

C3, C4 植物及燃烧对土壤磁化率的影响*

吕厚远 刘东生

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘要 从现代不同植物的灰化、植物的根系和植物群落的燃烧等方面探讨了植物对土壤磁化率的影响, 发现植物特别是 C4 植物的生长对土壤磁化率有重要的贡献, 这对于探讨土壤磁化率的形成机制以及确切地解释黄土磁化率变化的气候意义无疑是非常重要的。

关键词 C3, C4 植物 燃烧 黄土 古土壤 磁化率

迄今, 对黄土-古土壤磁化率变化机制和过程的了解仍然是比较贫乏的。就中国黄土类型而言, 对古土壤磁化率增强的解释, 至少有 5 种假说: Heller 等人认为, 是风化成土过程中由于碳酸盐的淋失以及孔隙度的减少而造成磁性矿物富集的结果^[1]; Kukla 等人强调黄土和古土壤的物源区不同, 干冷期以近源物质为主, 暖湿期以远源的细颗粒物为主, 这些远源的细颗粒物中可能包含火山灰和宇宙尘等高磁化率的物质^[2]; Kletetschka 等人认为频繁的自然火灾在对土壤矿物的加热过程中, 导致强磁性矿物的形成^[3]; Zhou, Han, Maher 等人先后研究认为, 成土过程是土壤磁化率增强的主要原因^[4-6]; 贾蓉芬提出铁细菌和趋磁细菌在土壤磁化率的增强中可能有重要的贡献^[7]。在所有这些假设中都没有涉及到植物对土壤磁化率的影响, 自然土壤的形成是在绿色植物的发生、发展过程中完成的, 植物对土壤的影响是多方面的, 除了植物的物质成分返回到土壤中, 对土壤的地球化学过程有着重要的影响之外, 植物的根系在生长过程中自始至终参与土壤的发育过程, 根系的各种分泌物可以将土体矿物中 Fe, Mg 等元素活化成植物可以利用的成分, 而且根系周围包括铁磁细菌在内的微生物的数量可以比土体中细菌的数量高出 100 倍左右^[8]。特别是一些植物生理学家已经发现 C3, C4 植物从土壤中吸收铁的能力有很大的差别^[9]。本文从现代不同植物的灰化、植物的根系和植被群落的燃烧等方面探讨植物对土壤磁化率的影响, 这对于研究土壤磁化率的形成机制以及确切地解释黄土磁化率变化的气候意义无疑是非常重要的。

1 方法与材料

1.1 现代植物燃烧后产物的磁化率测试

测试共采集 23 种现代植物的 37 个样品, 包括草本植物和木本植物的叶和细枝。其中禾本科植物中 C4 植物有 8 种, C3 植物有 6 种, 木本植物都是 C3 植物。为了对比同一种植物在成熟期和生长期燃烧后产物磁化率的差异, 对个别植物成熟期和生长期的样品分别进行了测试。

2000-01-05 收稿

* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 49894170), 国家重点基础研究发展规划(批准号: G1998040800)和中国科学院“九五”重大项目(批准号: KZ951-A1-402)资助课题

所有样品都经过清洗、烘干后,分两步在通风柜中燃烧,首先是自然燃烧,一般有 40%~70% 的组分达到灰化阶段,其他组分处于碳化阶段;然后通过通风供氧和加酒精助燃,使其 90% 左右的组分达到灰化阶段,个别样品由于自然燃烧后大部分已经灰化或者燃烧后样品量较少没有再进行助燃.所有样品用 Bartington 磁化率仪进行测试(下同).

1.2 植物根系根际土及土体样品的采集与测试

植物的根际土是指受植物根系活动的影响,在物理、化学和生物学性质上不同于土体的那部分微域土区,一般离根轴表面数毫米之内.通常所说的根际土包括松粘附土(离根轴表面 1~4 mm)和紧粘附土(离根轴表面 0~2 mm)^[11].本文仔细采取了 22 个现代植物的根际土和土体的对比土样品.采样时间在 1997 年 6 月上旬,大部分植物正在生长过程中;采样地点尽可能选择在植被覆盖度比较低的地方进行,以便于在采集对比样品时避开土壤中错综复杂的植物根系.采样工作是在 3 个地点完成的: a) 斋堂黄土剖面,在木兰黄土坍塌下的堆积土上散生着当年生的蒿属、苋科等植物; b) 马兰台后山顶,基岩风化壳上散生着一些灌木和禾本科植物; c) 北京市北郊科学园,在 1996 年房基挖掘土堆积成的高低不平的地形上散生着当年生的禾本科植物.每个样品的根际土和对比土各分成两份.

1.3 植物群落燃烧后土壤磁化率样品的采集和测试

采集地点位于北京市北郊科学园内,选择几年前房基挖掘土堆积成的高冈和大片多年弃耕的土地,上面生长着大片以白茅植物为优势种含少量狗尾草、莎草科的植物群落,面积有 0.5 km² 左右.1996 年秋,作者进行了人工燃烧,燃烧面积约 250 m²,考虑到母质的差别,围绕燃烧区一周,分别在燃烧区边界内、外约 0.5 m 的距离内,采集一对燃烧后和未燃烧过的表层土壤样品,共采集 10 组 20 个样品.

