



施用钾和腐植酸对相同土壤性质下的 小麦 (*Triticum Aestivum* L. var. Delfii) 产量和养分含量的影响

Mehmet DİNÇsoy¹ Ferit SÖnmez¹ 著

刘晓洁² 尹 微² 罗利艳² 齐鹰博² 田佳美² 江志阳^{3*} 译

1 博卢阿邦特伊泽特贝萨尔大学农业与自然科学学院种子科学与技术系 土耳其博卢 14100

2 辽宁土木启生物科技有限公司 沈阳 110000

3 中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016

摘 要: 于 2014 年至 2015 年进行田间试验。本研究中, 选用 3 种 K 施用量 (0、10 和 20 kg K/da) 的 K₂SO₄ 肥 (50% K₂O) 和 3 种 HA 施用量 (0、20 和 40 kg HA/da) 的商品腐植酸 (85%HA)。HA 施用量的增加对试验区土壤 pH、盐分、有机质、P、Mg、Fe、Mn 含量的影响在 $P<0.01$ 水平上差异显著。研究表明, K 施用量的增加对试验区土壤盐分、Mg、Fe 和 Cu 含量的影响在 $P<0.01$ 水平上差异显著。HA 施用量的增加对小麦生物产量、籽粒产量和收获指数有显著影响 ($P<0.01$), 而 K 对小麦生育期没有任何影响。HA 施用量的增加对籽粒和秸秆养分含量, P、K、Ca、Mg、Fe 和 Zn 均有显著影响 ($P<0.01$)。K 施用量的增加对 P、K、Mg、Fe、Zn 含量有显著影响 ($P<0.01$)。结果表明, 在改善土壤性质、作物产量和养分含量方面, 施用 HA 比施用 K 更有效。

关键词: 腐植酸; 养分; 钾; 小麦; 产量

中图分类号: TQ314.1, S512.1 文章编号: 1671-9212(2024)03-0051-12

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.03.009

Effects of Potassium and Humic Acid Applications on Yield and Nutrient Contents of
Wheat (*Triticum Aestivum* L. var. Delfii) with Same Soil Properties

Mehmet DİNÇsoy¹, Ferit SÖnmez¹ write

Liu Xiaojie², Yin wei², Luo Liyan², Qi Yingbo², Tian Jiamei², Jiang Zhiyang^{3*}, translate

1 Faculty of Agriculture and Nature Science, Seed Science & Technology Department,

Bolu Abant İzzet Baysal University, Turkey, 14100

2 Liaoning Tumuqi Biotechnology Co. Ltd., Shenyang, 110000

3 Institute of Applied Ecology Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016

Abstract: This study was conducted in the farmer field between the years 2014 and 2015. In this study, 3 doses of potassium (K) (0, 10 and 20 kg/da) of K₂SO₄ (50% K₂O) fertilizer and 3 doses of humic acid (HA) (0, 20 and 40 kg/da) (85% HA) were used. Increase in the HA dose reflected significant effects on pH, salt, organic matter, phosphorus, magnesium, iron, and manganese contents of the experiment area at

[基金项目] 中国科学院战略性先导科技专项 (项目编号 XDA28070304)。

[收稿日期] 2023-11-17

[译者简介] 刘晓洁, 女, 1985 年生, 工程师, 主要从事农用微生物发酵与应用, E-mail: liuxiaojie0101@126.com。* 通讯联系人: 江志阳, 男, 高级工程师, E-mail: jiangzhiyang@iae.ac.cn。

$P<0.01$ level. It was determined that increased potassium applications affected the salt, magnesium (Mg), iron (Fe) and copper (Cu) contents at $P<0.01$ level. Increased HA application on plant growth criteria had a significant effect on biological yield, grain yield and harvest index ($P<0.01$). However, K did not reflect any effect on the growth stage of wheat. Increased number of HA applications on grain and straw nutrient content were found to have significant ($P<0.01$) effects on P, K, Ca, Mg, Fe and Zn. Increased potassium applications had an effect on the P, K, Mg, Fe and Zn contents with a significant level ($P<0.01$). It was observed that HA applications were more effective than potassium applications on both general soil properties and yield and nutrient content.

Key words: humic acids; nutrients; potassium; wheat; yield

自古以来, 小麦就在人类营养中扮演着重要角色。如今, 在许多国家被视为主食的小麦满足了人们每日所需热量的一半以上。除了关注小麦的高产量, 还强调了其品质。根据 2014 年世界数据报道, 小麦种植总面积为 221615921 ha, 产量为 728966757 t, 世界平均产量为 328.9 kg/da (1 da=0.1 ha, Anonymous, 2016a, 2016b)。

尽管 K 是影响植物生命周期和产量的 3 种基本元素之一, 但在谷物施肥过程中, K 的重要性不如 N 和 P (Arabi, Mir-Ali 和 Jawhar, 2002)。K 在植物的生长代谢、生理和生化功能中起着重要作用, 从而提高了植物 (作物) 的产量和质量。K 有助于酶活性、光合作用、植物养分和光合作用产物的运输、增加蛋白质覆盖、调节膨压、防止植物水分流失和褪色。此外, 它对植物的根系发育和生长亦有积极影响, 可防止其弯曲, 提高其抗寒性和早熟性, 提高 N 的效率, 有效预防病虫害 (Lauchli 和 PflÜger, 1978; Mengel 和 Kirkby, 1987; Kacar 和 Katkat, 1998; Bansal 等, 2001; Kacar, Katkat 和 ÖztÜrk, 2002; Ashraf 等, 2013; Wang 等, 2013)。

腐植酸类物质由含有不同基团, 如碳水化合物、羧基、酚羟基和甲氧基的各种有机化合物组成。在这种情况下, 这个聚合电解质被认为是一种高分子物质 (Peuravuori, Zbankova 和 Pihlaja, 2006; Karaman 等, 2012)。腐植酸 (HA) 可有效促进植物的根系发育, 在产量的提高, 土壤微生物的繁殖, 田间剩余残茬的快速破碎, 轻质土

壤保水性的增加, 短时间内种子的萌发, 促进 N、P、K、Fe、Zn 等元素的摄入, 改善重黏土的土壤结构, 防止土壤中盐分的积聚, 促进土壤的通气性等方面发挥更大作用 (Piccolo, Pietramellara 和 Mbagwu, 1997; KÜtÜk 等, 2000; Brunetti, Plaza 和 Senesi, 2005; Okur 等, 2007; Fahramand 等, 2014; Manal 等, 2016)。

