

土壤侵蚀磁性示踪剂对大白菜生理特性 及产量和品质的影响*

范振义 董元杰[†] 刘春生 王全辉 侯俊 张秀玮

(山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

摘要 通过大田试验研究了不同浓度的土壤侵蚀磁性示踪剂对大白菜生理特性及产量、品质的影响。结果表明,在 4 个浓度(1%、3%、5%、10%)的示踪剂处理下,大白菜叶长、叶宽及产量均明显增大;低浓度(3%~5%)的示踪剂提高了大白菜的株高,促进了根的伸长,显著提高了叶绿素含量($p < 0.05$),同时对大白菜净光合速率、蒸腾速率也有促进作用。示踪剂处理使叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性显著降低($p < 0.05$),而根系中 SOD 活性则显著升高($p < 0.05$);示踪剂对过氧化物酶(POD)活性的影响与对 SOD 活性的影响恰好相反,对过氧化氢酶(CAT)活性影响较小,在低浓度条件下,叶片与根系中 POD 和 CAT 保持有较高活性;示踪剂还导致叶片中丙二醛(MDA)含量显著提高($p < 0.05$)。同时,示踪剂降低了大白菜可溶性糖含量,但不显著。示踪剂浓度大于 5% 时显著降低维生素 C 含量($p < 0.05$)。低浓度(1%~3%)处理时有效改善了大白菜品质。总之,低浓度的示踪剂用量对大白菜生长有促进作用,高浓度的示踪剂对大白菜生长有抑制作用。

关键词 土壤侵蚀磁性示踪剂;大白菜;生理特性;产量;品质

中图分类号 S154.3;S154.4 **文献标识码** A

20 世纪 80 年代 Oldfield 等提出了土壤侵蚀磁性示踪剂技术研究并在实践中进行了尝试^[1],2001 年 Ventura 等^[2]提出利用人工磁性示踪剂研究土壤侵蚀的新思路后,磁性示踪剂以其测量无需破坏性地取样、操作简便、成本低的优势,逐渐得到广大科研工作者的重视。董元杰等^[3]研制了以粉煤灰、水泥等为原料的新型磁性示踪剂,并将其施入土壤中作为磁示踪剂,研究坡面土壤侵蚀,取得了初步成果。Hu 等^[4-5]的研究表明加入磁性示踪剂后土壤的理化性质发生了相应的变化,但不会对土壤造成重金属污染,而有关磁性示踪剂能否加入到坡耕地农田中,是否对立地植物的生长发育及产量品质产生影响,是否对土壤有一定的改良作用方面的研究却鲜见报道。且由于磁性示踪剂本身具有较强磁性,物理化学组成不同于土壤原始结构,因而研究其对植物生理特性及其产量、品质的影响显得尤为重要。

本文选用主要生育期在秋冬季的大白菜为供

试作物,在土壤中施入不同浓度的本实验室自制土壤侵蚀磁性示踪剂,在降雨侵蚀影响不剧烈的条件下,研究不同浓度磁性示踪剂对大白菜生理特性、产量和品质的影响;探讨磁性示踪剂对大白菜生长的影响及其相关机制,旨在为磁性示踪剂在土壤侵蚀研究中的有效应用及环境安全影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验布置在山东农业大学资源与环境实验站,试验区的土壤为普通棕壤。土壤基本肥力特性:碱解氮 39.25 mg kg^{-1} ,速效磷 28.72 mg kg^{-1} ,速效钾 108.5 mg kg^{-1} ,有机质 13.18 g kg^{-1} 。表 1 为施入不同浓度磁性示踪剂前后的土壤理化性质。土壤侵蚀磁性示踪剂由粉煤灰、水泥和还原铁粉按照质

* 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD11B01,2011BAD11B02)、山东省博士基金(BS2009NY025)、国家自然科学基金项目(40701094)、国家 948 项目(2011-G30)和山东省自然科学基金项目(ZR2009DM043)资助

[†] 通讯作者:董元杰(1977—),男,汉族,山东德州人,博士后,副教授,主要从事土壤生态及植物营养方面的研究。Tel:0538-8241546, E-mail: yjdong@sdau.edu.cn

作者简介:范振义(1985—),男,汉族,山西忻州人,硕士研究生,主要从事土壤生态与环境研究。E-mail: fanzhenyi2007@163.com, Tel: 18853882364

收稿日期:2011-08-23;收到修改稿日期:2011-12-22

量比为 8:4:1 的比例混匀,采用圆盘造粒法制作^[5]。磁性示踪剂的 pH 为 10.58,碱解氮、速效磷、速效钾分别为 10.57、37.86、521.4 mg⁻¹kg,重金属 Cu、Zn、Cd、Pb 的含量分别为 48.53、98.89、14.89、50.12 mg kg⁻¹,磁性