1.4 地层样品

选择长武剖面 L1 和 S1 地层样品,分别作成两个成形的土块(约 25 cm×10 cm×5 cm 大小),其中一组样品(L1, S1 地层样品)一端用木炭火充分燃烧,另一端避开火焰,充分加热的一端使其变成红烧土状,最红处呈现砖红色,向另一端红色逐渐减弱,避开火焰的一端颜色没有变化,刮去表层可能黏附的灰烬,然后从加热的一端按 0.3~0.5 cm 间距取样,测量磁化率的变化.另一组样品利用 1 500 W 的电炉对样品一端加热(3.5 h)进行加热对比实验.

2 结果

(1) 所采集的用于灰化的 23 种植物分别是: *Buchloe dactyoides*(野牛草), *Setaria viridis*(狗尾草), *Imperata cylindrica*(白茅), *Chloris virgata*(虎尾草), *Zea mays*(玉米), *Eragrostis pilosa*(画眉草), *Echinochloa crusgalli*(稗), *Cynodon dactylon*(狗牙根), *Roegneria kamoji*(鹅观草), *Triticum aestivum*(小麦), *Phragmites australis*(芦苇), *Oryza sativa*(水稻), *Pleioblastus amarus*(苦竹), *Poa annua*(早熟禾), *Cyperus* sp.(莎草属), *Artemisia* sp.(蒿属), *Brassica campestris*(油菜), *Amaranthus* sp.(苋属), *Populus* sp.(杨属), *Salix* sp.(柳属), *Ulmus* sp.(榆属), *Melia* sp.(楝属), *Pinus* sp.(松属). 表 1 为 37 个样品燃烧后磁化率的测量结果,在禾本科的 8 种 C4 植物 13 个样品中,自然燃烧和完全灰化样品平均磁化率为 $370 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 左右,其中 4 个完全灰化的样品磁化率平均达到 $532 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. 5 个成熟植物样品自然燃烧后的磁化率为 $376 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 4 个未成熟的正在生长的植物样品(如玉米植物采用的是高 10~20 cm 的幼苗)自然燃烧后磁化率

值仍然达到 $200 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$. 成熟的狗尾草比未成熟的狗尾草样品磁化率高一倍左右. 在禾本科的 6 个 C3 植物 9 个样品中, 自然燃烧和完全灰化样品平均磁化率为 $88 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 左右, 其中 4 个完全灰化的样品磁化率平均达到 $122 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$. 5 个自然燃烧后样品的磁化率只有 $61 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$. 其他草本植物中除莎草科植物自然燃烧后的磁化率大于 $100 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 以外, 其余平均在 $70 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 左右. 在其他 11 个包括木本植物在内的 C3 植物样品中(所有的木本植物都是 C3 植物)平均磁化率为 $66 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 左右. 在木本植物中, 植物叶的磁化率普遍比细枝的磁化率高. 可以看出成熟的 C4 植物自然燃烧后的磁化率要比 C3 植物自然燃烧后的磁化率高出 5~6 倍以上. 图 1 为不同植物类型燃烧后的磁化率平均值.

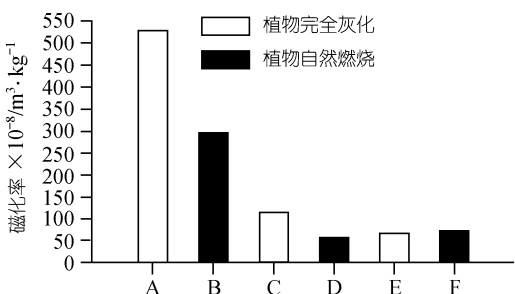


图 1 不同植物燃烧后的磁化率平均值
A. C4 草本植物完全灰化, B. C4 草本植物自然燃烧, C. C3 草本植物完全灰化, D. C3 草本植物自然燃烧, E. C3 木本植物完全灰化, F. C3 木本植物自然燃烧

表 1 现代植物样品燃烧后磁化率的测量结果

植物名	燃烧程度	低频磁化率	高频磁化率	低频-高频	频率磁化率	光合作用途径
		$\times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$			
野牛草	自然燃烧	446.6	415.6	31.0	7.0	C4
野牛草	完全灰化	565.7	531.4	34.3	6.1	C4
狗尾草	自然燃烧	455.5	416.7	38.8	8.5	C4
狗尾草	完全灰化	506.1	470.8	35.3	7.0	C4
狗尾草(未成熟)	自然燃烧	224	208.0	16.0	7.1	C4
白茅	自然燃烧	503.3	466.7	36.6	7.3	C4
白茅	完全灰化	596	548.0	48.0	8.1	C4
虎尾草(未成熟)	自然燃烧	217.7	201.6	16.1	7.4	C4
玉米(未成熟)	自然燃烧	202	182.0	20.0	9.9	C4
画眉草	自然燃烧	280	260.0	20.0	7.1	C4
稗(未成熟)	自然燃烧	157.1	142.9	14.2	9.1	C4
狗牙根	自然燃烧	192.7	178.2	14.5	7.5	C4
狗牙根	完全灰化	458.6	424.0	34.6	7.6	C4
鹅观草	自然燃烧	78	72.0	6.0	7.7	C3
鹅观草	完全灰化	111.6	105.0	6.6	5.9	C3
小麦	自然燃烧	52	52.0	0.0	0.0	C3
小麦	完全灰化	185.7	171.4	14.3	7.7	C3
芦苇	自然燃烧	36.6	30.0	6.6	18.0	C3
水稻	完全灰化	73.3	68.9	4.4	6.0	C3
苦竹	自然燃烧	66.6	62.2	4.4	6.6	C3
苦竹	完全灰化	117.5	110.0	7.5	6.4	C3
早熟禾	自然燃烧	72.7	65.5	7.2	10.0	C3
莎草属(未定种)	自然燃烧	116	108.0	8.0	6.9	?
莎草属(未定种)	完全灰化	259	240.9	18.1	7.0	?
蒿属(未定种)	自然燃烧	85.2	80.7	4.5	5.3	?
蒿属(未定种)	完全灰化	90	84.0	6.0	6.7	?
油菜	自然燃烧	70	71.7	-1.7	-2.4	C3
苋属(未定种)	自然燃烧	29.2	31.7	-2.5	-8.6	?
杨属(未定种)叶	自然燃烧	128.5	121.4	7.1	5.5	C3