HA 应用于农业活动的好处之一是与金属离子发生络合反应 (Stevenson, 1994)。然而, 每种微量养分所形成的络合结构并不相同 (Tipping, 1986)。HA 通过与土壤胶体表面的结合从环境中被冲走而减少 (Jardine, McCarthy 和 Weber, 1989; Spark, Wells 和 Johnson, 1997a), 因此使 Cu 和 Zn 等微量元素被诸如岩土和二氧化硅之类的矿物质所保留 (Spark, Wells 和 Johnson, 1997b)。HA 能与 Hg、Cd 和 Pb 等元素形成强键。另一方面, 可以与 Ca、Na、Mg、Zn 等元素形成弱键 (Lado, Hengl 和 Reuter, 2008)。Burlakovs 等 (2013) 报道说, 腐植酸类物质可以有效地减少土壤中 Cu 和 Pb 的有效态含量。

研究表明, HA 单独施用或与矿质养分联合施用对植物干重、植物养分含量和摄入量以及种子萌发均有积极的影响。缺素的植物再次使用也可以改善相应的症状。因此, 许多研究人员报道说, HA 应用于土壤或营养液均产生了正向的结果 (Kausar 和 Azam, 1985; Piccolo, Celano 和 Pietramellara, 1993; Wang, Wang 和 Li, 1995; Adani 等, 1998; Mackowiak, Gross 和 Bugbee,



2001; Khan 等, 2010)。早期研究已证实, 在沙土中施用 HA 可以减少 K 的流失 (Rosolem 等, 2017)。

因此, 本研究的目的是调查单独或同时增加 K 和 HA 用量对小麦产量、产量构成和养分含量的影响。同时, 本研究的另一个目的也是确定它们对试验区土壤一些物理和化学性质的影响。

1 材料和方法

1.1 地点与试验果园

本试验于 2014—2015 年生长季在土耳其 Van Tusba Yesilsu Yabali 的一个村庄, 依据农民种植条件进行田间试验。试验区为 pH 中性的砂质壤土结构, 为无盐区, 有机质含量低 (表 1)。确定了土壤全 N 含量偏低, 有效 P、有效 Zn 含量均低于要求。另一方面, Fe、Mn 和 Cu 的含量以及可提取态的 K、Ca 和 Mg 的含量是足够的。

1.2 处理与试验设计

本试验采用随机区组的析因试验设计, 重复 3 次。试验使用硫酸钾 (K_2SO_4 , 50% K_2O), 处理分别为 K0: 0、K1: 10 和 K2: 20 kg K/da, 商标为 Agrohum 的商品腐植酸 (85% HA), HA 3 个剂量的处理分别为 HA0: 0、HA1: 20 和 HA2: 40 kg HA/da。另外, 所有小区按固定剂量施用 12 kg N/da, 其中, 一半在播种期施用硫酸铵肥 (21% N), 另一半在秸秆期施用硝酸铵肥 (33% N)。在栽培过程中充分施用磷肥, 以磷酸二铵肥 (DAP, 18% N, 46% P_2O_5) 为肥料来源, 用量 8 kg P_2O_5 /da。春季用犁深耕后, 秋季播种前翻耕。试验时, 地块之间的距离为 2 m, 小区之间的距离保持 1 m。在试验中, 行距为 20 cm, 每个小区有 5 行, 尺寸为 1 m × 5 m=5 m²。在小区头部减少 1 m, 从两侧减少一行后, 在 0.6 m × 4 m=2.4 m² 的面积上进行评估。在本研究中, 总共保留了 27 个小区。试验期间进行了 2 次手工播种和除草。

表 1 土壤和腐植酸的理化分析结果
Tab.1 Physical and chemical analysis results of the soil and humic acid

参数	土壤 (0 ~ 20 cm)	腐植酸
质地	砂壤土	—
沙土 (%)	57	—
粉质沙土 (%)	25	—
黏土 (%)	18	—
pH	7.42	3.50
盐度 (dS/m)	0.0047	0.857
石灰 (%)	6.7	—
有机质 (OM, %)	2.10	86.0
全 N (%)	0.102	2.30
Ca (%)	1.11	3.00
P (mg/kg)	3.45	3.4
K (mg/kg)	567	920
Mg (mg/kg)	588	417
Fe (mg/kg)	5.1	4800
Mn (mg/kg)	42.1	180
Zn (mg/kg)	0.65	—
Cu (mg/kg)	0.90	—

1.3 生长参数的测量

在试验中, 以该地区生长的蛋白质含量高的 Kirik 小麦作为试验植物。这种小麦是一种白色的, 有羽状穗, 无刺, 白粒, 可用于制作面包且可以冬季栽培的小麦 (*Triticum aestivum* L. var. Delfi) 品种 (UluÖz, 1953)。种植标准设定为 500 株 /m², 试验是在旱作条件下进行的。2014 年 10 月下半月播种, 在成熟期 (2015 年 7 月) 用镰刀收割。试验结束后去除坏的结果, 每个小区随机抽取 10 株植株测定产量指标 (株高、穗长、穗数), 再对所有小区进行采收, 确定生物产量、籽粒产量和收获指数 (Tugay 和 Abacı, 1989)。

1.4 土壤分析与测定

试验前后, 按照 Jackson (1958) 的指导采集土壤样品, 在实验室适当条件下干燥, 用木锤敲击, 2 mm 筛子过筛, 并在分析过程中保持。根据 Bouyoucous 比重计法 (Bouyoucous 1951) 测定土壤样品的质地。盐分的测定采用 Richards (1954) 法。pH 根据 Jackson (1958) 法测定。石灰采用钙量法测定 (Allison 和 Moodie 1965)。根据改进的 Walkey Black 法 (Walkey 1947) 测定 OM。有效 P 采用 Olsen 碳酸氢盐法和分光光度法 (Shimadzu UV mini 1240) 测定 (Olsen 等, 1954)。可提取态 K、Ca、Mg 用 1 N 醋酸铵提取 (Thomas 1982)。有效态 Fe、Mn、Zn 和 Cu 在 pH 为 7.3 的条件下用 0.05 M 二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 提取 (Kacar 1994)。所得滤液采用原子吸收分光光度法 (Thermo ICE 3000 系列) 测定。

1.5 秸秆和籽粒养分含量的测定

在试验结束时, 从每个小区中采集植物样本带回实验室, 分为秸秆和籽粒。分离的秸秆和籽粒样品在 68 °C 恒温箱中干燥, 直到恒重, 然后用植物研磨机研磨以供分析。根据 Kacar 和 Inal (2008) 的方法焚烧秸秆和籽粒样品, 获得提取物。用分光光度法测定 P (Shimadzu UV mini 1240); 原子吸收分光光度法测定 K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn 和 Cu 元素 (Thermo ICE 3000 系列)。