示踪剂的容重为 1.05g cm⁻³,具有一定的硬度,在水中不易崩解,在土壤中崩解率几乎为零,重金属的溶出率≤22.73%。供试大白菜(*Brassica chinensis*)为“新北京三号”。

表 1 磁性示踪剂浓度对土壤相关理化性质的影响

Table 1 Effects of concentrations of magnetic tracer treatments on the related physical and chemical properties of soil

处理 Treatments	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	密度 Particle density (g cm ⁻³)	孔隙度 Porosity (%)	磁化率 Magnetic susceptibility (10 ⁻⁵ SI)	电导率 Electric conductivity (μS cm ⁻¹)	pH
CK	1.26	2.52	50	35	112.4	7.26
T1	1.26	2.68	53	54	118.5	7.32
T2	1.25	2.72	54	64	139.5	7.43
T3	1.20	2.73	56	75	183.2	7.65
T4	1.10	2.82	61	128	330.8	8.52

1.2 试验设计

试验于 2010 年 8 月~11 月进行,共设 5 个处理:对照为不施磁性示踪剂只施入肥料(CK);示踪处理为 T1~T4 4 个处理,示踪剂浓度分别为 1%、3%、5%、10%,每个处理设 3 次重复。8 月 20 日播种育苗,9 月 5 日将幼苗移栽于面积为 10 m²(2 m×5 m)的小区中,行距 50 cm,株距 40 cm,所有处理施肥量相同,肥料质量比为 N:P₂O₅:K₂O=14:14:14 的普通复合肥,施肥量为 750 kg hm⁻²(肥料由山东金正大集团提供)。施肥方式为条施,整个生育期不再施肥。于大白菜不同生育期测定大白菜叶绿素、光合蒸腾系数、抗氧化酶活性等生理指标。11 月 20 日收获,测定生长指标及产量和品质指标。

1.3 测定的指标与方法

叶绿素、光合速率及相关参数的测定:在不同生育期用 SPAD-502 叶绿素仪测定大白菜叶绿素的 SPAD 值^[6],采用 CB-1102 型便携式光合蒸腾仪,测定大白菜叶片的净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 。

抗氧化酶活性及丙二醛(Malondialdehyde MDA)含量的测定:超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, EC1.15.1.1 SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性分别采用氮蓝四唑法、愈创木酚法、紫外吸收法测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[7]。

根系活力及生长指标的测定:根系活力采用

TTC 法;生长指标的测定选在大白菜连根收获后,分别测定地上部最大叶片叶长与叶宽、地下部主根长、株高及鲜重。

品质的测定:硝酸盐含量用水杨酸法测定,维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚滴定法测定,可溶性糖含量采用苯酚法测定^[8]。

1.4 数据处理

数据处理采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 磁性示踪剂对大白菜叶绿素含量、根系活力、净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)的影响

2.1.1 对叶绿素值和根系活力的影响 由表 2 可见,随着示踪剂浓度的增大,大白菜叶绿素值减小。低浓度示踪剂对大白菜植株中叶绿素含量的提高作用最大,在示踪剂浓度为 1% 时,大白菜的叶绿素值显著提高($p < 0.05$),较 CK 增加 9.4%~14.6%;当示踪剂浓度为 5% 时,大白菜叶绿素值增幅减小。当示踪剂浓度为 10% 时,部分叶绿素值较 CK 降低了 0.9%~3.5%。施示踪剂的处理中,叶片中叶绿素含量在收获期依然处于较高值,在浓度低于 5% 时仍明显高于 CK,说明低浓度施用示踪剂可以延缓叶片中叶绿素的降低。

表 2 磁性示踪剂浓度对大白菜叶片叶绿素含量和根系活力的影响

Table 2 Effect of concentration of magnetic tracer on chlorophyll content in leaves and root activity of Chinese cabbage

处理 Treatments	叶绿素含量 Leaf chlorophyll content				根系活力 Root activity ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, FW)			
	苗期 Seeding stage	莲座期 Rosette stage	结球期 Heading stage	收获期 Harvest stage	苗期 Seeding stage	莲座期 Rosette stage	结球期 Heading stage	收获期 Harvest stage
	CK	38.2 ± 2.9b	44.9 ± 3.4a	47.7 ± 3.2a	36.2 ± 2.5d	157.4 ± 8.4c	178.9 ± 16.2b	123.6 ± 19.4c
T1	43.8 ± 2.4a	49.3 ± 2.6a	51.5 ± 1.6a	52.7 ± 2.0a	183.5 ± 25.7bc	201.6 ± 19.7b	170.7 ± 18.2b	118.3 ± 6.6ab
T2	42.1 ± 2.2ab	44.5 ± 2.1a	52.2 ± 2.1a	47.2 ± 0.4b	206.1 ± 24.2b	218.9 ± 20.8b	188.8 ± 13.3ab	123.5 ± 11.8ab
T3	40.4 ± 3.3ab	45.3 ± 2.2a	49.1 ± 3.6a	43.5 ± 3.3bc	287.8 ± 12.8a	300.5 ± 26.5a	205.0 ± 9.3a	126.0 ± 6.0a
T4	41.0 ± 0.6ab	43.4 ± 1.6a	45.3 ± 2.5a	40.8 ± 1.4c	269.8 ± 4.7a	279.5 ± 21.1a	209.5 ± 17.7a	127.9 ± 14.8ab