表 1(续)

植物名	燃烧程度	低频磁化率 $\times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	高频磁化率 $\times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	低频-高频	频率磁化率	光合作用途径
杨属(未定种)细枝	自然燃烧	122.8	114.3	8.5	6.9	C3
柳属(未定种)叶	自然燃烧	31.9	27.7	4.2	13.3	C3
柳属(未定种)叶	完全灰化	81.8	78.2	3.6	4.4	C3
柳属(未定种)细枝	完全灰化	51.9	50.0	1.9	3.7	C3
榆属(未定种)叶	自然燃烧	93.5	87.1	6.4	6.8	C3
榆属(未定种)细枝	自然燃烧	72.2	61.1	11.1	15.4	C3
楝属(未定种)木炭	自然燃烧	12.5	12.5	0.0	0.0	C3
松属(未定种)木炭	自然燃烧	32.8	30.0	2.8	0.0	C3

(2) 所采集的 23 个植物根际土样品分属于 *Cyperus* sp.(莎草属), *Roegneria turczaninovii*(直穗鹅观草), *Setaria viridis*(狗尾草), *Artemisia* sp.(蒿属), *Miscanthus sinensis*(芒), *Amaranthus* sp.(苋属), *Poa annua*(早熟禾)等植物. 表 2 是 22 组对比样品的磁化率以及根际土磁化率相对根际外土体磁化率增加的情况. 图 2 为 23 个现代植物样品的根际土和根际外土的磁化率对比图.

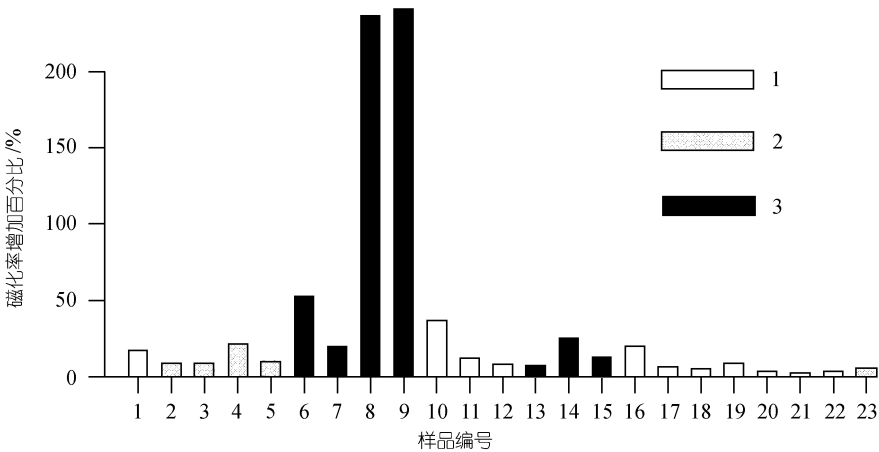


图 2 23 个现代植物样品的根际土相对根际外土的磁化率增加的百分比
1. 光合作用途径未定植物, 2. C3 植物, 3. C4 植物

所以根际土样品相对根际外土体的磁化率都有不同程度的增加, 从增加 2%~241%, 变化幅度较大, 平均增加 33%左右. 根据双因子交互方差分析结果, 无论是植物类型和土壤母质因素(由于植物取自不同的土壤, 难以单独提取植物类型因素), 还是根系因素对磁化率的影响都是非常显著的. 根系因素的 F 值 = 90.04, 远大于 $F(1, 46) = 4.05$. 说明根系因素非常显著地影响了磁化率的大小.