1.6 统计分析

采用 “Costat” 统计软件包程序对试验数据进

行分析, 并对所有具有显著影响的处理平均值根据 “Duncan 多重范围比较” 检验进行分组 (DüzgÜnes 等, 1987)。

2 结果

2.1 不同处理对土壤性质的影响

对施用 HA 和 K 对土壤 pH、盐分、石灰、OM 和营养元素含量等的影响进行方差分析, 检测指标的平均值见表 2、图 1 和图 2。

在 $P<0.01$ 水平上, 施用 HA 对土壤的 pH、盐度、OM、P、Mg、Fe、Mn 含量均有显著影响。施用 K 对盐分、Mg、Fe、Cu 含量有一定的影响。K × HA 相互作用对土壤盐度、有机质、Mg、Fe 和 Cu 含量的影响在 $P<0.01$ 水平上显著, 对 Zn 含量的影响在 $P<0.05$ 水平上显著 (表 2)。

随着 HA 施用量的增加, 土壤 pH 由 7.51 下降到 7.39, 且具有统计学意义。当考察 K × HA 相互作用对土壤 pH 的影响时, 可以看到, 尽管 K 处理使土壤 pH 略有升高, 但随着 HA 的添加, 土壤 pH 显著降低。K1HA1 处理的 pH 最高为 7.56, K2HA2 处理的 pH 最低为 7.33 (图 1)。

随着 K 和 HA 施用量的增加, 土壤盐度显著增加。K 和 HA 分别最高施用量时, 盐度值最高分别为 775 和 831 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。在 K × HA 相互作用下也观察到类似的情况。K2HA2 处理的盐度值最高, K0HA0 处理的盐度值最低, 分别为 1293 和 449 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (图 1)。

对于土壤 OM 含量而言, 只有施用 HA 有效, 40 kg HA/da 处理时 OM 含量最高。在未经 HA 处理的小区中检出 OM 含量最低, 为 2.02%。在 K × HA 相互作用下, OM 最高值和最低值分别为 3.28% 和 2.02%, 对应的处理为 K0HA2 和 K0HA0 (图 1)。

试验区 Mg、Fe、Cu 含量随着 K 施用量的增加而升高, 但这些元素的变化无统计学意义。K 施用中, 20 kg K/da 处理的 Mg、Fe 和 Cu 的含量最高分别为 735 mg/kg、7.30 mg/kg 和 1.00 mg/kg。施用 HA 后, P、Mg、Fe 和 Mn 元素含量发生了显著变化, 在 40 kg HA/da 处理下, P、Mg、Fe 和 Mn



元素含量最高值分别为 4.87 mg/kg、858 mg/kg、8.22 mg/kg 和 47.11 mg/kg（图 2）。

表 2 施用 K 和 HA 对土壤性质影响的方差分析结果

Tab.2 Variance analysis results of the effects of K and HA applications on properties of soil

参数	变异源分析（SOV）		
	HA	K	K × HA
	自由度（DF）		
	2	2	4
pH	9.59**	3.29ns	1.43ns
盐度	174.71**	93.32**	88.51**
石灰	1.50ns	1.78ns	0.68ns
OM	8.65**	2.30ns	3.37*
P	16.92**	0.65ns	0.06ns
K	1.31ns	1.67ns	2.45ns
Ca	1.63ns	0.15ns	1.28ns
Mg	39.36**	15.08**	8.75**
Fe	101.76**	22.12**	15.58**
Mn	6.80**	0.16ns	2.75ns
Zn	1.22ns	2.08ns	3.70*
Cu	2.06ns	13.27**	26.26**

注：*0.05% 水平差异显著，**0.01% 水平差异显著，ns 无显著性差异，下同。

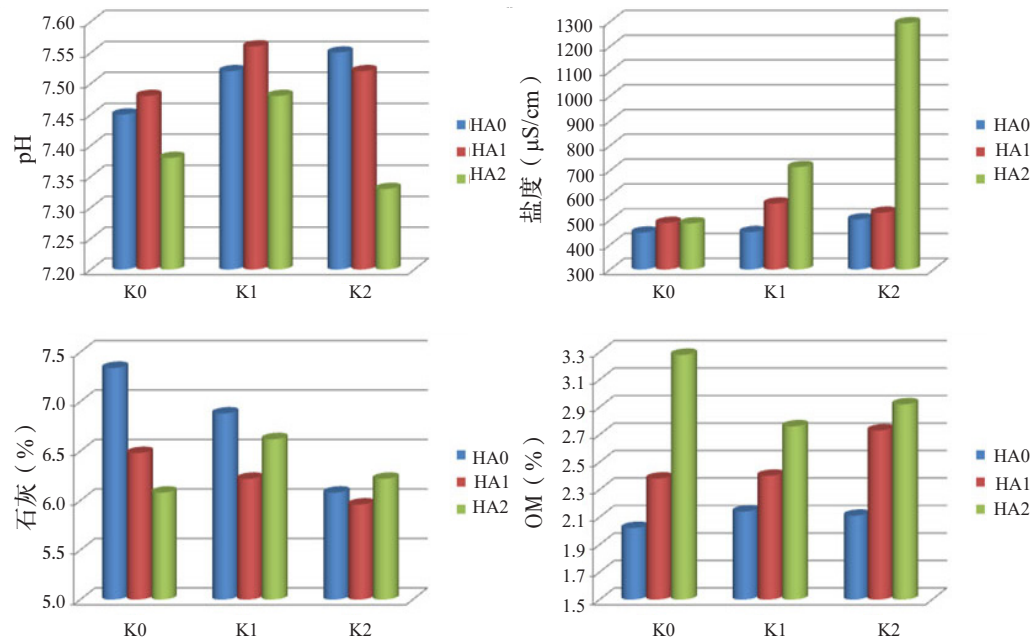


图 1 施用 K 和 HA 对土壤 pH、盐分、石灰和 OM 含量的影响 ($P<0.05$)

Fig.1 Effects of K and HA applications on soil pH, salt, lime and OM contents ($P<0.05$)

注：K0, 0 kg K/da; K1, 10 kg K/da; K2, 20 kg K/da; HA0, 0 kg HA/da; HA1, 20 kg HA/da;