注:不同字母表示差异达 5% 显著水平,下同 Note: Different letters mean significant difference at 0.05 level and the same below

2.1.2 对大白菜根系活力的影响 由表 2 可知,示踪剂显著影响大白菜根系活力 ($p < 0.05$)。从整个生育期来看,示踪剂处理的根系活力均高于 CK,表现为 T4 > T3 > T2 > T1 > CK。根系活力在莲座期为最高,收获期最低。示踪剂浓度为 1% 时,较 CK 根系活力增加 12.6% ~ 38.1%。示踪剂浓度达到 5% 时较 CK 根系活力增加 20.1% ~ 82.8%。当示踪

剂浓度为 10% 时,前三个生育期根系活力增幅达到 56.2% ~ 71.4%。收获期增幅为 2.7%,仍高于 CK。可见,施用示踪剂能明显提高大白菜的根系活力,延缓大白菜后期根系的衰老。

2.1.3 对大白菜光合速率及蒸腾速率的影响

由表 3 可知,施用示踪剂显著影响大白菜的净光合能力和蒸腾速率。

表 3 磁性示踪剂浓度对大白菜叶片光合速率与蒸腾速率的影响

Table 3 Effect of concentration of magnetic tracer on photosynthetic rate and transpiration rate in leaves of Chinese cabbage

处理 Treatments	净光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				蒸腾速率 Transpiration rate ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
	苗期 Seeding stage	莲座期 Rosette stage	结球期 Heading stage	收获期 Harvest stage	苗期 Seeding stage	莲座期 Rosette stage	结球期 Heading stage	收获期 Harvest stage
	CK	20.84 ± 2.44b	23.60 ± 1.32b	24.23 ± 2.08b	17.01 ± 1.05b	5.56 ± 0.34c	5.82 ± 0.21c	5.37 ± 0.19c
T1	24.55 ± 1.41a	26.81 ± 1.62a	26.73 ± 0.97a	20.50 ± 0.89a	6.67 ± 0.23b	6.97 ± 0.14b	6.26 ± 0.33b	5.91 ± 0.48b
T2	24.96 ± 1.45a	27.43 ± 1.98a	26.83 ± 1.62a	21.45 ± 0.86a	7.82 ± 0.34a	9.01 ± 0.20a	8.37 ± 0.59a	7.58 ± 0.19a
T3	18.37 ± 1.78b	20.68 ± 1.35c	21.67 ± 0.85c	16.43 ± 1.19b	6.22 ± 0.12b	6.65 ± 0.23b	6.19 ± 0.21b	5.55 ± 0.39c
T4	14.56 ± 1.25c	16.07 ± 1.44d	15.30 ± 2.12d	11.68 ± 1.52c	5.54 ± 0.19c	5.63 ± 0.17c	5.22 ± 0.14c	4.39 ± 0.42d

土壤施入示踪剂后可增大大白菜的净光合速率和蒸腾速率,表现为随着示踪剂施入浓度的增加,净光合速率和蒸腾速率呈先增后减的趋势。当示踪剂浓度为 3% 时,大白菜的净光合速率和蒸腾速率同时达到最大,净光合速率较 CK 增加 10.7% ~ 22%,蒸腾速率较 CK 增加 12.3% ~ 68.6%。当示踪剂浓度为 10% 时,大白菜各生育期的净光合速率均显著低于 CK,降幅为 30.0% ~ 36.8%。而此浓度处理时大白菜的蒸腾速率降幅则很小,较 CK 降低 0.3% ~ 3.3%。当示踪剂浓度为 5% 时,除苗期与收获期外,各生育期下大白菜净光合速率与 CK 相比则显著降低。而此浓度下大白菜蒸腾速率仍显著

高于 CK。

2.2 磁性示踪剂对大白菜抗氧化酶活性及 MDA 含量的影响

2.2.1 对大白菜 SOD 活性的影响 超氧化物歧化酶 (SOD) 是植物体内清除自由基最关键的保护酶之一,可防御活性氧或其他过氧化物自由基的歧化作用而生成过氧化氢^[9]。

由图 1 可见,施入示踪剂后,大白菜叶片中 SOD 活性显著降低 ($p < 0.05$),而根系中 SOD 活性则显著上升。在苗期,叶片中 SOD 活性随示踪剂浓度的增加而逐渐降低,示踪剂浓度为 1% 时,SOD 活性较 CK 显著降低 51.5%。当示踪剂浓度为 10% 时,叶

