



褐煤腐植酸对不同土壤中小麦生长的影响

M. M. Tahir^{1, 2}, M. Khurshid¹, M. Z. Khan² 等著 张磊³ 译

1 巴基斯坦阿扎德查谟和克什米尔大学土壤与环境科学系 克什米尔 11161

2 巴基斯坦国家农业研究中心土地资源研究所 伊斯兰堡 44000

3 安徽农业大学资源与环境学院 合肥 230036

摘要: 腐植酸 (HA) 是有机物分解形成的一种相当稳定的产物, 因此会在生态系统中持续积累, 通过整合不可用养分和缓冲 pH 促进植物生长。本研究探讨了褐煤腐植酸对温室条件下盆栽小麦生长及大量元素吸收的影响。供试土壤分别采自巴基斯坦旁遮普省 Raisalpur 地区的石灰性土和 Guliana 地区的非石灰性土。试验设 4 个 HA 处理, 施用水平分别为 0 (不含 HA 的对照)、30、60 和 90 mg/kg 土, 分别记为 HA0、HA1、HA2 和 HA3; HA0 处理中, N、P 和 K 施用量分别为 200、100 和 125 mg/kg 土。结果显示, 不同 HA 处理对小麦株高、地上部鲜重及 N 素吸收的影响均存在显著差异。与 HA0 相比, HA2 处理的小麦株高、地上部鲜重和干重的平均增幅最大, 分别为 10%、25% 和 18%。HA 的施用对两种土壤均产生积极效应, 其中非石灰性土壤中小麦生长指标和 N 素吸收量均高于石灰性土壤。施用 HA 显著提高了非石灰性土壤的 K 含量和石灰性土壤的 P、NO₃⁻-N 含量。值得注意的是, 最高腐植酸用量 (90 mg/kg 土) 对小麦生长、养分吸收和土壤养分积累均产生抑制作用, 而中等用量 (60 mg/kg 土) 对小麦生长的促进作用更强。

关键词: 石灰性土壤; NO₃⁻-N; 养分吸收量; 株高; 土壤养分

中图分类号: TQ314.1, S512.1 **文章编号:** 1671-9212(2025)02-0061-07

文献标识码: A **DOI:** 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2025.02.010

Lignite-Derived Humic Acid Effect on Growth of Wheat Plants in Different Soils

M. M. Tanir^{1, 2}, M. Khurshid¹, M. Z. Khan², et al write Zhang Lei³ translate

1 Department of Soil and Environmental Sciences, University of Azad Jammu and Kashmir, Kashmir, 11161

2 Land Resource Research Programme, National Agriculture Research Centre, Islamabad, 44000

3 College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, 230036

Abstract: Humic acid (HA), a fairly stable product of decomposed organic matter that consequently accumulates in ecological systems, enhances plant growth by chelating unavailable nutrients and buffering pH. We examined the effect of HA derived from lignite on growth and macronutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in earthen pots under greenhouse conditions. The soils used in the pot experiment were a calcareous Haplustalf and a non-calcareous Haplustalf collected from Raisalpur and Guliana, respectively, in Punjab Province, Pakistan. The experiment consisted of four treatments with HA levels of 0 (control without HA), 30, 60 and 90 mg/kg soil designated as HA0, HA1, HA2 and HA3, respectively. In the treatment without HA (HA0), nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) were applied at 200, 100 and 125 mg/kg soil, respectively. Significant differences among HA levels were recorded for wheat growth (plant height and shoot weight) and N uptake. On an average of both soils, the largest

[收稿日期] 2024-11-29

[译者简介] 张磊, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事新型肥料创制与应用, E-mail: zl181208@163.com。

increases in plant height and shoot fresh and dry weights were found with HA2 (60 mg/kg soil), being 10%, 25% and 18%, respectively, as compared to the control without HA (HA0). Both soils responded positively towards HA application. The wheat growth and N uptake in the non-calcareous soil were higher than those of the calcareous soil. The HA application significantly improved K concentration of the non-calcareous soil and P and NO_3^- -N of the calcareous soil. The highest rate of HA (90 mg/kg soil) had a negative effect on growth and nutrient uptake of wheat as well as nutrient accumulation in soil, whereas the medium dose of HA (60 mg/kg soil) was more efficient in promoting wheat growth.