HA2, 40 kg HA/da。下同。

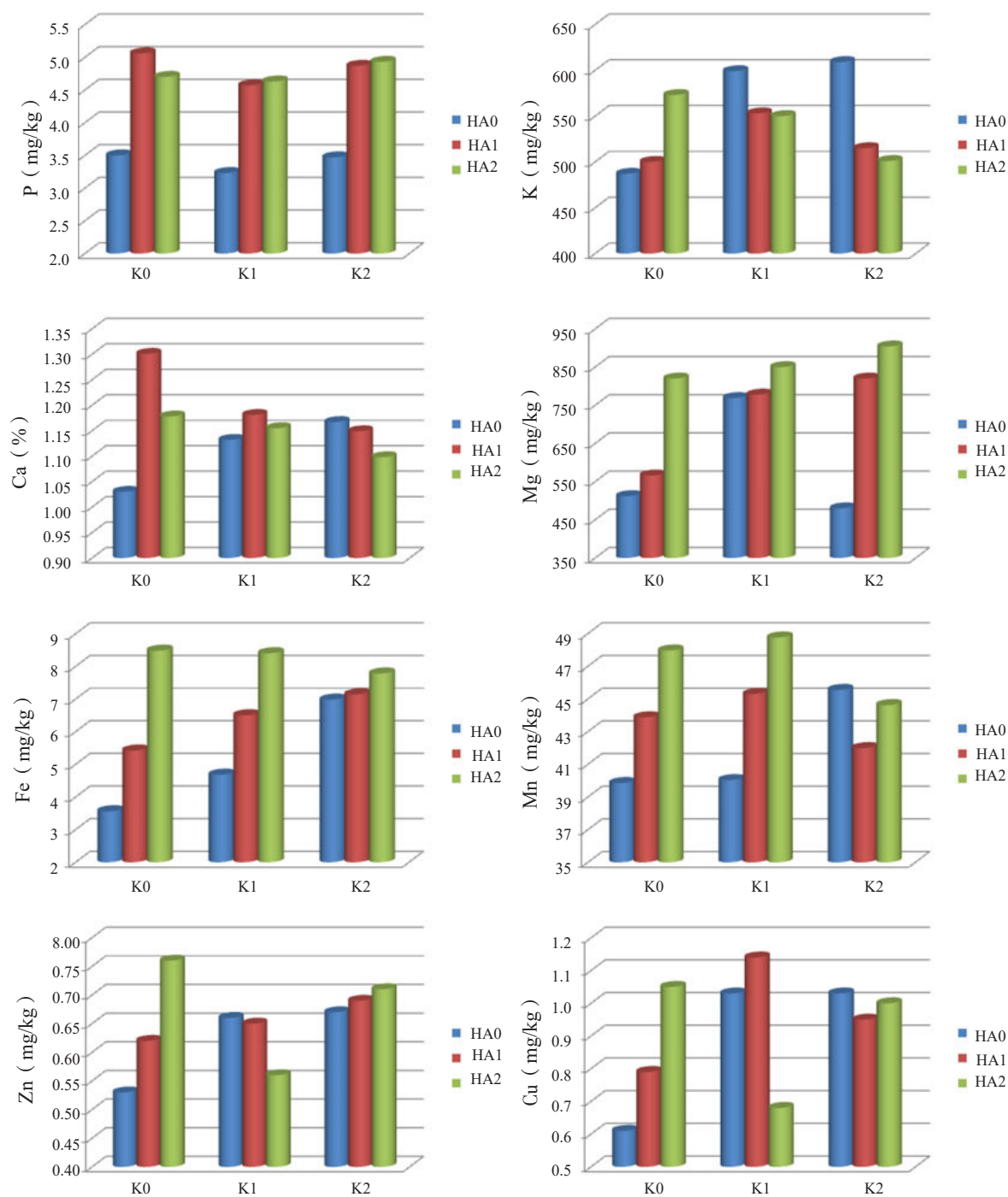


图 2 施用 K 和 HA 对土壤营养元素含量的影响 ($P<0.05$)

Fig.2 Effects of K and HA applications on the contents of soil nutrient elements ($P<0.05$)

结果表明, K × HA 相互作用致使试验土壤中所有分析元素发生显著变化。土壤中 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn 和 Cu 元素含量的最高值分别为 5.06 mg/kg (K0HA1)、609 mg/kg (K2HA0)、

1.301% (K0HA1)、904 mg/kg (K2HA2)、8.48 mg/kg (K0HA2)、48.76 mg/kg (K1HA2)、0.76 mg/kg (K0HA2) 和 1.14 mg/kg (K1HA1) (图 2)。



2. 2 不同处理对小麦产量及产量指标的影响

施用 K 和 HA 对产量和产量指标影响的方差分析结果见表 3，平均值见图 3。

结果表明，施用 HA 仅对产量指标的生物产量和籽粒产量在 $P<0.01$ 水平上有显著影响。仅施用 K 和 $K \times HA$ 相互作用未发现有任何影响（表 3）。

表 3 施用 K 和 HA 对小麦产量指标影响的方差分析结果

Tab.3 Variance analysis results of the effects of K and HA applications on yield criteria of wheat

参数	SOV		
	HA	K	$K \times HA$
	DF		
	2	2	4
株高	1.56ns	0.91ns	0.09ns
穗长	0.16ns	0.70ns	1.05ns
穗数	0.88ns	2.20ns	1.55ns
生物产量	18.99**	2.59ns	2.49ns
籽粒产量	8.32**	1.20ns	0.30ns
收获指数	2.54ns	1.31ns	1.33ns