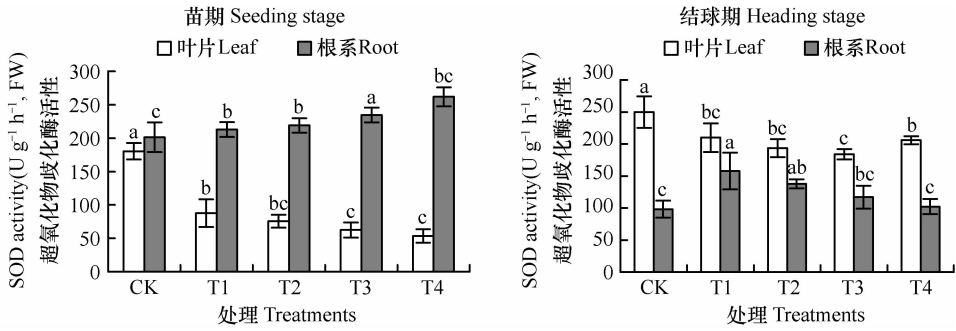


图1 磁性示踪剂浓度对大白菜叶片及根系 SOD 活性的影响

Fig. 1 Effect of concentration of magnetic tracer on SOD activity in leaves and roots of Chinese cabbage

片中 SOD 活性最低。而根系中 SOD 活性则与此相反, 施示踪剂后根系中 SOD 活性显著升高, 随着示踪剂浓度的增大, SOD 活性则呈现指数增加趋势。结球期叶片与根系中 SOD 活性变化趋势与苗期大体一致, 但此时叶片中 SOD 活性远高于苗期, 且根系中低浓度示踪剂处理的 SOD 活性大于高浓度处理。

2.2.2 对大白菜 POD 活性的影响 POD 广泛分布于植物的各个器官中, 它能清除植物体内的 H₂O₂, 提高植物的抗逆性, 延缓植物衰老^[10]。

由图 2 可见, 不同浓度示踪剂处理提高了叶片

POD 活性, 但同时也不同程度的降低了根系中 POD 活性。在苗期, 叶片中 POD 活性随示踪剂浓度增加而先升高后降低。示踪剂浓度为 5% 时, 叶片中 POD 活性达到最大, 较 CK 增加 25.7%。而示踪剂使根系 POD 活性随着示踪剂浓度的增大逐渐降低, 但各处理间差异不显著。结球期, 叶片与根系中 POD 活性较苗期上升, 示踪剂浓度为 10% 时, 叶片中 POD 活性最高, 较 CK 显著增大了 33.4% ($p < 0.05$)。示踪剂浓度为 5% 时, 根系中 POD 活性较 CK 显著降低, 且此时大白菜叶片与根系中 POD 活性会突然发生改变。

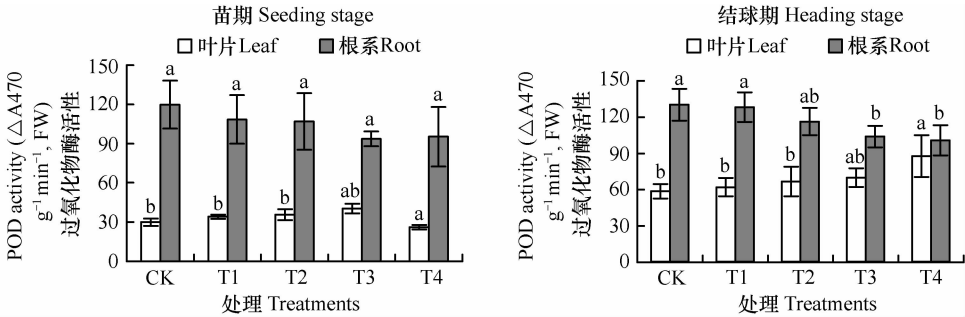


图2 磁性示踪剂浓度对大白菜叶片及根系 POD 活性的影响

Fig. 2 Effect of concentration of magnetic tracer on POD activity in leaves and roots of Chinese cabbage

2.2.3 对大白菜 CAT 活性的影响 由图 3 可见, 不同浓度示踪剂处理下, 大白菜叶片与根系中 CAT 活性均有所降低, 且呈现随示踪剂浓度升高而降低的趋势, 苗期各处理叶片中 CAT 活性差异显著, 而根系各处理间差异不显著。在苗期, 当示踪剂浓度达到 5% 时, 叶片中 CAT 活性显著降低 ($p < 0.05$)。结球期相同处理下, 叶片中 CAT 活性与苗期相比大幅降低。叶片中 CAT 活性在示踪剂浓度为 3% 时最高, 根系中 CAT 活性在示踪剂浓度为 5% 时最低。