由于许多植物种名的鉴定, 需要参考植物生殖器官(如: 花和果实)的形态特征, 个别植物(如: *Cyperus* sp., *Artemisia* sp. 等)因采样季节的限止暂定到属, 并且 *Cyperus* sp., *Artemisia* sp. 等植物中既有 C3 植物也有 C4 植物^[12], 现仅就光合作用途径已经明确的 *Roegneria turczaninovi*, *Poa annua* 5 个 C3 植物样品和 *Setaria viridis*, *Miscanthus sinensis* 7 个 C4 植物样品根际土磁化率增加的情况看, C3 植物根际土磁化率平均相对增加 10.2%, 而 C4 植物根际土磁化率平均相对增加 85.2%(表 2, 图 2). 但需要指出的是, 作为 C4 植物的第 8, 9 号样品(表 2, 图 2), 采自马兰台后山顶基岩风化壳上, 土壤母质较粗, 尽管根际外土用 0.5 mm 的筛网筛过, 但大量的粗颗粒岩屑可能降低了根际外土的磁化率值.

表 2 不同植物根际土、根际外土体样品磁化率分布

样品		根际土样品						根际外土体样品						磁化率相对增加 /%	
		样品 1		样品 2		平均		样品 1		样品 2		平均			
植物种类	编号	低频	高频	低频	高频	低频	高频	低频	高频	低频	高频	低频	高频	低频	高频
莎草属	1	45.0	40.7	42.0	40.7	43.5	40.7	34.8	34.8	39.3	37.9	37.1	36.3	17.4	11.9
直穗鹅观草(1)	2	159.2	151.3	169.2	161.7	164.2	156.5	147.5	141.8	157.1	150.8	152.3	146.3	7.8	7.0
直穗鹅观草(2)	3	199.3	190.8	187.5	178.8	193.4	184.8	177.9	170.3	179.6	172.1	178.8	171.2	8.2	7.9
直穗鹅观草(3)	4	223.3	206.7	219.4	211.1	221.4	208.9	192.3	178.1	174.9	167.4	183.6	172.7	20.6	20.9
直穗鹅观草(4)	5	226.7	218.5	195.5	186.5	211.1	202.5	195.4	187.7	188.5	181.8	191.9	184.7	10.0	9.6
狗尾草(1)	6	60.0	57.5	50.0	45.7	55.0	51.6	36.6	35.4	35.6	33.3	36.1	34.4	52.5	50.1
狗尾草(2)	7	44.0	43.0	38.5	36.9	41.2	40.0	35.0	33.8	33.8	33.8	34.4	33.8	19.9	18.4
狗尾草(3)	8	42.9	40.6	45.0	40.0	44.0	40.3	13.1	12.0	12.9	11.8	13.0	11.9	237.1	239.1
狗尾草(4)	9	36.7	35.0	33.8	30.8	35.3	32.9	10.2	9.6	10.5	10.5	10.3	10.0	241.7	227.7
蒿属(1)	10	74.2	70.3	74.2	69.2	74.2	69.8	54.5	52.6	54.0	51.3	54.3	52.0	36.7	34.2
蒿属(2)	11	58.1	56.1	63.8	61.0	60.9	58.6	52.1	50.0	56.6	54.5	54.3	52.2	12.2	12.1
蒿属(3)	12	64.4	61.9	64.8	61.4	64.6	61.6	57.3	56.0	62.1	58.6	59.7	57.3	8.2	7.5
芒(1)	13	105.0	98.6	97.3	92.5	101.1	95.5	92.3	87.8	96.2	90.8	94.3	89.3	7.3	7.0
芒(2)	14	122.4	115.2	132.5	125.0	127.5	120.1	103.2	100.0	100.0	98.3	101.6	99.2	25.4	21.1
芒(3)	15	120.5	113.4	122.7	115.5	121.6	114.4	96.7	93.5	119.2	118.4	108.0	105.9	12.6	8.0
菎属(1)	16	63.2	58.9	64.6	60.0	63.9	59.5	54.2	52.1	52.3	52.3	53.2	52.2	20.0	13.9
菎属(2)	17	48.5	46.7	47.6	45.9	48.0	46.3	45.7	43.9	44.6	42.6	45.1	43.2	6.4	7.1
菎属(3)	18	49.3	48.6	49.4	47.7	49.4	48.1	47.2	46.5	46.5	45.9	46.8	46.2	5.4	4.2
菎属(4)	19	48.9	47.2	50.7	47.8	49.8	47.5	46.9	45.1	44.8	44.8	45.8	45.0	8.7	5.6
菎属(5)	20	49.3	47.2	47.3	46.0	48.3	46.6	46.5	45.1	47.1	45.0	46.8	45.1	3.2	3.4
菎属(6)	21	53.8	51.3	45.3	44.2	49.5	47.7	49.3	48.0	47.7	47.7	48.5	47.8	2.1	-3
菎属(7)	22	49.4	49.4	49.5	47.7	49.5	48.6	48.8	47.5	46.7	45.8	47.7	46.6	3.7	4.1
早熟禾(1)	23	150.4	136.3	132.3	123.4	141.4	129.8	139.3	130.0	130.9	121.2	135.1	125.6	4.6	3.4

(3) 在进行植被群落燃烧实验时, 由于所选择的主要是以 C4 植物白茅为优势种的群落, 燃烧后土壤的磁化率普遍增加(25%~174%), 可能由于地形、母质或土壤中积存的灰烬含量不同, 磁化率增加的范围变化较大, 平均增加幅度在 73%左右(表 3, 图 3).