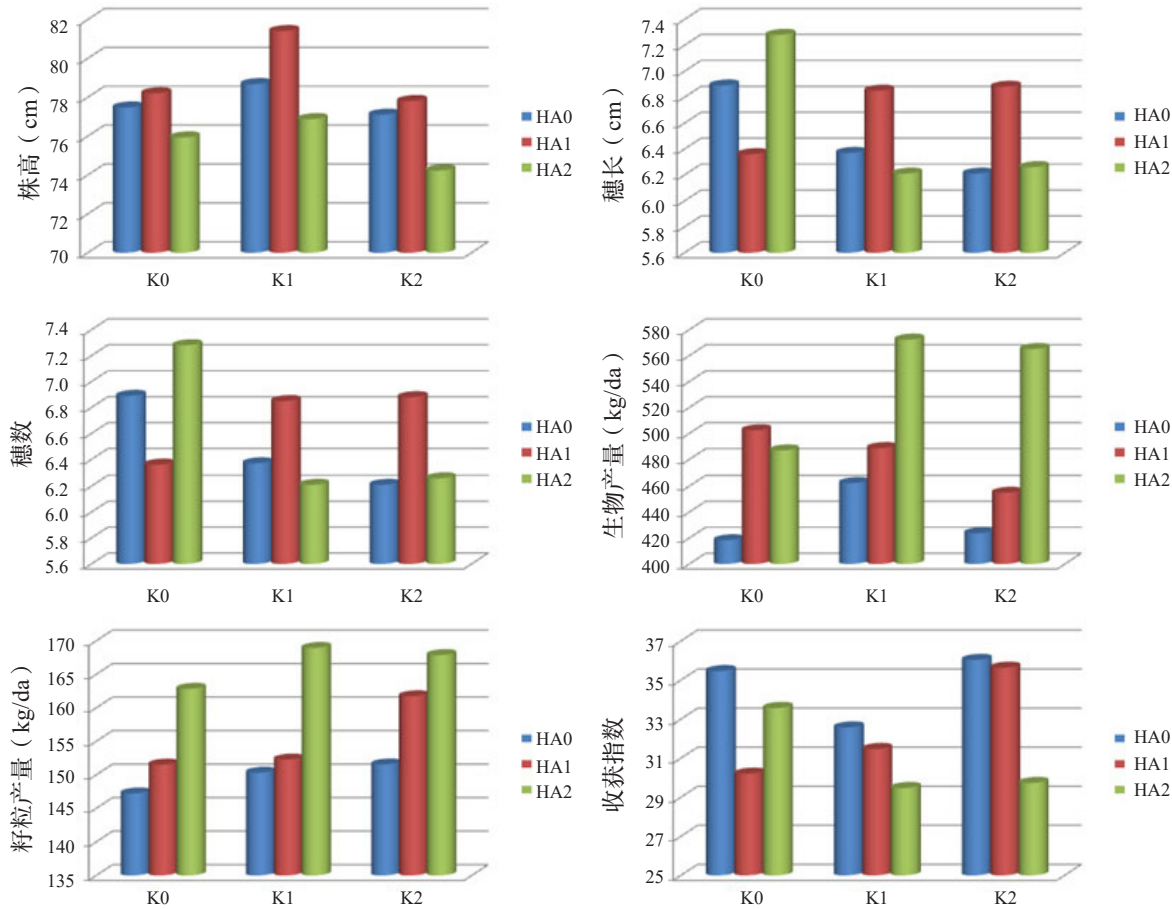


图 3 施用 K 和 HA 对小麦产量和产量指标的影响 ($P<0.05$)

Fig.3 Effects of K and HA applications on yield and yield criteria of wheat ($P<0.05$)

施用 HA 和 K 均显著提高小麦生物产量, 最高产量分别为 541.44 kg/da (40 kg HA/da) 和 507.80 kg/da (10 kg K/da)。在 K × HA 相互作用下, K1HA2 处理的小区生物产量最高, 为 572.33 kg/da (图 3)。

结果表明, 施用 K 和 HA 对籽粒产量有显著影响。20 kg K/da 处理和 40 kg HA/da 处理的籽粒产量达到最高, 分别为 160.38 和 166.55 kg/da (图 3)。

小麦的收获指数受 HA 施用量增加的影响, 这种影响在 Duncan's 检验中被认为是显著的, 尽管它最初被发现在统计上不显著 (表 3)。由图 3 可以看出, 对照小区小麦收获指数最高, 为 34.69, 40 kg HA/da 的处理小麦收获指数最低, 为 30.92。

2.3 对小麦养分含量的影响

HA 和 K 施用量增加对小麦秸秆和籽粒营养元素含量影响的方差分析见表 4, 这些性状的平均值见图 4 和图 5。

施用 HA 对小麦秸秆 P、K、Ca、Fe、Zn 含量的影响为 1%, 对 Mg 含量影响为 5%, 但对 Mn 含量没有影响。小麦籽粒 P 含量在 $P<0.05$ 水平上有显著影响, Ca、Fe、Zn 含量在 $P<0.01$ 水平上受到显著影响。施用 HA 对小麦籽粒 K、Mg、Mn、Cu 含量无显著影响。施用 K 对小麦秸秆 P ($P<0.01$)、K ($P<0.05$)、Mg ($P<0.01$) 和 Zn ($P<0.01$) 含量有影响, 对籽粒 K ($P<0.01$) 和 Fe ($P<0.05$) 含量有影响。在考察 K × HA 相互作用的影响时, 发现在 $P<0.01$ 水平上, 对秸秆和籽粒 P 含量、籽粒 Ca 含量有影响, 其他元素无影响 (表 4)。

表 4 施用 K 和 HA 对小麦秸秆和籽粒养分含量的影响的方差分析结果

Tab.4 Variance analysis results of the effects of K and HA applications on nutrient contents of wheat straw and grain

元素		SOV		
		HA	K	K × HA
		DF		
		2	2	4
P	秸秆	39.86**	80.46**	50.52**
	籽粒	4.79*	0.50ns	4.81**
K	秸秆	11.97**	5.67*	2.38ns
	籽粒	0.19ns	10.07**	1.02ns
Ca	秸秆	9.58**	0.36ns	0.79ns
	籽粒	254.44**	3.52ns	51.16**
Mg	秸秆	5.63*	7.50**	2.21ns
	籽粒	0.52ns	2.01ns	0.74ns
Fe	秸秆	31.27**	1.39ns	2.09ns
	籽粒	16.86**	3.96*	1.58ns
Mn	秸秆	1.55ns	0.64ns	0.26ns
	籽粒	1.18ns	0.89ns	1.23ns
Zn	秸秆	26.98**	19.12**	1.79ns
	籽粒	11.66**	0.69ns	0.12ns
Cu	秸秆	1.35ns	0.17ns	1.21ns
	籽粒	2.65ns	0.39ns	1.14ns



在未经 K 处理的小区, 增加 HA 施用致使秸秆和籽粒 P 含量增加。与对照相比, 秸秆 P 含量在 HA1 处理下由 52.2 增加到 60 mg/kg, 在 HA2 处理下增加到 90 mg/kg。对照的籽粒 P 含量为 2676 mg/kg, 在 HA1 和 HA2 处理下分别增加到

3248 mg/kg 和 2933 mg/kg。对照小区 (K0HA0) 秸秆 P 含量最低, 为 52.5 mg/kg, 在 K 与 HA 相互作用时, K1HA2 处理测定的 P 含量值最高为 195 mg/kg。籽粒 P 含量测定, K1HA1 处理的值最高, 为 3457 mg/kg (图 4)。