2.2.4 对大白菜 MDA 含量的影响 MDA 含量是判断逆境和衰老过程中膜脂过氧化程度的重要指标^[11]。由图 4 可见, 在苗期, 随着示踪剂浓度的升高, 大白菜叶片中 MDA 含量逐渐增加。当示踪剂浓度为 1% 时, 叶片中 MDA 含量低于 CK。当示踪剂浓度为 5% 时, 叶片中 MDA 含量最高, 较 CK 增加 88.4%。而根系中 MDA 含量则随着示踪剂浓度升高而逐渐降低。示踪剂浓度为 1% 时, MDA 含量没有变化。当示踪剂浓度为 5% 和 10% 时, MDA 含量显著降低 ($p < 0.05$)。

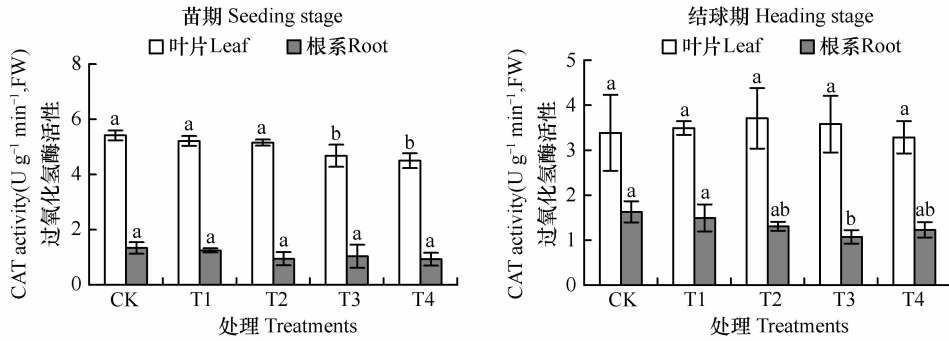


图3 磁性示踪剂浓度对大白菜叶片及根系 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effect of concentration of magnetic tracer on CAT activity in leaves and roots of Chinese cabbage

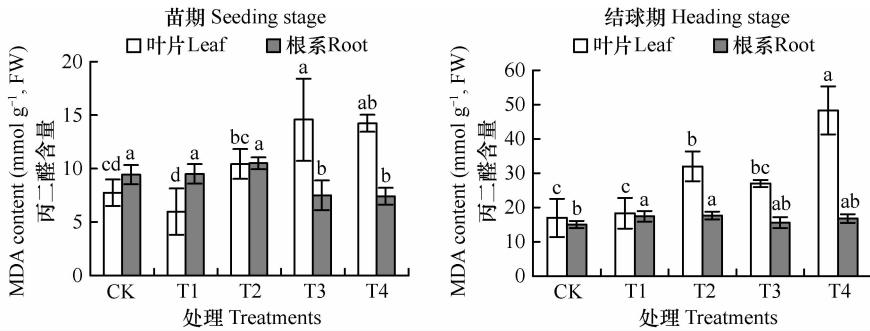


图4 磁性示踪剂浓度对大白菜叶片及根系 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effect of concentration of magnetic tracer on MDA content in leaves and roots of Chinese cabbage

在结球期,不同处理大白菜 MDA 含量与苗期变化趋势大体相同,但其含量显著高于苗期,当示踪剂浓度为 10% 时叶片 MDA 含量最高。根系中 MDA 含量则随示踪剂浓度的增加呈现先升高后降低的趋势,在示踪剂浓度为 3% 时 MDA 含量最高,较 CK 增加 17.5%。这表明示踪剂对大白菜 MDA 含量变化有一定的影响,且这种作用与示踪剂的浓度和作用时间的长短有关。

2.3 磁性示踪剂对大白菜生长指标及产量的影响

由表 4 可见,磁性示踪剂对大白菜生长有显著

影响。随着施用示踪剂浓度的增大,叶长和叶宽显著增大。大白菜株高与鲜重随示踪剂浓度的增大呈先升高后降低的趋势,在示踪剂浓度为 5% 时株高和产量达到最大,产量较 CK 增加 36.3%,株高增加 36.1%。磁性示踪剂对大白菜根长有促进作用,且在浓度小于 5% 时,浓度越高促进作用越大;浓度大于 5% 时,浓度越高促进作用越小。在示踪剂施用浓度为 5% 时,大白菜根长最大,较 CK 增加 42.3%。

表 4 磁性示踪剂浓度对大白菜生长指标及产量、品质的影响

Table 4 Effects of concentrations of magnetic tracer treatments on growth target, yield and quality