表 3 植物群落燃烧后对土壤磁化率的影响结果^{a)}

样号	燃烧样品		样号	未燃烧样品		燃烧样品磁化率增加百分比	
	低频磁化率 $\times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	高频磁化率 $\times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$		低频磁化率 $\times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	高频磁化率 $\times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	低频磁化率/%	高频磁化率/%
1a	143.9	138.3	1b	94.0	90.1	53.0	53.6
2a	86.9	83.7	2b	69.4	67.9	25.3	23.3
3a	142.1	134.3	3b	76.5	72.2	85.7	85.9
4a	128.9	121.9	4b	92.9	87.2	38.8	39.7
5a	106.9	102.6	5b	68.5	65.7	55.9	56.1
6a	165.4	157.5	6b	123.8	121.0	33.6	30.2
7a	149.1	141.0	7b	91.0	86.5	63.8	62.9
8a	212.7	203.6	8b	77.5	69.2	174.2	194.4
9a	164.5	156.7	9b	79.8	76.3	106.1	105.3
10a	148.0	142.0	10b	75.9	74.4	94.8	90.8

a. 燃烧区样品, b. 燃烧区外对比样品

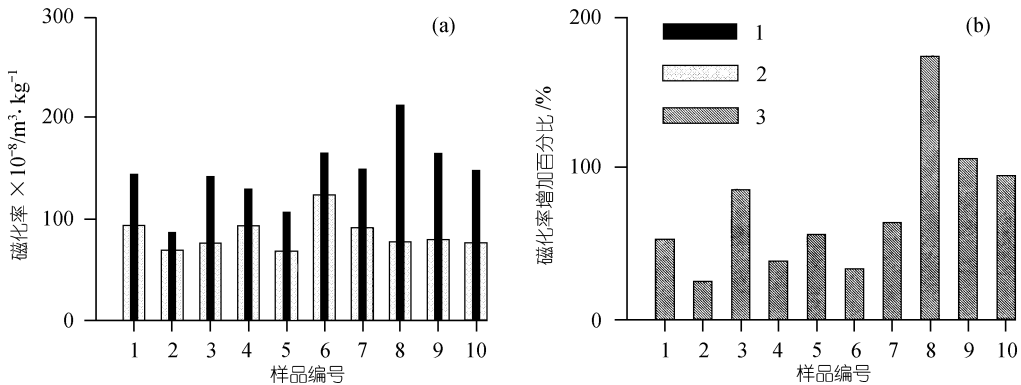


图 3 现代植被燃烧后土壤磁化率的变化

(a) 现代植被燃烧前、后的土壤磁化率; (b) 植被燃烧后相对燃烧前土壤磁化率增加的百分比. 1. 燃烧后的土壤, 2. 未燃烧的土壤, 3. 植被燃烧后土壤磁化率增加的百分比

(4) 由于植物燃烧后物质具有很高的磁化率, 燃烧后土壤磁化率的增加一定有植物燃烧物质的贡献, 但土壤矿物成分在燃烧后是否发生了有利于磁化率增强的变化, 在剖面中磁化率变化的趋势如何, 作者就这一问题特别选择了长武剖面的 L1, S1 两个地层的样品, 模拟自然燃烧的最强过程, 使样品的一端烧成砖红色, 对加热程度不同的部位以 0.3~0.5 cm 的间距取样, 测量磁化率的变化. 未燃烧加热的 L1 样品的磁化率为 $86.7 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, S1 样品的磁化率为 $163.6 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$. 随着加热强度的减弱, 这两个样品有相同变化趋势, 在加热最强的部位(最顶端 2 mm)磁化率值都大幅度降低, 然后急剧升高, 在 1 cm 左右的部位, 有一个下降的谷, 随后经过几次波动, 缓慢下降到和未加热样品磁化率相同的幅度(表 4, 图 4). 在 L1 样品中, 所有加热样品的磁化率平均值为 $96.38 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, 相对未加热样品磁化率增加了 11.6%; 在 S1 样品中, 所有加热样品的磁化率平均值为 $189.9 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, 相对未加热样品磁化率增加了 16%. 从前面植物燃烧后灰烬加入的土壤磁化率增加 70% 的幅度可以看出, 燃烧物质的加入是燃烧

土壤磁化率增加的重要因素。利用 1 500 W 的电炉加热对比样品的实验结果是一致的。

表 4 模拟自然燃烧后长武剖面 L1, S1 样品磁化率变化^{a)}

L1 样品			S1 样品		
厚度/cm	重量/g	低频磁化率 ×10 ⁻⁸ /m ³ ·kg ⁻¹	厚度/cm	重量/g	低频磁化率 ×10 ⁻⁸ /m ³ ·kg ⁻¹
0.2	4.5	73.3	0.2	5.9	128.8
0.5	10.75	92.1	0.6	10	197.0
0.8	12.3	98.4	1	11.2	205.4
1.2	17.1	100.0	1.4	11.9	201.7
1.6	15.9	98.1	1.8	10.5	193.3
2	14.7	98.0	2.2	11	189.1
2.4	19.9	94.5	2.6	16	191.3
2.8	12.5	100.0	3	12.2	194.3
3.2	14.55	100.3	3.4	11.6	194.8
3.6	15.5	100.0	3.8	12.15	195.9
4	18.7	100.0	4.2	11.2	196.4
4.4	20.7	96.6	4.6	15	198.0
4.8	16	98.8	5	17.3	196.5
5.2	15.9	98.7	5.4	12.3	192.7
5.6	17	95.3	5.8	11.7	193.2
6	17.3	97.7	6.2	10.94	189.0
6.4	16.2	96.9	6.6	15.8	192.4
6.8	14	97.1	7	13.8	188.4
7.2	12	97.5	7.4	13.8	187.0
7.6	10.4	95.2	7.8	13.8	185.5
8	13.3	95.5	8.2	12.5	188.8
15	18	86.7	8.6	16	178.8
			15	13.45	163.6