Key words: calcareous soil; NO_3^- -N; nutrient uptake; plant height; soil nutrient

石灰性土壤是限制全球 6 亿公顷可耕地土壤养分有效性和农业生产的最关键因素之一。土壤的物理性质（如水分关系）和化学性质（如肥力和养分有效性）对植物生长有重要影响，而这些性质都因土壤的石灰性而发生显著变化。过量碳酸钙会通过影响土壤 pH 降低养分有效性，这类型土壤中容易发生氨挥发和磷的溶解度降低现象。

由于温暖地区的石灰性土壤温度较高，天然有机质含量较低。腐殖质（腐植酸和黄腐酸）是土壤有机质的重要组成部分，它们统称为腐殖质，被广泛用作土壤有机质的同义词。腐殖质广泛存在于土壤中，并直接或间接地影响植物生长。其间接作用体现在改善土壤性质，如团聚性、通气性、渗透性、持水能力、激素活性、微生物生长、有机质矿化以及微量元素（如 Fe、Zn、Mn 等）及一些大量元素（如 K、Ca、P 等）的溶解性和有效性；直接作用则体现在影响腐殖质在植物组织中吸收及转运的相关过程。

腐殖质能提高多种作物的产量和品质。施用有机物料的作物产量与施用 NPK 化肥的产量相当。例如，在盆栽玉米试验中，50 ~ 300 mg/kg 腐植酸显著增加了根系和地上部生物量，其中 50 ~ 100 mg/kg 的施用量对玉米植株生长的促进效果最佳。腐殖质通过改善土壤的物理、化学和生物条件来提高土壤肥力，它们通过与金属阳离子形成络合物或螯合物来影响许多营养元素的溶解度。因此，施用腐殖质常被作为提高作物产量的一种有效方法。

褐煤是腐植酸的重要前体物质。由于分解速率

较低，褐煤中的碳可能会残留在土壤中，并对土壤有机质的数量和组成产生影响。像巴基斯坦这样的国家，土壤有机质含量较低（0.3 ~ 1.0 g/kg），开发利用褐煤等自然资源将是实现种植系统经济可持续性的重要一步。巴基斯坦褐煤资源丰富，其中含有大量可提取的腐植酸，可作为有机肥有效促进农业生产。腐植酸在农业上可作为肥料、植物生长促进剂、养分载体、土壤改良剂等。因此，本研究评估了褐煤腐植酸对巴基斯坦主要小麦种植区石灰性和非石灰性土壤中小麦生长、矿质养分吸收以及土壤养分状况的影响。

1 材料与方法

1.1 腐植酸的提取与分析

以巴基斯坦信德省塔尔地区煤矿褐煤为原料，经研磨后过 60 目筛，然后以特定间隔小剂量添加氧化剂（100 mL/L 硝酸）处理，以防止在实验室中因外部冷却的放热氧化而使温度升至 40 °C 以上。随后，用 0.5 mol/L NaOH 对煤残渣进行碱处理。将由此形成的腐植酸水溶性盐溶解在溶液中，用 Whatman 42 号滤纸进行真空抽滤，以分离不溶性有机残渣。滤液通过水浴蒸发至干燥，储存于实验室备用。

1.2 土壤采样

试验所用土壤取自巴基斯坦旁遮普省 Raisalpur 和 Guliana 地区选定的 4 个不同地块，其中 2 块石灰性土壤代表 Raisalpur 地区土壤，另外 2 块非石灰性土壤代表 Guliana 地区土壤。过去的几年，这