处理 Treatments	叶长 Leaf length (cm)	叶宽 Leaf width (cm)	株高 Plant height (cm)	根长 Root length (cm)	产量 Yield (kg plant ⁻¹)	硝酸盐 Nitrate (mg kg ⁻¹ , FW)	可溶性糖 Soluble sugar (mg g ⁻¹ , FW)	维生素 C Vitamin C (mg g ⁻¹ , FW)
CK	25.33 ± 2.08bc	20.05 ± 2.65ab	24.00 ± 1.70bc	11.67 ± 0.56d	2.24 ± 0.19b	534.8 ± 16.6a	45.64 ± 2.15a	51.13 ± 4.21a
T1	29.00 ± 2.65b	22.67 ± 3.51ab	28.35 ± 3.15ab	13.44 ± 0.47c	2.57 ± 0.17ab	532.5 ± 6.8a	42.14 ± 4.12a	51.26 ± 1.99a
T2	37.02 ± 3.61a	24.57 ± 3.79a	30.33 ± 2.08a	14.48 ± 0.72bc	2.64 ± 0.43ab	522.1 ± 39.4a	44.15 ± 4.37a	47.50 ± 3.82a
T3	35.33 ± 1.53a	25.67 ± 4.04a	32.67 ± 1.53a	16.60 ± 1.11a	2.95 ± 0.36a	518.2 ± 34.6a	41.80 ± 3.65a	39.43 ± 4.45b
T4	37.35 ± 2.11a	25.58 ± 5.03a	30.34 ± 3.51a	15.28 ± 0.93ab	2.34 ± 0.35b	456.8 ± 29.7b	40.91 ± 6.38a	38.10 ± 3.44b

2.4 磁性示踪剂对大白菜品质的影响

硝酸盐含量的高低是评价蔬菜品质好坏的重要指标。由表 4 可见,施用示踪剂并没有使大白菜硝酸盐含量升高,反而降低了大白菜叶片中的硝酸盐含量。且示踪剂浓度越大,降低幅度越大。当示踪剂浓度达到 10% 时,硝酸盐含量显著降低,较 CK 降低 14.6%。可溶性糖和维生素是大白菜的重要品质指标。与 CK 相比,施入示踪剂后可溶性糖的含量降低,且示踪剂浓度的越大,降幅越大。当示踪剂浓度为 1% 时,较 CK 降低了 7.7%。当示踪剂浓度达 10% 时,可溶性糖较 CK 只降低了 11.5%。当示踪剂浓度为 1% 时,Vc 含量增加,但当示踪剂浓度高于 3% 时,Vc 含量与对照相比显著降低。因此,示踪剂低于 3% 时有助于 Vc 保持较高含量。

3 讨论与结论

3.1 磁性示踪剂对大白菜叶绿素含量、根系活力、净光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr)的影响

本研究表明,示踪剂浓度低于 5% 时可提高大白菜叶绿素含量,而浓度高于 5% 时则抑制了叶绿素的合成。这种差异可能由四方面原因引起。一是磁性示踪剂富含叶绿素合成所必需元素 P、K、Ca、Mg 等,当大白菜生长后期土壤不能充足提供这些元素时,示踪剂可以提供这一需求,因而低浓度示踪剂处理下,叶绿素含量高于对照处理,且在大白菜生长后期仍能保持在一定水平。二是高浓度磁性示踪剂提高了 pH,进而降低了土壤养分的有效性,而浓度小于 5% 的处理影响不显著。三是磁性示踪剂含有 Cu、Mg、Fe 等多种微量元素,影响叶绿素合成有关的酶活性,杨居荣等^[12] 研究认为,微量元素 Mg 和 Fe 低浓度时能促进叶绿素的合成,而高浓度时使叶绿素含量的降低。四是磁性示踪剂改变了土壤-生物磁场,进而影响叶绿素变化。依艳丽等^[13-14] 研究认为,磁处理改善了土壤理化性质,对作物产生了促进作用,从而有利于叶绿素的合成。

本研究表明,示踪剂对大白菜根系活力与产量的提高具有明显的促进作用。这可能与示踪剂的物理性质及其改土作用有关。根系活力与作物产量有密切的关系,根系活力越大,相应的生物产量和经济产量就越大^[15]。赵旭等^[16] 认为适宜的根际气体环境显著增强了番茄植株的根系活力。本文的研究结果也印证了这一结论。同时磁性示踪剂具有的磁效应改变了土壤特性^[14,17],改善了作物生

长环境^[18],提高了作物的生长速度及根系活力。示踪剂的这种作用对保持大白菜后期根系对养分的吸收能力具有重要意义,也延缓了地上部特别是叶片的衰老,能保持后期叶片较强的光合作用,对大白菜产量的提高产生积极的影响。

低浓度(3%~5%)磁性示踪剂处理显著促进了大白菜的净光合速率和蒸腾速率,而高浓度(10%)的磁性示踪剂对大白菜光合作用有抑制作用。低浓度示踪剂处理时,大白菜的净光合速率和蒸腾速率同时达到最大,随着示踪剂浓度增加,其净光合速率则明显降低,而蒸腾速率对示踪剂浓度的影响变化较小。产生这种差异的主要原因可能是示踪剂中含有的微量元素铁和铜产生作用。N Mallick 等^[19] 研究认为,铜胁迫可使大白菜叶片气孔导度降低,抑制叶片与外界气体交换,导致植物光合速率降低。此外,高浓度示踪剂对其蒸腾速率的影响较小,可能是示踪剂对土壤物理性质有一定改善作用,促进了根系的吸收作用,提高了植株的蒸腾拉力。