a) 最下部的样品基本上没有加热

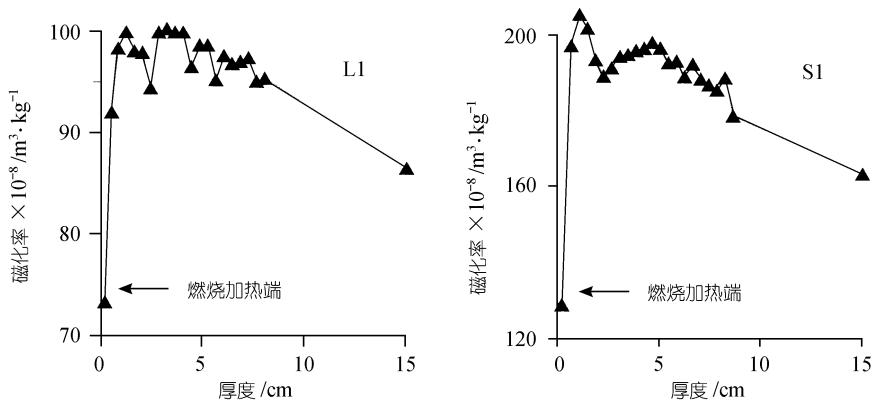


图 4 模拟自然燃烧对长武剖面 L1, S1 样品磁化率变化的影响

3 讨论

(1) 早在 1974 年, Dickinson 就报道了植物以 Fe^{2+} 形式从土壤中获取一定量的铁, 而且在植物的腐烂过程中可以释放和浓缩铁的氧化物, 绝大多数从植物中释放出的铁氧化物的颗粒直径在 $0.1\sim1.0\text{ }\mu\text{m}$ ^[12], 类似于细菌起源的磁铁矿、磁赤铁矿的粒度, 这是植物燃烧或腐烂后能够

产生磁性的基础. 不同植物中铁的含量变化比较大, 即使在相同的土壤条件下, 不同植物中的铁的含量是不同的. 大部分植物的含铁量在 100~700 mg/kg 左右, 含铁量的多少可能是植物灰炆磁化率高低的物质基础. Smith 等利用营养液培养方法详细研究了不同植物对铁的需求量, 发现 C4 植物在生长过程中相对 C3 植物需要更多的铁才能达到最佳的生长状态^[9]. 本文的研究结果表明 C4 植物的灰炆比 C3 植物的灰炆磁化率高出 5~6 倍以上, 也说明了植物光合作用途径的不同可能是造成 C4, C3 植物灰炆磁化率差异的重要因素. 植物叶中铁的含量与叶绿体的含量有很好的相关性, 在植物叶中 80% 的铁定位在叶绿体中, 铁是光合作用必需的元素, 铁以质体间质中植物铁蛋白的形式储集在这类细胞中, 这是一个能够容纳 5 000 个铁原子的(铁的含量为干重的 12%~23%)的空壳, 其建议的分子式为 $(\text{FeO} \cdot \text{OH})_8 \cdot (\text{FePO} \cdot \text{OPO}_3\text{H}_3)$, 并经常以已确定的晶体形式存在^[8,10]. 最近 Meng 发现夏季中国北方降尘中富含植物残体的样品比冬春季降尘样品的磁化率高, 并对一个植物样品进行氧化实验, 发现氧化后的样品磁化率有明显增高^[13]. 本文系统地研究了不同植物燃烧后磁化率的变化, 发现植物特别是 C4 植物的灰炆具有很高的磁化率值, C4 植物燃烧或腐烂后将会对土壤磁性产生重要的贡献.

(2) 不同类型的植物根系入土的深度是不同的, 如禾本科草根系的主体部分一般集中在 12~30 cm 的深度, 在特别干旱的地区禾本科草根系可以达到数米. 植物根系对土壤的影响是多方面的, 其最显著的特征是根系可以提供 H^+ , HCO_3^{2-} 等, 改变根系周围的 pH 值; 消耗和释放 O_2 , 引起氧化还原电位的变动; 能够活化土体中 Fe, Mg, Cu 等元素变为植物可以利用的成分. 如禾本科植物可以大量分泌铁载体(Phytosiderophore)活化矿物中的铁^[8,10], 可能为原来没有磁性的铁转变为亚铁磁性矿物提供了机会. 根系的多种分泌物和分解物为根际周围的微生物提供养分, 植物根系周围孕育了高密度的微生物群落(如磷细菌、钾细菌、铁细菌等), 其含量高出土体中 10~100 倍左右, 这些微生物本身所具有的磁性, 也可能是根际土磁化率增加的重要因素之一.

