS Thesis of Hebei Agricultural University, 2003.
- [33] Б. А. Ягодин, 杨金. 植物营养中的硫、镁和微量元素[J]. 土壤学进展, 1988, (11): 34–39.
- Б. А. Ягодин, Yang J. Sulfur, magnesium and trace elements in plant nutrition[J]. *Progress in Soil Science*, 1988, (11): 34–39.
- [34] 王庆仁, 林葆. 植物硫营养研究的现状与展望[J]. 土壤肥料, 1996, (3): 16–19.
- Wang Q R, Lin B. Present situation and prospect of research on plant sulfur nutrition[J]. *Soil and Fertilizer*, 1996, (3): 16–19.
- [35] Saito K. Sulfur assimilatory metabolism. The long and smelling road[J]. *Plant Physiology*, 2004, 136(1): 2443–2450.
- [36] 张锡洲, 李廷轩. 对四川土壤硫素资源及硫肥施用问题的浅析[J]. *四川农业大学学报*, 2000, 18(2): 183–185.
- Zhang X Z, Li T X. Analysis on soil sulfur resources and sulfur fertilizer application in Sichuan[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2000, 18(2): 183–185.
- [37] 王利, 高祥照, 马文奇, 刘艳华. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(6): 1219–1226.
- Wang L, Gao X Z, Ma W Q, Liu Y H. Sulphur consumption in Chinese agriculture: Situation and outlook[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(6): 1219–1226.
- [38] 廖星. 作物硫素营养的诊断和施肥[J]. *土壤通报*, 1991, 22(6): 274–277.
- Liao X. Diagnosis and fertilization of crop sulfur nutrition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 22(6): 274–277.
- [39] 邓占华, 卢树昌. 华北中部平原麦田土壤供硫水平及施硫肥效果研究[J]. *河北农业科学*, 2010, 14(2): 36–38.
- Deng Z H, Lu S C. Study on sulfur content and sulfur fertilizer application in wheat soil in central north China plain[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2010, 14(2): 36–38.
- [40] 白金顺, 曹卫东, 毕军, 等. 速效硫肥对冬小麦产量、品质和经济效益的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(27): 105–110.
- Bai J S, Cao W D, Bi J, *et al.* Effects of rapid release sulphur fertilizer on grain yield, quality and economic profit for winter wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(27): 105–110.
- [41] 陈克文. 作物的硫素营养与土壤肥力[J]. *土壤通报*, 1982, (5): 43–49.
- Chen K W. Sulfur nutrition of crops and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1982, (5): 43–49.
- [42] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. *云南农业大学学报*, 2005, 20(4): 539–543.
- Du C Y, Zu Y Q, Li Y. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4): 539–543.