3.2 磁性示踪剂对大白菜抗氧化酶活性及 MDA 含量的影响

本研究表明,加入示踪剂后根系中 SOD 活性则显著升高。在整个生育期中,根系活性氧清除系统活性高,延缓了根系的衰老进程,根系功能期延长,但同时叶片中 SOD 活性降低,表明示踪剂对根叶影响作用不同。薛毓华等研究表明^[20],磁处理影响了酶中具有顺磁性的 Mn、Cu、Zn、Fe 等金属原(离子),进一步影响到这些酶和蛋白质所参与的一系列生理生化反应。大白菜 POD 活性在低浓度处理时保持较高活性,低浓度示踪剂对 POD 活性的维持有积极作用。顾继光等^[21] 对油菜的研究表明,磁处理提高了膜保护酶的活力和效率。同时可见,示踪剂浓度达 5% 时,根叶中 POD 活性会出现较大突跃,说明此浓度为刺激大白菜 POD 活性的临界值。此外,示踪剂对大白菜根与叶片中 CAT 活性影响较小。磁性示踪剂处理可提高大白菜叶片 MDA 含量,但相对降低了根系中 MDA 含量,说明大白菜对示踪剂刺激敏感且 MDA 在叶片中易于大量积累,而根系则受到了保护。

3.3 磁性示踪剂对大白菜产量、品质的影响

高浓度示踪剂处理下,大白菜产量显著降低是叶绿素值降低和光合性能参数降低综合作用的结果,并非示踪剂的浓度越大,大白菜产量就越高。浓度为 3%~5% 磁性示踪剂对大白菜产量的提高有

最佳效果,这与磁性示踪剂对大白菜叶绿素含量与光合特性的影响一致。施用示踪剂提高了大白菜的品质,可能是示踪剂改善了土壤结构,提高了土壤养分活性、促进作物对养分吸收,也可能与磁性示踪剂的生物磁致效应有关。但对品质各指标的影响不同,可能与各浓度处理下示踪剂所含的钾量以及大白菜所需最适微量元素含量不同有关系。

总之,大田坡地土壤侵蚀磁性示踪条件下,磁性示踪剂浓度小于5%,不会对立地作物生长及产量、品质产生不利影响。而有关示踪剂对作物生长影响的机理,特别是磁性示踪剂的生物磁致效应机制还需进行更为深入的研究。

