

土壤养分对作物茎叶稳定碳同位素组成 和生物产量的影响

赵良菊¹⁾ 刘晓宏²⁾ 肖洪浪¹⁾ 郭天文³⁾

515 A

(1)中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州,730000;2)中国科学院地理科学与资源研究所,
北京,100101;3)甘肃省农业科学院土壤肥料研究所,甘肃 兰州,730000)

摘 要 在盆栽条件下,对甘肃省河西地区 3 个灌漠土的养分限制因子进行了研究,并在此基础上对高粱茎叶组织稳定 C 同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)和生物产量进行了比较分析。3 种土壤的养分限制因子分别为:金昌小井子农场土壤为 P、N、Mn、Zn,各元素缺乏程度为 $\text{P} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{N}$;武威湖里土壤为 $\text{P} > \text{N}$;武威白云土壤为 $\text{N} > \text{Zn} > \text{Mn}$ 。作物茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化规律为:3 种土壤的最佳处理(OPT)的作物茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值均高于各自的其余处理,小井子农场、武威湖里及武威白云作物茎叶组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -12.0‰ 、 -12.3‰ 及 -12.3‰ ,与不施肥条件(CK)相比作物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加幅度分别为 16.63%、17.15% 和 13.17%。在所有减元素处理中,作物茎叶组织 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其对应的生物产量表现为相同的变化趋势,在最佳处理中,土壤养分充足、作物生长状况良好,因而作物茎叶组织 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高,而在所有减元素处理中,由于减元素使得其处理的营养不足影响作物生长,进而引起作物茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降低。小井子农场土壤的高粱茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值 - N 及 - P 处理分别为 -13.8‰ 及 -13.7‰ ,武威湖里 - P 处理为 -14.8‰ ,居最低,武威白云 - N 及 - Zn 分别为 -13.4‰ 及 -13.3‰ 。在加元素处理中,3 种土壤的高粱茎叶组织 $\delta^{13}\text{C}$ 和生物产量的关系较为复杂。

关键词 土壤营养水平 $\delta^{13}\text{C}$ 高粱 生物产量

The Effect of Soil Nutrients on Crop Organism $\delta^{13}\text{C}$ and Biomass

ZHAO Liangju¹⁾ LIU Xiaohong²⁾ XIAO Honglang¹⁾ GUO Tianwen³⁾

(1)Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, Gansu, 730000;2)Institute of Geographic Science and Resources, CAS, Beijing, 100101;3)Institute of Soil and Fertilizer, Gansu Agricultural Academy, Lanzhou, Gansu, 730000)

Abstract Using the data obtained from experiments conducted in pots, the authors analyzed the conditions of soil nutrient and the relationship between the carbon isotope discrimination in crop and the crop biomass under the condition of different soil nutrient contents. The research has reached the follow conclusions: The nutrient limitation factors are P, N, Mn and Zn, and the order of nutrient deficiency is $\text{P} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{N}$ in Xiaojingzi farm soil in Jinchang. P and N fertilizers make up the limitation factors in Huli soil in Wuwei. In Baiyun soil of Wuwei, N, Zn and Mn are the limitation factors, with the order being $\text{N} > \text{Zn} > \text{Mn}$. The variations of $\delta^{13}\text{C}$ values of sorghum leaf and stem in three sorts of soils are as follows: compared with other treatments in these soils, the $\delta^{13}\text{C}$ values of OPT treatments are all the highest. The $\delta^{13}\text{C}$ values of sorghum in Xiaojingzi farm, Huli and Baiyu are -12.016‰ , -12.26‰ and -12.305‰ , respectively. These data suggest that under the optimal nutrient condition the plant grows sufficiently and the $\delta^{13}\text{C}$ is highest among all treatments. Among all the non-added ample nutrient treatments, the biomasses are dropping with the decreasing $\delta^{13}\text{C}$ values, and it seems that nutrient deficiency leads to the decrease of the crop biomass and the $\delta^{13}\text{C}$ values. In added treatments, the connection between crop biomass and carbon isotope discrimination is complex.