些地块主要用于种植雨养玉米和小麦。从每个地块随机选取 20 个不同位置，采集表层 0 ~ 15 cm 土样，混合制成具有代表性的混合土样，自然风

干后过 4 mm 筛。

采用标准方法分析两种供试土壤的基础理化性质（表 1）。

表 1 试验所用两种土壤的基本性质
Tab.1 Basic properties of the two soils used in the experiment

性质	石灰性土壤	非石灰性土壤
pH (1 : 1)	7.5	7.4
电导率 (dS/m)	0.50	0.68
HCO ₃ (g/kg)	50	50
Cl (cmol/kg)	3	3
可交换性 Ca+Mg (cmol/kg)	4.5	6.1
CaCO ₃ (g/kg)	152	56
NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	0.08	0.07
P (mg/kg)	6.48	2.2
K (mg/kg)	88	144
Na (mg/kg)	36	42

1.3 盆栽试验

2009 年 1 月第 3 周，在巴基斯坦伊斯兰堡国家农业研究中心 (NARC) 自然资源与环境科学研究所 (INRES) 土地资源研究项目 (LRRP) 的温室内进行盆栽试验。使用经彻底清洗的陶土盆 (宽 15 cm、高 20 cm)。盆栽分为两组：石灰性土壤 12 盆，非石灰性土壤 12 盆。设置 4 个腐植酸用量水平：0 (不含 HA 的对照, HA0)、30 mg/kg 土 (HA1)、60 mg/kg 土 (HA2)、90 mg/kg 土 (HA3)，每个处理 3 次重复。在 HA0 处理中，土壤中氮 (N)、磷 (P) 和钾 (K) 的施用量分别为 200、100 和 125 mg/kg。根据处理对盆栽花盆进行标记，并采用两因素 (腐植酸水平与土壤类型) 完全随机设计 (CRD) 进行排列。每盆装约 300 g 风干、过 4 mm 筛的土壤。在播种前，将腐植酸溶于蒸馏水中，使用背负式喷雾器进行叶面喷施。供试小麦品种为“Wafaq”。在整个试验过程中，土壤保持 60% 的持水量，在浇水前每隔一天从根区采集一份破坏性土壤样品，测定土壤水分含量，并根据水分损失百分比补充相应水分。

每盆播种 6 粒健康且大小均匀的小麦种子，

播种深度为 2 cm。盆栽在种子萌发过程中保持遮荫，以减少蒸发蒸腾。待种子完全出苗后，进行间苗处理，每盆保留 3 株幼苗。萌发 30 天后进行植株收获，测定株高、地上部鲜重 (SFW) 和地上部干重 (SDW)。地上部干重测定采用 70 °C 烘箱干燥 3 天后称量。干燥后的地上部经磨碎、自然风干后过 2 mm 筛备用。全 N 采用凯氏定氮法测定。样品矿质元素分析采用硝酸 - 高氯酸 (2 : 1) 混合酸湿法消解，混合酸溶液与植物样品质量比为 20 : 1。P 含量采用钒钼黄比色法用分光光度计测定。K 和 Na 采用火焰光度法测定。

植株收获后采集各盆混合土壤样品。将土样自然风干后过 2 mm 筛去除植物残体，置于阴凉干燥处保存，用于测定 pH、电导率 (EC)、P、K、Na 和硝态氮 (NO₃⁻-N) 等指标。pH 采用玻璃电极法，按土水比 = 1 : 1 (v/v) 制备悬浮液，间歇搅拌 1 h 平衡后测定。EC 值测定，按土水比 = 1 : 2 制备混合液，在往复式振荡器上振荡 1 h，真空抽滤后使用电导率仪测定滤液电导值。有效磷采用 Olsen 浸提法测定。速效钾采用 1 mol/L 碳酸氢铵 - 二乙烯三胺五乙酸 (AB-DTPA)，调节 pH

至 7, 提取有效钾, 并用火焰光度法测定。矿质氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 测定采用 Keeney 和 Nelson (1982) 的蒸汽蒸馏滴定法, 先用 200 mL 1 mol/L KCl 浸提土样, 经 Whatman 40 号滤纸过滤后, 对浸提液进行测定。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量由总矿质氮减去 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 计算得到。