参考文献

- [1] 俞劲炎,卢升高. 土壤磁学. 南昌: 江西科学技术出版社, 1990: 97—103. Yu J Y, Lu S G. Soil magnetism (In Chinese). Nanchang: Jiangxi Sci & Tech Press, 1990: 97—103
- [2] Ventura E, Nearing M A, Norton L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion. *Catena*, 2001, 43: 277—291
- [3] 董元杰,史衍玺,孔凡美,等. 基于磁测的坡面土壤侵蚀空间分布特征研究. *土壤学报*, 2009, 46(1): 144—148. Dong Y J, Shi Y X, Kong F M, et al. Magnetic-measurement-based spatial distribution of soil erosion on slope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 144—148
- [4] Hu G Q, Dong Y J, Wang H, et al. Laboratory testing of magnetic tracers for soil erosion measurement. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 328—338
- [5] 胡国庆,董元杰,史衍玺,等. 新型土壤侵蚀磁性示踪剂的研制及其对土壤理化性状的影响. *土壤学报*, 2011, 48(3): 645—649. Hu G Q, Dong Y J, Shi Y X, et al. Development of new soil erosion magnetic tracers and their effects on soil physical and chemical properties (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(3): 645—649
- [6] Uddling J, Gelang-Alfredsson J, Piikki K. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyllmeter readings. *Photosynthesis Res*, 2007, 91: 37—46
- [7] 张清智,陈振德,刘红玉. 氧代菊酯对小白菜抗氧化酶活性及丙二醛(MDA)含量的影响. *生态毒理学报*, 2008, 3(5): 507—512. Zhang Q Z, Chen Z D, Liu H Y. Effects of fenvalerate on the activities of antioxidant enzymes and contents of malondialdehyde (MDA) in Pakchoi (In Chinese). *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(5): 507—512
- [8] 北京大学生物系生物化学教研室. 生物化学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 1979. The Biochemistry Teaching and Research Section of Biology Department of Beijing University. The experiment instruct of biochemistry (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1979
- [9] 杜新民,张永清. 施锌对石灰性褐土上小白菜光合作用及保护酶活性的影响. *西北植物学报*, 2008, 28(6): 1 203—1 207. Du X M, Zhang Y Q. Effects of zinc on photosynthesis and the activities of protective enzymes of Chinese cabbage in calcareous cinnamon soil (In Chinese). *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(6): 1 203—1 207
- [10] 孙赛初,王焕校,李启任. 水生维管束植物受镉污染后的生理变化及受害机制初探. *植物生理学报*, 1985, 11(2): 113—121. Sun S C, Wang H X, Li Q R. Preliminary study on physiological changes and injury mechanism (In Chinese). *Acta Plant Physiology Sin*, 1985, 11(2): 113—121
- [11] Stewart R, Bewley J. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiol*, 1980, 65(2): 245—248
- [12] 杨居荣,黄翌. 植物对重金属的耐性机理. *生态学杂志*, 1994, 13(6): 20—26. Yang J R, Huang Y. Mechanism of heavy metal tolerance of plants (In Chinese). *Journal of Ecology*, 1994, 13(6): 20—26
- [13] 依艳丽,刘孝义. 磁场对土壤理化性质的影响. *中国农业科学*, 1991, 24(2): 19—26. Yi Y L, Liu X Y. Effect of magnetic treatment on soil physico-chemical properties (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 1991, 24(2): 19—26
- [14] 依艳丽,刘孝义,夏丽华,等. 磁处理土壤对作物生长影响的初步研究. *沈阳农业大学学报*, 1999, 30(5): 498—501. Yi Y L, Liu X Y, Xia L H, et al. Preliminary study on effects of magnetic treatment soil on crops growth (In Chinese). *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1999, 30(5): 498—501
- [15] 周广生,梅方竹,陈艳华. 冬小麦根系活力与产量性状关系的研究. *华中农业大学学报*, 2001, 20(6): 531—534. Zhou G S, Mei F Z, Chen Y H. Studies on relations between root vigor of winter wheat and its yield characters (In Chinese). *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2001, 20(6): 531—534
- [16] 赵旭,李天来,孙周平. 番茄基质通气栽培模式的效果. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 74—78. Zhao X, Li T L, Sun Z P. Effects of substrate-aeration cultivation pattern on tomato growth (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 74—78
- [17] 刘思春,朱建平. 磁环境条件对小麦抗旱性的影响. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(4): 83—88. Liu S C, Zhu J P. Drought resistance of wheat under magnetic conditions (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, 14(4): 83—88
- [18] 顾继光,周启星,林秋奇,等. 土壤-小麦生态系统的磁化效应及其生态指示. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2 045—2 048. Gu J G, Zhou Q X, Lin Q Q, et al. Response of soil-wheat ecosystem to soil magnetization and related ecological indicator (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2 045—2 048
- [19] Mallick N, Mohn F H. Use of chlorophyll fluorescence in metal stress research: A case study with the green micro alga *Scenedesmus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, 55: 64—69
- [20] 薛毓华,王步东,蔡素雯,等. 磁处理与超氧化物歧化酶的关系. *生物物理学报*, 1989, 5(3): 268—273. Xue Y H, Wang B D, Cai S W, et al. The relation of the magnetic treatment to superoxide dismutase (SOD) (In Chinese). *Acta Biophysica Sinica*, 1989, 5(3): 268—273
- [21] 顾继光,周启星. 磁场处理土壤对油菜保护酶活性的影响. *应用基础与工程科学学报*, 2002, 10(3): 263—267. Gu J G,

Zhou Q X. Effects of soil magnetization on defensive enzymes in rape plants (In Chinese). Journal of Basic Science and Engineer-

ing, 2002, 10(3): 263—267

EFFECTS OF MAGNETIC TRACER FOR SOIL EROSION ON PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS, YIELD AND QUALITY OF CHINESE CABBAGE

Fan Zhenyi Dong Yuanjie[†] Liu Chunsheng Wang Quanhui Hou Jun Zhang Xiuwei
(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract In order to determine effects of the magnetic tracer for soil erosion on Chinese cabbage, a field experiment was carried out, with the cabbage exposed to the tracers different in concentration (1%, 3%, 5% and 10%). Results show that in all the four treatments, leaf length, leaf width, root length and yield of the plant were all increased significantly. In Treatments 3% and 5%, the tracer improved plant height, chlorophyll content ($p < 0.05$), net photosynthetic rate and transpiration rate as well. The tracer inhibited SOD (Superoxide dismutase) activity in leaves of the plant, but stimulated the activity in roots significantly ($p < 0.05$), however, its effect on POD (peroxidase) in the plant was just the opposite and its effect on CAT (catalase) activity little. In plants exposed to low concentrations of the tracers, POD activity and CAT activity both remained high in leaves and roots. The tracer also caused increase in MDA (malondialdehyde) content significantly ($p < 0.05$) in seedling leaves, but decrease in content of soluble sugar, though not significant. When higher than 5%, the tracer significantly decreased vitamin C in the plant ($p < 0.05$), but when lower than 3%, it improved quality of the plant effectively. In a word, the tracer low in concentration promotes growth of Chinese cabbage, but when high in concentration, it displays an opposite effect on the plant.

Key words Magnetic tracer of soil erosion; Chinese cabbage; Physiological characteristics; Yield; Quality