Key words $\delta^{13}\text{C}$ soil nutrient sorghum biomass

本文由国家“十五”科技攻关计划(2002BA517A11)、PPIC 北京办事处 NMS 基金及中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室开放基金资助。

责任编辑:宫月萱。

第一作者:赵良菊,女,1972 年生,从事土壤养分和水分循环研究。

作物所必需的营养元素分为大、中及微量元素。这些元素对作物的生长发育都是同等重要而不可缺少的,它们各自所起的作用不能相互代替。作物产量的高低受供给作物最少的养分所决定(最小养分率),在一定程度上,作物产量随这种元素的增减而相应增减,只有增加最小养分的供应量,作物产量才能提高,因此确定土壤养分限制因子,进行平衡施肥是必要的和可行的。

植物生长是通过光合作用固定大气中的 CO_2 以合成自身的组成物质。大气中的 CO_2 相对富集 ^{13}C ,而植物通过光合作用合成的有机化合物中富集 ^{12}C ,这表明植物在吸收同化 CO_2 进行光合作用的过程中发生了同位素分馏。此分馏作用既受遗传因素控制,也直接或间接地受植物生长时期的环境状况的影响(李相博等,1998)。利用作物稳定 C 同位素变化差异来研究作物光合作用及物质代谢等生理活动特征及环境因素对作物的影响作用,已经成为一个重要的指标和手段(Condon 等,1987,1990;林植芳,1990;梁银雨等,2000)。大量研究认为,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与营养元素状况之间存在密切关系(郭卫东等,2002;冯虎元等,2000)。梯牧草(*Phleum-pratense*) 在 N、K 肥充足的环境中生长时的 $\delta^{13}\text{C}$ 比 N、K 亏缺时的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高(O'leary, 1981)。Körner 等

(1991)发现植物稳定 C 同位素与叶氮浓度正相关。有关 CO_2 压力、 O_2 分压、温度、光照、湿度等影响植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和组成的研究报道较多(O'leary, 1981; Francey 等, 1982; Fraquhar 等, 1989; Stuiver 等, 1987; Zimmerman 等, 1990; Saurer 等, 1995),但是土壤营养元素水平与作物稳定 C 同位素关系在国内研究报道还很少。为此,研究中对土壤不同营养条件下高粱生物产量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间关系进行了分析,以期为农业生产管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集、制备和分析

此次研究的温室盆栽试验在甘肃省农业科学院土壤肥料土壤研究所温室进行。供试土壤为灌漠土,分别采集于金昌市小井子农场、武威湖里土壤、武威白云土壤。利用多点取样采集耕层(0~20 cm)土样 70 kg。土样风干混匀后过 2 mm 筛,各取出 1.0 kg 由中国农业科学院土壤研究所中-加合作土壤植物实验室按 ASI 法进行常规分析、吸附研究(金继运,1992)。根据室内分析结果与各元素养分亏缺临界值,确定所需元素的加入量。供试土壤基本理化性状及推荐加入量见表 1。

表 1 供试土壤营养元素含量及温室盆栽养分推荐加入量

Table 1 Content of nutrient elements of soil and recommend nutrient added amount to green-house experiment

样品名称	项目	pH	OM	K	N	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
小井子农场	测定值	8.1	0.35	296.3	18.9	10.2	184.7	14.65	1.1	2	3.8	1
	加入量	—	—	—	50	247	0	0	5.5	20	32.1	12
武威湖里	测定值	8	0.4	62.6	18.5	12.3	46	1.6	3.2	9.3	11.5	0.9
	加入量	—	—	171.9	50	50.4	0	0	0	20	41.6	8
武威白云	测定值	8	0.58	132.9	27.1	18	43.8	1.26	2.8	7.3	12.2	1.6
	加入量	—	—	50.6	50	37.4	0	0	0	20	26.7	7.1
临界值	—	—	—	78	50	14	14	0.3	1	10	5	2

注:OM 单位为%;K、N、P、S、B、Cu、Fe、Mn、Zn 单位为 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

1.2 温室生物试验方法

整个试验严格按照加拿大钾磷肥研究所提供的方法完成(金继运,1992)。具体试验设计参见赵良菊等(2003),确定试验处理时,首先按经验确定适合于一般作物的土壤养分含量临界值,然后通过吸附曲线查出使土壤中各养分含量达到临界值 2~3 倍时所需要的肥料加入量,加入室内分析结果中所有缺乏的肥料作为该土壤的最佳处理,从最佳处理配

方中减去(-)或加入(+)某一养分元素构成营养元素的丰缺分析处理,以此判断土壤养分的亏缺程度。试验方案如表 2 所示。指示作物为高粱,每杯装土 300 mL,试验共设 12 个处理,每处理重复 4 次。植株生长过程中保持水分充足供应(整个试验过程中均用蒸馏水)。高粱生长 50 d 后,收获地上部分,烘干称重作为生物指标。作物组织干样在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯重点实验室进行稳

表 2 温室盆栽试验方案及加入元素

Table 2 Treatment of green-house experiment and nutrient added

土样采集地	试验方案	加入元素										
金昌市小井子农场	OPT	-N	-P	+K	+S	+B	-Cu	-Fe	-Mn	+Mo	-Zn	CK
武威湖里	OPT	-N	-P	-K	+S	+B	+Cu	-Fe	-Mn	+Mo	-Zn	CK
武威白云	OPT	-N	-P	-K	+S	+B	+Cu	-Fe	-Mn	+Mo	-Zn	CK