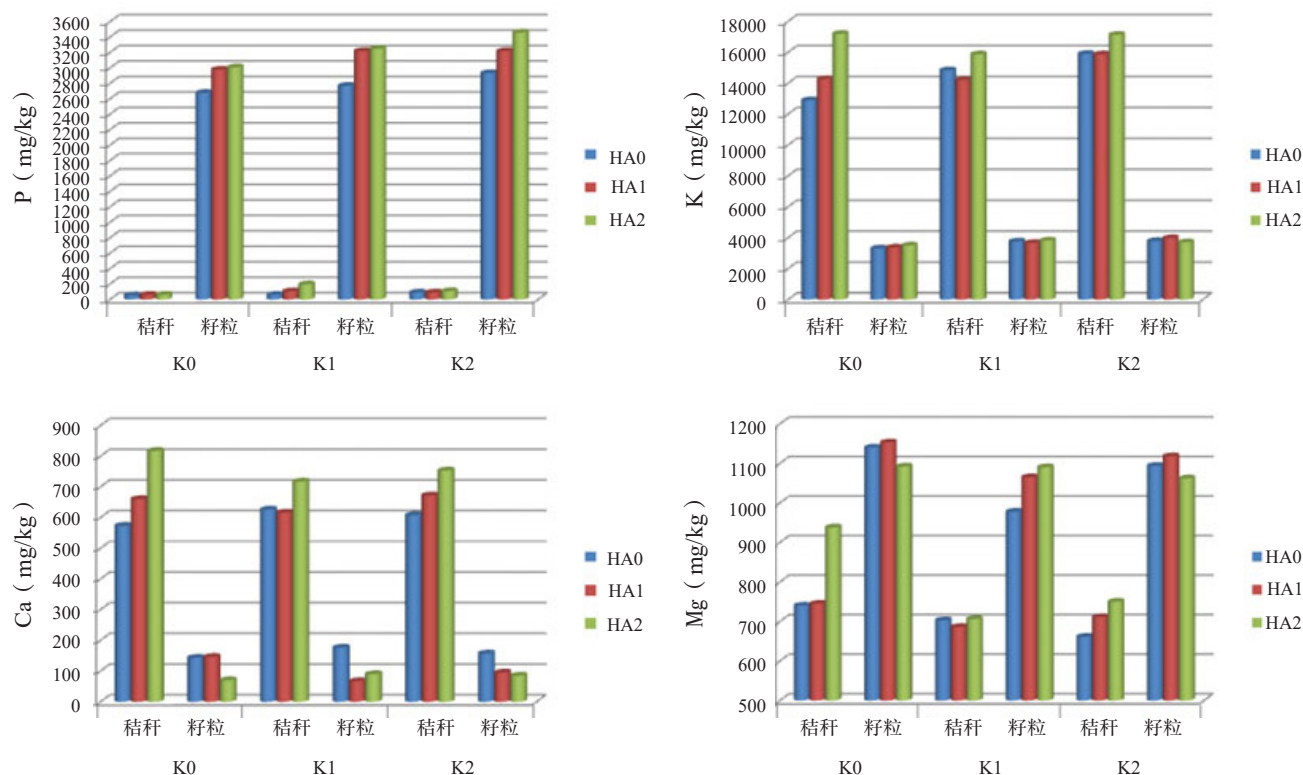


图 4 施用 K 和 HA 对小麦 P、K、Ca 和 Mg 含量的影响 ($P < 0.05$)

Fig.4 Effects of K and HA applications on P, K, Ca and Mg contents of wheat ($P < 0.05$)

在 20 kg K/da 处理时, 小麦秸秆和籽粒 K 的含量最高, 分别为 16300 mg/kg 和 3825 mg/kg。在 40 kg HA/da 处理时, 秸秆的 K 含量最高值为 16732 mg/kg (图 4)。

施用 K 对小麦秸秆和籽粒 Ca 含量没有显著影响, 但 HA 施用量的增加使秸秆和籽粒 Ca 含量发生了显著变化。随 HA 施用量的增加, 秸秆 Ca 含量增加, 而籽粒 Ca 含量下降。40 kg HA/da 处理时秸秆 Ca 含量最高, 为 762 mg/kg, 对照小区为 159 mg/kg。40 kg HA/da 处理后, 籽粒 Ca 含量降至 82 mg/kg。K × HA 相互作用下, 在籽粒 Ca 含量中也观察到类似的情况。K0HA2 处理的小区中籽粒 Ca 含量最低, 为 70 mg/kg, K1HA0

处理的小区中籽粒 Ca 含量最高, 为 176 mg/kg (图 4)。

秸秆 Mg 含量随 K 处理施用量的增加而降低, 随 HA 处理施用量的增加而增加。对照小区 (不施 K) 和 40 kg HA/da 处理小区中 Mg 含量最高, 分别为 808 mg/kg 和 798 mg/kg (图 4)。

随着 K 处理施用量的增加, 与对照相比, 秸秆 Zn 的含量呈现先增加后降低的趋势。施用 HA 提高了秸秆和籽粒 Fe 含量; 同时也增加了籽粒 Zn 含量。在 40 kg HA/da 处理时, 检测到秸秆和籽粒 Fe 的含量最高值分别为 123.6 mg/kg、80.1 mg/kg, 籽粒 Zn 的含量最高值为 31.9 mg/kg (图 5)。

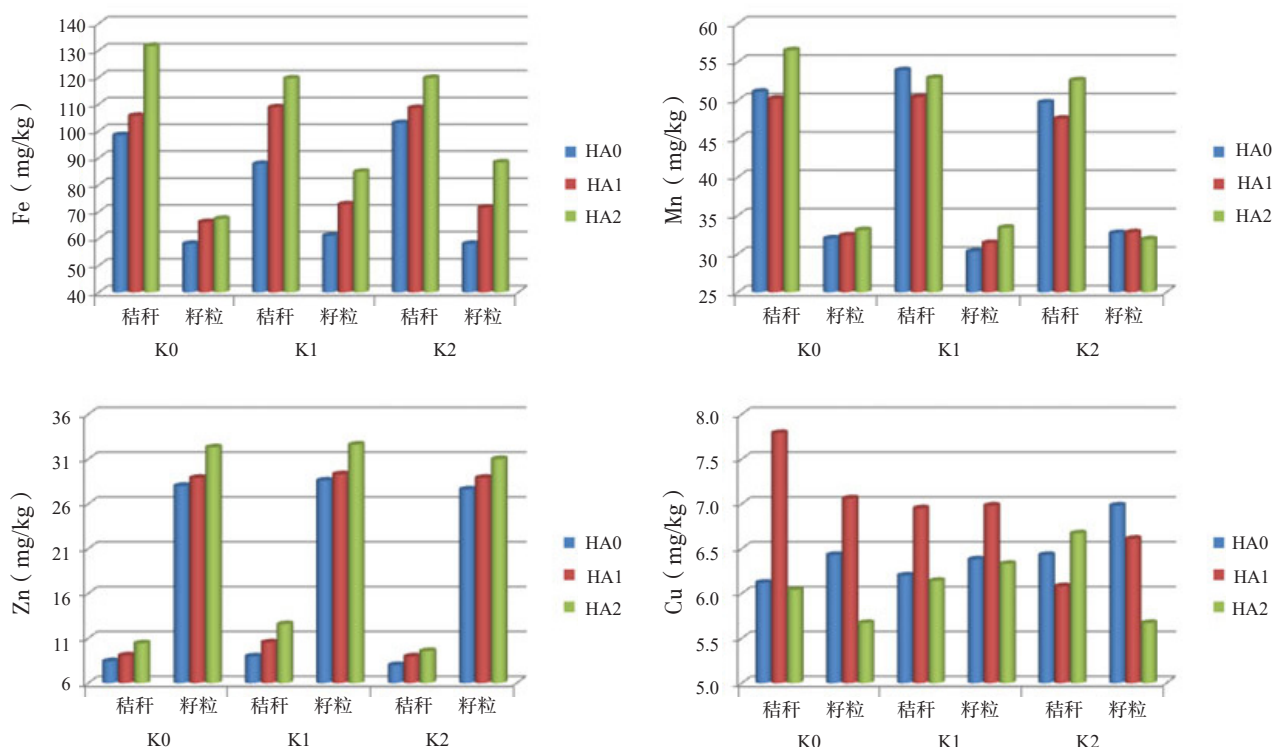


图 5 施用 K 和 HA 对小麦 Fe、Mn、Zn 和 Cu 含量的影响 ($P<0.05$)