1.4 统计分析

采用 MSTATC 3.1 软件进行数据统计分析, 平均值比较采用最小显著差异 (LSD) 多重范围检验 ($P \leq 0.05$)。

2 结果分析

2.1 小麦生长

叶面喷施不同用量腐植酸对石灰性和非石灰性土壤中小麦株高和地上部生物量的影响见表 2。统计分析显示, 在两种土壤类型中, 除石灰性土壤地上部干重外, 不同用量腐植酸对小麦株高、地上部鲜重 (SFW) 和地上部干重 (SDW) 均产生显著影

响 ($P \leq 0.05$)。同样, 在不同用量腐植酸和土壤类型中, 小麦株高、SFW 和 SDW 的平均值也表现出显著差异。然而, 腐植酸浓度和土壤类型的交互作用 (HA \times 土壤) 对生长参数无显著影响 ($P \leq 0.05$)。

由表 2 可知, 在两种土壤中, 施用 60 mg/kg (HA2) 腐植酸均能显著增加小麦株高和地上部鲜重。但最高用量腐植酸 (90 mg/kg, HA3) 对两种土壤中小麦生长有不同程度的影响。就石灰性土壤而言, HA2 处理 (60 mg/kg) 的株高 (30.2 cm)、地上部鲜重 (3.1 g) 和地上部干重 (0.7 g) 均达到最大值。而在非石灰性土壤中, HA2 处理的地上部鲜重 (4.3 g) 达到最大值; HA3 处理的株高 (34.4 cm) 和地上部干重 (1.0 g) 均达到最大值。从平均值来看, HA2 和 HA3 处理的平均株高相近, 而各处理间平均地上部鲜重和干重均未达到显著差异。土壤类型对小麦生长具有显著影响 ($P \leq 0.05$), 非石灰性土壤中小麦株高 (33.1 cm)、地上部鲜重 (4.1 g) 和地上部干重 (0.9 g) 的平均值均显著高于石灰性土壤。

表 2 腐植酸对石灰性和非石灰性土壤中小麦生长的影响

Tab.2 Effect of humic acid on growth of wheat plants grown in the Raisalpur (calcareous) and Guliana (non-calcareous) soils tested

HA 水平	株高 (cm)			地上部鲜重 (g)			地上部干重 (g)		
	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均
HA0	27.3c	30.1c	29.1c	2.4b	3.5b	2.9b	0.6a	0.9ab	0.7a
HA1	28.9b	32.8b	30.8b	2.8a	4.0a	3.4a	0.6a	0.8b	0.7a
HA2	30.2a	34.2a	32.2a	3.1a	4.3a	3.7a	0.7a	0.9ab	0.8a
HA3	29.9ab	34.4a	32.1a	2.8a	4.2a	3.7a	0.6a	1.0a	0.8a
平均	29.6B	33.1A		2.8B	4.1A		0.6B	0.9A	
HA	*	*		*	*		*	*	
土壤	*	*		*	*		*	*	
HA \times 土壤	ns	ns		ns	ns		ns	ns	

注: * 表示在 $P \leq 0.05$ 水平下显著; 同列中小写字母相同表示在 $P \leq 0.05$ 水平下差异不显著; 同一指标大写字母相同表示在 $P \leq 0.05$ 水平下差异不显著; ns 表示不显著。下同。

2.2 植物体内营养元素含量

表 3 数据显示, 两种土壤中施用腐植酸对小麦植株中 N 的含量有显著影响 ($P \leq 0.05$)。当腐植酸用量为 60 mg/kg 时, 石灰性土壤植株 N 含量为

17 g/kg, 非石灰性土壤植株 N 含量为 9 g/kg, 植株 N 含量均达最高值。两种土壤中腐植酸施用对 P 含量没有影响。随着腐植酸用量的增加, 对 K 和 N 含量有负面影响; 即在最高腐植酸用量 HA3 处理