廖宗文曾研究了我国南方几种不同土壤中植物根际土和非根际土活性 Fe 含量的差别, 发现在赤红壤中根际土活性铁的含量为 2.115 (Fe) mg/kg, 非根际土中活性铁的含量为 1.626 (Fe) mg/kg^[14]. 张西科通过营养液培养方法研究了水稻根表铁膜的变化, 当营养液中 Fe^{2+} 浓度为 30 mg/L, 根表铁膜(Fe)数量达到 24 570 mg/L^[15], 说明植物根系对铁的富集和利用是非常明显的. 由于在相同的条件下, C4 植物相对 C3 植物具有更强的利用根系富集和吸收 Fe 的能力^[9], 这可能是 C4 植物相对 C3 植物根际土磁化率高的原因.

可以看出, 无论是植物的燃烧或腐烂还是根系的生长过程, 都会对土壤磁化率产生重要的贡献, 目前还没有严格的测试结果证明植物在土壤磁化率增强中占有多大的比例, 我们不妨粗略地根据黄土高原地区黄土沉积速率($10.61 \text{ g/cm}^2 \cdot 1\,000\text{a}$)^[16]和草原地区干草产量 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ kg/ha} \cdot \text{a}$ ^[17]计算, 按干草的灰份含量 15%、平均磁化率 $300 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 考虑, 一个以黄土母质(磁化率 $30 \sim 40 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)发育的土壤如果磁化率达到 $150 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 植物的贡献可以达到 30%~50%左右. 从现代我国西北地区表土磁化率分析中也可以发现, 一旦表土有植被发育其磁化率则快速增加, 除了植物本身对土壤磁化率的贡献外, 植物根系、土壤中的细菌以及季节性干湿变化的气候条件都会对土壤磁性的增强产生贡献.

但不同的植被类型对土壤磁性的贡献是不同的, 例如我国东北地区无论是土壤的有机质还是草原植物的生产量都比黄土高原地区大得多, 但东北地区现代土壤的磁化率却比黄土高

原现代土壤低. 一个可能的因素是植物光合作用途径的差异造成的, 在我国寒温带地区 C4 植物占全国 C4 植物总数的比例为 13.3%~14.3%, 向南随温度的升高 C4 植物的比例逐渐增加, 在中亚热带地区 C4 植物的比例达到最大为 61.1%, 向南 C4 植物的比例又逐渐减少^[18]. 我国现代代表土哑铃型硅酸体的分布明确地再现了 C4 植物的这种分布规律, 哑铃型硅酸体是 C4 植物的典型代表^[19], 其含量随着年降水量和年均温度的增高而增高, 但在年降水量超过 1 100 mm 和年均温度超过 12~14℃的范围, 哑铃型硅酸体的含量反而下降(图 5). 这与我国现代代表土磁化率随年降水量和年均温度的增高而增高, 但在年降水量超过 1 100 mm 和年均温度超过 15℃的范围, 又随年降水量和年均温度的增高而降低^[20]的规律是非常吻合的. C4 植物以及 C4 植物分布规律与土壤磁化率变化的密切关系, 为我们充分认识中国黄土磁化率变化的气候意义和环境特点具有重要的参考依据.

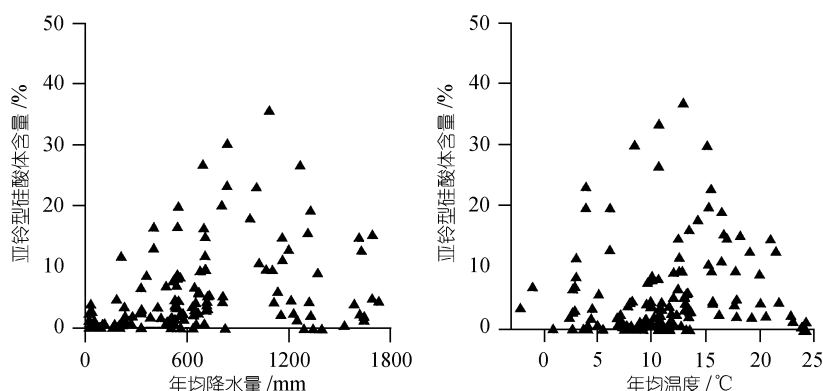


图5 我国现代土壤中哑铃型植物硅酸体含量随年降水量和年均温度的变化

(3) 植物群落燃烧对磁化率的影响, 表现在两个方面: 一是植物灰烬磁化率对土壤的贡献, 二是土壤本身在高温条件下, 磁性矿物的转化, 造成磁化率的变化. 由于不同的植物群落燃烧后的磁化率差别较大, 显然不同植物群落火灾对土壤磁化率的贡献是不同的, 在相对干热的环境中生长的以 C4 植物群落为主的植被发生火灾后, 土壤的磁化率将会明显增加. 在土壤内部, 当温度达到 200℃以上, 会发生非亚铁磁性矿物向亚铁磁性矿物转变. 如 γ -FeOOH 在 275~410℃之间, 变化为磁赤铁矿, 磁化率增高, 如果温度继续增加, 将会变化为磁化率较低的赤铁矿. 因此不同的植物群落组成和火灾时的温度都将会对土壤磁化率产生不同的影响.