Fig.5 Effects of K and HA applications on Fe, Mn, Zn and Cu contents of wheat ($P<0.05$)

3 讨论与结论

施用 HA 导致土壤 pH 值降低, 其中 K1HA2 处理的降低最为显著 (图 1)。这可能是由于施用的 HA 和 K_2SO_4 的肥料共同造成的。实际上, Mohammed (2012) 指出施用 HA 会导致土壤 pH 降低。HA 通过其官能团多样性来影响土壤 pH (Akıncı, 2011)。

K 和 HA 的施用都会导致土壤盐分含量的增加。K1HA2 处理盐分含量最高, 与对照相比增加了 187.9% (图 1)。一些研究人员报道说, HA 施用会影响土壤盐度 (Gezgin, Dursun 和 Gökmen, 2010; Tamer 等, 2016)。这可能与 HA 的高盐度有关 (表 1)。此外, 施用硫酸钾 (盐度 2.07 dS/m) 肥料可能是导致试验区盐分含量增加的原因。事实上, 化肥的盐分指数 (Çolakoglu, 2008) 在土壤盐碱化中不应被忽视。

通过在未施 K 试验小区增加 HA 的施用量, 小区石灰含量由 7.34% 下降至 6.08% (图 1), 石

灰含量下降了 20.7%。这种减少可能与 HA 中含有的羧基和酚基对 Ca^{2+} 离子具有特定的亲和力有关 (Macedo 等, 2002; Zhang 等, 2013)。由于 K 施用量的增加, 石灰含量的下降更加明显。与 K0HA0 处理相比, K2HA1 处理的石灰含量下降最多, 差异达 23.2%。这可能是由于施用 K 中 SO_4^{2-} 导致 pH 降低的原因。此外, HA 分解过程中次生产物的酸度也可能增加了土壤中石灰的分解。

OM 含量随施用 HA 的增加而增加, K0HA2 处理的增加幅度最大。与 K0HA0 处理相比增加了 62.4% (图 1)。HA 可能是土壤 OM 含量增加的原因, 因为它本身含有 86% 的 OM (表 1)。在 Gümüş 和 Seker (2015) 研究报道里说, 增加 HA 施用也增加了土壤 OM 含量。

试验区土壤有效 P 含量随 HA 的施用而增加, K0HA1 处理的增幅最大。与对照相比增加了 44.6%。在同时施用 K 和 HA 的小区, 有效 P 含量也是增加的。在 K1HA0 处理时 P 含量最低, K2HA2 处理时 P 含量最高 (图 2)。当 HA 被施



用于土壤时, 由于其含有 P 的结合位点, 与羧基产生竞争 (Fu 等, 2013; Urrutia 等, 2014; Rosa, Silva 和 Maluf, 2018), 被土壤吸附的 HA 也产生负静电场。这会导致在矿物表面形成物理屏障, 从而降低 P 对土壤胶体的亲和力 (Wang 等, 2016; Yan 等, 2016), 从而增加土壤中有效 P 含量。

可提取态 K、Ca、Mg 含量随 HA 施用量的增加而增加。在 K 的基础上增加 HA 的施用量, 只增加了 Mg 的含量, 降低了 K 和 Ca 的含量。K2HA0、K0HA1 和 K2HA2 处理的 K、Ca 和 Mg 含量最高, 分别为 609 mg/kg、1.301% 和 904 mg/kg (图 1)。这导致随着 HA 添加量的增加, 土壤阳离子与土壤胶体周围腐植酸类物质形成的负静电场的结合更强 (Wang 等, 2016; Yan 等, 2016)。因此, 影响 K 和 Ca 不能被溶液提取, 导致测量值下降。

有效态微量元素含量随 HA 施用量的增加而增加。随着 K 的加入, Fe 含量不断增加, 而 Mn、Zn 和 Cu 的含量呈现出可变状态。虽然在第一个 K 用量下的 Mn 含量随着 HA 的增加而增加, 但据研究发现, 在第二个 K 用量下增加 HA 的施用, Mn 含量有所减少。在第一个 K 用量下, Zn 和 Cu 含量也随 HA 施用量的增加而降低。在第二个 K 用量下, 增加 HA 施用量增加了 Zn 含量, 但 Cu 含量有增加也有减少的情况。随着有机肥的长期施用, 土壤 OM 含量增加, 导致有效 Zn 含量增加 (Fan 等, 2012)。Rutkowska 等 (2014) 研究表明, 长期施用粪肥增加了土壤溶液中 Zn、Fe、Mn 和 Cu 含量。施用 HA 使金属离子成为土壤有效的大量和微量养分 (Bayoumi 和 Selim, 2012; Stevenson, 1994)。

施用 K 和 HA 对植株生物产量和籽粒产量有积极影响, 但对其他产量指标无显著影响。K0HA0 处理的生物产量和籽粒产量最低, K1HA2 处理的生物产量和籽粒产量最高 (图 3), 增幅分别为 36.83% 和 14.74%。Manal 等 (2016) 研究了化肥和 HA 施用对沙质土壤中小麦生长的影响。研究报告说, HA 在 2 L/fed 施用时, 达到最高产量和产量标准。Arif 等 (2017) 研究报道, 增加

K 和 Zn 的施用可以显著提高小麦的产量和产量指标。腐植酸类物质增加植物对土壤养分的利用和摄入。腐植酸类物质还通过诱导植物产生促调节激素吲哚乙酸和抑制 IAA 氧化酶活性来促进植物生长 (Khater 和 Abd El-Azim, 2016)。