(90 mg/kg) 下 K 和 N 含量最低。

综合石灰性和非石灰性两种土壤数据发现, 腐植酸用量仅对 N 含量产生显著差异 (表 3)。在 HA2 处理下, 测得 N 含量最高 (18 g/kg)。同样,

在不同用量腐植酸的处理下, 两种土壤中 K 含量相当, 而非石灰性土壤中 N 和 P 含量显著更高。腐植酸用量和土壤类型的交互作用仅对 N 含量有显著影响。

表 3 腐植酸对石灰性和非石灰性土壤中小麦植株养分含量的影响

Tab.3 Effect of humic acid on nutrient contents in wheat plants grown in the Raisalpur (calcareous) and Guliana (non-calcareous) soils tested

HA 水平	K			N			P		
	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均
HA0	3	3	3	7c	12c	10c	2	3	2
HA1	3	3	3	11b	14b	12b	1	3	2
HA2	3	2	3	17a	19a	18a	2	3	2
HA3	3	2	2	11b	14b	12b	2	3	2
平均	3	3		11B	15A		2B	3A	
HA	ns	ns		*	*		ns	ns	
土壤	ns	ns		*	*		*	*	
HA × 土壤	ns	ns		*	*		ns	ns	

2.3 土壤化学性质和养分浓度

收获后两种土壤的化学性质和养分浓度变化见表 4。

统计分析表明, 不同腐植酸用量对两种土壤中 K 含量均产生显著影响 ($P \leq 0.05$), 而 pH 和 EC 值无显著变化 (表 4)。

表 4 腐植酸对石灰性和非石灰性土壤 pH、EC 值和 K 含量的影响

Tab.4 Effect of humic acid on pH, EC and K concentration in the Raisalpur (calcareous) and Guliana (noncalcareous) soils tested

HA 水平	pH			EC 值 (dS/m)			K (mg/kg)			P (mg/kg)			NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)		
	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均	石灰性土	非石灰性土	平均
HA0	8.1	8.0	8.0	0.26	0.22	0.24	98ab	113ab	105.5ab	11.8	7.2	9.4	0.6	0.6	0.6
HA1	8.2	7.1	8.0	0.22	0.19	0.20	103a	115a	109.0a	13.9	7.3	10.6	0.6	0.5	0.5
HA2	8.1	7.9	7.9	0.24	0.21	0.22	95b	108bc	101.5b	13.0	7.8	10.3	0.5	0.5	0.5
HA3	8.1	7.9	8.0	0.24	0.25	0.24	95b	107c	101.0b	13.7	8.1	10.8	0.6	0.4	0.5
平均	8.1A	7.9B		0.24	0.21		97B	110A		13.1A	7.5B		0.6A	0.5B	
HA	ns	ns		ns	ns		*	*		ns	ns		ns	ns	
土壤	*	*		ns	ns		*	*		*	*		*	*	
HA × 土壤	ns	ns		ns	ns		ns	ns		ns	ns		ns	ns	

在非石灰性土壤中, HA0 处理 pH 为 8.0, HA2 处理降低至 7.9, 但各处理间差异不显著。较高用量的腐植酸 (HA2 和 HA3) 对两种土壤中的 K 含量均呈抑制作用: 在石灰性和非石灰性土壤中, K 含量分别从 HA1 处理的 103 和 115 mg/kg 降低到 HA3 处理的 95 和 107 mg/kg。两种土壤中, HA1 处理的 K 含量均最高, 其中非石灰性土壤中的 K 含量 (115 mg/kg) 显著高于石灰性土壤 (103 mg/kg)。

施用腐植酸显著提高了土壤 K 的平均含量 (表 4)。两种土壤均在 HA1 处理下测得最高 K 含量 (109 mg/kg)。土壤类型对 pH 具有显著影响: 与石灰性土壤相比, 非石灰性土壤的 pH 显著降低。腐植酸用量和土壤类型的交互作用对土壤化学性质和 K 含量无显著影响 ($P \leq 0.05$)。