4 结论

植物对土壤磁化率的直接影响至少有 3 个方面: 1) 植物本身所含有的铁, 在植物的分解、腐烂或燃烧过程中转化成具有强磁性的亚铁磁性矿物, 从而增强了土壤的磁性, 适应温暖干燥环境的 C4 植物群落比适应湿润环境的 C3 草本植物群落对土壤磁性的贡献要大得多. 植物的这种差异可能与它们的光合作用途径有关. 在黄土高原地区, 植物对发育“成熟”的草原土壤磁化率增强的贡献有可能达到 30%~50%左右. 2) 植物在生长过程中, 根系的生理活动可以提供多种分泌物和分解物, 改变根系周围的 pH 值; 消耗和释放 O_2 引起氧化还原电位的变动, 活化矿物中的铁, 在根系周围常形成富含铁氧化物的外套, 为原来没有磁性的铁转变为亚铁磁性矿物提供了可能和证据. 3) 植物根系的多种分泌物和分解物还可以为根际周围的微生物

提供养分,植物根系周围孕育了高密度的微生物群落(如磷细菌、钾细菌、铁细菌等),其含量高出土体中 10~100 倍左右,其中趋磁细菌本身所具有的磁性,可能是根际土磁化率增加的重要因素之一。

自然灾害对土壤磁化率增加的贡献主要来自植物残体或灰烬的加入。C4 植物以及 C4 植物分布规律与土壤磁化率变化有着密切关系,除了 C4 植物本身对土壤磁化率的贡献以外,目前不能排除 C4 植物所生长的气候环境也适合土壤化过程中非植物因素促使土壤磁化率增加的可能。植物生长是土壤发育的充分和必要条件,但在目前研究土壤磁性增强的各种工作中,还没有植物生长对土壤磁化率产生影响的报道。本项工作的初步结果显示了植物特别是 C4 植物的存在对土壤磁性的增强是显著的,从另一个方面也支持了土壤磁性增强是在成土过程中完成的,为我们充分认识中国黄土磁化率变化的气候意义和环境特点具有重要的参考依据。由于本文所采集的样品数量限制以及采集地点多少可能受到人类活动的影响,对植物生长对土壤磁化率影响的研究仍需要选择自然植物群落的样品做详细的工作。同时还需对植物根际土和植物灰烬中的矿物组合的变化做系统的分析,相信黄土-古土壤磁化率变化的气候意义将会在现代成土过程的研究中得到越来越多的证据。

致谢 韩家懋研究员、周力平博士、顾兆炎和吴乃琴副研究员等在本文的研究过程中提供了许多有益的建议和宝贵的资料,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits. *Journal of the Royal Astronomical Society*, 1984, 77: 125~141
- 2 Kukla G, An Z S. Loess stratigraphy in central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 72: 203~225
- 3 Kletetschka G, Banerjee S K. Magnetic stratigraphy of Chinese loess as a record of natural fires. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22: 1341~1343
- 4 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 364: 737~739
- 5 Han J M. Palaeoclimatic impact on the magnetic and stable isotopic characteristics of the Chinese loess. Ph D Thesis, Vrije Universiteit Brussel, 1991, 190~191
- 6 Maher B A. Magnetic properties of modern soil and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 137: 25~54
- 7 贾蓉芬, 颜备战, 李荣森, 等. 陕西段家坡黄土剖面中趋磁细菌特征与环境意义. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(5): 411~416
- 8 陆景陵. 植物营养学. 北京: 北京农业大学出版社, 1994. 92~110.
- 9 Smith G S, Cornforth I S, Henderson H V. Iron requirements of C3 and C4 plants. *New Phytol*, 1984, 97: 543~556
- 10 马斯纳著(曹一平译). 高等植物的矿质营养. 北京: 北京农业大学出版社, 1991. 270~327
- 11 殷立娟, 王 萍. 中国东北草原植物中的 C3 和 C4 光合作用途径. *生态学报*, 1997, 17(2): 113~123
- 12 Dickinson C H. Decomposition of litter in soil. In Dickinson C H, Pugh G J F, eds. *Biology of Plant Litter Decomposition*. London: Academic Press, 1974. 633~658
- 13 Meng X M, Derbyshire E, Kemp R A. Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese loess. *Quaternary Science Reviews*, 1997, 16: 833~839
- 14 廖宗文, 林东教. 不同母质红壤稻田的铁锰状况与水稻生长. 见: 陆景冈主编. *土壤地质*. 北京: 地质出版社, 1994. 167~171

- 15 张西科, 张福锁, 毛达如. 水稻根表铁氧化物胶膜对水稻吸收磷的影响. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 295~299
- 16 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 330~335
- 17 北京农业大学主编. 草地学. 北京: 农业出版社, 1982. 264~266
- 18 殷立娟, 李美荣. 中国 C4 植物的地理分布与生态学研究, I. 中国 C4 植物及其与气候环境的关系. 生态学报, 1997, 17(4): 350~363
- 19 吴乃琴, 吕厚远, 聂高众, 等. C3, C4 植物及其硅酸体研究的古生态意义. 第四纪研究, 1992, 3: 241~251
- 20 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. 中国科学, D 辑, 1994, 24(12): 1290~1297