施用 HA 和 K 对小麦秸秆和籽粒营养元素 P、K、Ca、Mg 含量总体呈正相关。秸秆中 P、K、Ca 含量在 K0HA0 处理时最低, 分别为 52.2 mg/kg、12898 mg/kg 和 573 mg/kg, K2HA0 处理时 Mg 的含量最低, 为 661 mg/kg。K1HA2 处理的 P 含量最高, 为 195 mg/kg。K0HA2 处理中 K、Ca 和 Mg 元素含量最高, 分别为 17196 mg/kg、817 mg/kg 和 938 mg/kg。秸秆中 P、K、Ca、Mg 含量最低值与最高值的差值分别为 267.8%、33.3%、42.6% 和 41.9%。在 K0HA0、K0HA0、K1HA1 和 K1HA0 处理的籽粒中, P、K、Ca 和 Mg 含量最低, 分别为 2676 mg/kg、3314 mg/kg、67 mg/kg 和 978 mg/kg。在 K0HA2、K2HA1、K1HA0 和 K0HA1 处理中, P、K、Ca 和 Mg 含量最高, 分别为 3457 mg/kg、3974 mg/kg、176 mg/kg 和 1153 mg/kg。P、K、Ca、Mg 的最低值与最高值的差值分别为 29.2%、19.9%、162.7% 和 17.9%。HA 和化肥施用的结果与大量元素摄入相似, 并已在小麦 (Manal 等, 2016; Tahir 等, 2011; Katkat 等, 2009)、玉米 (Çelek 等, 2008)、油菜 (Peng 等, 2007)、水稻 (Saha 等, 2014) 和土豆 (Selladurai 和 Purakayastha, 2016) 均有研究报道。

增加 HA 施用量 (不施 K) 对小麦秸秆 Fe 含量的影响较大。施用 K 和 HA 可使 Fe 含量部分增加。小麦秸秆的 Fe 含量由 K0HA0 对照的 94.8 提高到 K0HA2 处理的 131.6 mg/kg, 提高了 38.9%。Fe 的含量随 K 和 HA 的施用量增加而增加, 从 K0HA0 对照的 58.0 增加到 K2HA2 处理的 88.3 mg/kg, 增加了 52.2% (图 5)。

同时施用 HA 和 K 对秸秆和籽粒的 Zn 含量均无影响, 但只施用 HA 对 Zn 含量有显著影响 (表 4)。秸秆和籽粒的 Zn 含量随 HA 施用量的增加而升高, 随 K 施用量的增加而降低。在 K0HA0 对照中, 秸秆和籽粒 Zn 含量分别为 8.43 和 28.0 mg/kg。

在 K0HA2 处理中, Zn 的含量分别为 10.43 (增加 23.7%) 和 32.2 mg/kg (增加 15.0%)。在 K2HA0 处理中, 它们分别为 8.0 (下降 5.3%) 和 27.6 mg/kg (下降 1.4%)。在 K1HA2 处理中, 秸秆和籽粒 Zn 含量最高, 分别为 12.57 和 32.6 mg/kg。与 K0HA0 对照相比, 分别增长了 49.1% 和 16.4% (图 5)。

施用 HA 和 K 对秸秆和籽粒中 Cu 和 Mn 的含量没有影响（表 4）。然而，在没有 K 的小区上增加 HA 施用量会导致秸秆和籽粒 Mn 的含量增加。在含 K 不含 HA 的小区中，秸秆和籽粒 Mn 含量下降，但这种增加和减少在统计上不显著。不施 K 的小区秸秆和籽粒 Cu 含量随 HA 施用量的增加先升高后降低。尽管在不施用 HA 的小区，随着 K 施用量的增加，秸秆和籽粒 Cu 含量有所增加，但这些增加并不具有统计学意义（图 5）。

由于腐植酸类物质具有疏水性和亲水性表面 (Chen 和 Schnitzer, 1978; Stevenson, 1994), 它们与细胞膜的磷脂结构相互作用, 并作为营养载体 (Selladurai 和 Purakayastha, 2016)。因此, 腐植酸类物质的这一特性与 Fe、Mn、Zn、Cu 等微

量元素和 N、P、S 等大量元素的吸收密切相关 (Pettit 2004; Chen, Magen 和 Clapp, 2001)。施用 HA 促进根系生长, 增加细胞膜通透性, 并提供更多的养分摄入 (Vaughan, 1974; Zientara, 1983)。由于 K 在植物代谢中的重要作用, 许多植物需要大量消耗 K。在对各种植物进行的研究中, 发现过量施用 K 对土壤的 NH_4^+ 、Ca 和 Mg 等大量元素呈拮抗关系。据报道, 过量 K 的施用也对元素 P、Zn、Mn、Cu 和 Fe 的摄入有抑制作用 (Daliparthi, Barker 和 Mondal, 1994; Hasanzadeh, Sepanlou 和 Bahmanyar, 2012)。

同时考虑 HA 和 K 施用对土壤性质、小麦产量和养分含量的影响, 认为它们共同施用会更有益。在这种情况下, 推荐用量为 40 kg HA/da 和 10 kg K/da。

致谢、披露声明和参考文献 (略)

译自: *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42
(20): 2757 ~ 2772。

(上接第 50 页)理化性状,促进和保持土壤团粒结构,有效提高化肥利用率,让土壤养分产生更大的肥效。而腐植酸秸秆发酵液中不仅含有腐植酸、黄腐酸,还含有大量益生菌和微生物代谢产物,具有生物刺激素的效应。腐植酸秸秆发酵液是秸秆资源化高效利用的一类产品,可以作为液体肥料直接用于水稻、玉米、大豆等粮食作物,以及蔬菜、果树、烟草、茶叶等高效经济作物,也可以用作水溶肥料的原料,还可以作为土壤调理剂用于盐碱地生态改良,在农业、林业生产中具有一定的推广应用价值。

参考文献

- [1] 韩国忠. 北海道黄杨育苗与栽植技术[J]. 山西水土保持科技, 2019(1): 46 ~ 48.
- [2] 苏春燕. 北海道黄杨与胶州卫矛嫩枝扦插对比分析[J]. 农业与技术, 2018, 38(3): 57 ~ 59.
- [3] 刘书环, 师春平. 北海道黄杨在造林绿化中的应用及

管理[J]. 河南农业, 2014(5): 25.

- [4] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 334 ~ 343.
- [5] 程冬冬, 唐亚福, 刘艳, 等. 活化腐植酸肥料对苹果幼树的生长和养分利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 83 ~ 90.
- [6] 廖映粉. 腐植酸磷铵对甜橙树体营养与土壤肥力效应的研究[J]. 西南师范学院学报(自然科学版), 1979(1): 123 ~ 131.
- [7] 李璐. 腐植酸复合肥在桉树栽培中的应用[J]. 现代园艺, 2013(12): 52.
- [8] 张开悦. 桉树腐植酸(HA)专用肥施用试验研究[J]. 现代农业科技, 2011(13): 275 ~ 277.
- [9] 王兵, 赵会纳, 余婧, 等. 植物侧枝发育的调控研究进展[J]. 生物技术通报, 2023, 39(5): 14 ~ 22.
- [10] 陈玉玲, 曹敏. 腐植酸对植物生长的促进作用及影响因素[J]. 腐植酸, 1999(2): 40 ~ 41.