施用不同用量的腐植酸对两种土壤中的 P 和 NO_3^- -N 含量均无显著影响 (表 4)。施用腐植酸后, 石灰性土壤中的 P 含量从 HA0 处理的 11.8 mg/kg 增加到 HA1 处理的 13.9 mg/kg, 但差异不显著。在非石灰性土壤中也有类似的趋势。从统计学角度来看, 腐植酸对 P 和 NO_3^- -N 含量没有影响。然而, 两种土壤中的 P 和 NO_3^- -N 含量存在显著差异。在石灰性土壤中, P 和 NO_3^- -N 的含量均达到最大值, 平均值分别为 13.1 和 0.6 mg/kg。腐植酸用量和土壤类型的交互作用对养分浓度无显著影响 ($P \leq 0.05$)。

3 讨论

3.1 小麦生长

本研究中, 施用腐植酸显著促进了石灰性和非石灰性土壤中小麦的生长。在不同腐植酸用量处理中, 石灰性土壤中施用 60 mg/kg (HA2) 的小麦株高和地上部鲜重、干重均最高。与未施用腐植酸的对照 (HA0) 相比, HA2 处理的小麦株高、地上部鲜重和干重 (两种土壤的平均值) 的相对增幅分别为 10%、25% 和 18%。施用腐植酸对植物生长的促进作用在以前的文献中也有报道。本研究结果表明, 中等用量腐植酸 (60 mg/kg) 对小麦的促

生长作用优于高浓度腐植酸 (90 mg/kg, HA3), 或与高浓度效果相当 (表 2)。这些发现与 Lee 等 (1976) 的研究结果相似。Malik 等 (1985) 报道, 在培育小麦幼苗的水中添加 54 mg/kg 腐植酸, 能显著促进小麦幼苗根系和地上部的生长, 增强对水分和养分的吸收能力。Tan 等 (1979) 认为, 适量的腐植酸有利于玉米植株的根系和地上部生长。然而, Pilanali 等 (2003) 研究发现, 在石灰性土壤中施用 400 kg/hm² 腐植酸, 对草莓生长和养分吸收没有影响。

土壤对小麦生长的影响显著。非石灰性土壤中小麦表现出最高的株高、地上部鲜重和干重, 且较石灰性土壤分别增加了 13%、46% 和 41%。因此, 在石灰性土壤中观察到的小麦植株生长减弱现象, 可能与腐植酸提供的养分含量低无关, 而可能与石灰性土壤自身不利的理化和生物特性有关。Mengel 等 (1982) 报道, 土壤溶液中碳酸盐含量高、 Ca^{2+} 浓度高、pH 高是石灰性土壤的特征, 所有这些土壤因素共同导致养分溶解度降低, 进而引发了石灰性土壤中植物养分缺乏, 导致植物生长不良。

3.2 植物养分含量

从两种土壤平均值来看, 不同腐植酸用量对小麦植株 N 含量有显著影响, 而对 K 和 P 含量无显著影响 (表 3)。与 HA0 相比, HA2 处理使植株 N 含量提高了 76%; 与 HA2 处理相比, HA3 处理使植株 N 含量降低了 38%。施用腐植酸后 N 含量的增加反映了土壤中氮的矿化程度, 而 P 含量因腐植酸的施用而降低。大量研究表明, 腐植酸的效果取决于施用量、生长介质和腐殖质的来源。此外, 无论腐植酸来源和供试土壤的类型如何, 其作用效果因植物种类的不同也有所不同。Tan 等 (1979) 将植物分为 4 组, 其中玉米对腐植酸的施用反应中等。Escobar 等 (1996) 认为, 当叶片营养元素含量低于充足水平时, 叶面喷施腐植酸无法有效促进养分的吸收和积累。

石灰性土壤中植物 P 含量的下降可能是由于腐植酸吸附在 Ca-P 表面以外的矿物上。然而, 在非石灰性土壤中, 腐植酸在矿物质表面与 P 之间形成的金属桥可能抵消了降低 P 吸附作用的过程。