定 C 同位素比率测定(刘晓宏等,2003),测试误差小于 0.05‰。测试结果取平均值进行分析,以 $\delta^{13}\text{C}$ 表示稳定碳同位素组成:

$$\delta^{13}\text{C} = \{[(^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2)_{\text{样品}} - (^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2)_{\text{标准}}] / (^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2)_{\text{标准}}\} \times 1000$$

2 结果与讨论

2.1 各土壤不同处理与生物产量关系

经生物盆栽试验得出种土壤养分亏缺状况如下(图 1-a,b,c):

小井子农场土壤主要缺 P、N、Mn、Zn,从最佳处理中减 P、N、Mn、Zn 处理,植株干物重分别下降了 31.78%、14.51%、22.32%和 21.75%。故该土壤盆栽试验各元素缺乏程度为 $P > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{N}$; +K、+B 处理与最佳处理相比相对产量分别降低 24.33%和 15.83%,说明该土壤 K、B 盈余,增施产生毒害。-Cu、-Fe、-Mo 处理及 +S 处理与 OPT 相比相对产量无显著差异,即该土壤的这几种元素在盆栽试验中未表现缺乏。武威湖里土壤主要缺 P、N,从最佳处理中减 P、N 处理,植株干物重分别下降了 36.20%和 30.47%。故该土壤盆栽试验各元素缺乏程度为 $P > \text{N}$; +Cu、+B 处理与最佳处理相比相对产量分别增加 24.10%和 38.54%,说明该土壤 Cu、B 相对缺乏,增施显著提高产量,而 +Mo 处理则使相对产量下降,可见该土壤 Mo 充足,增施产生毒害。-Zn 处理使相对产量增加 31.0%,说明推荐施锌量过高。武威白云土壤养分限制因子为 N、Zn、Mn,从最佳处理中减去这些元素,植株干物重分别降低 46.57%、29.20%和 14.46%,缺乏顺序为 $\text{N} > \text{Zn} > \text{Mn}$ 。-P、-K 处理相对产量分别增加 26.37%和 64.78%,说明推荐用量过高。+B 处理相对产量显著增加,说明该土壤中此元素缺乏。+Mo 处理相对产量降低 30.87%,Mo 在该土壤含量充足,增施产生毒害。

2.2 土壤营养水平与作物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系

营养元素直接或间接地影响光合作用。氮、镁、锰等元素是叶绿素生物合成所必需的矿质元素;钾、

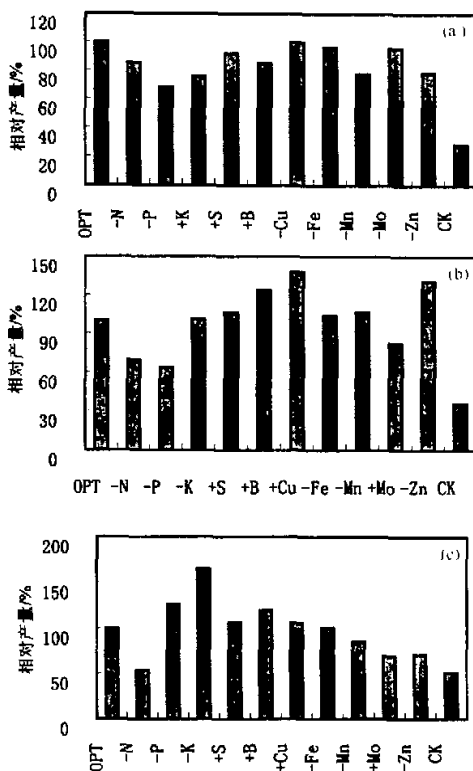


图 1 各土壤不同处理的生物产量

Fig. 1 The biomass of treatments in different soils

a-小井; b-武威湖里; c-武威白云

a-soil from Xiaojingzi; b-soil from Huli, Wuwei;

c-soil from Baiyun, Wuwei

磷等参与碳水化合物的代谢,间接地影响光合作用,进而影响作物组织器官的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。前人研究结果认为,在一定范围内土壤营养元素越多,植物光合速率越快,叶子细胞内部和外部的局部压力或者浓度降低,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大;反之-营养元素越贫, $\delta^{13}\text{C}$ 值越低(Francey 等,1982; Balesdent, 1993)。本试验结果如图 2-a、b、c 所示,3 种土壤的高粱茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值均表现为 OPT 处理最高,其余加元素和减元素处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 OPT 相比均表现不同程度的降低。

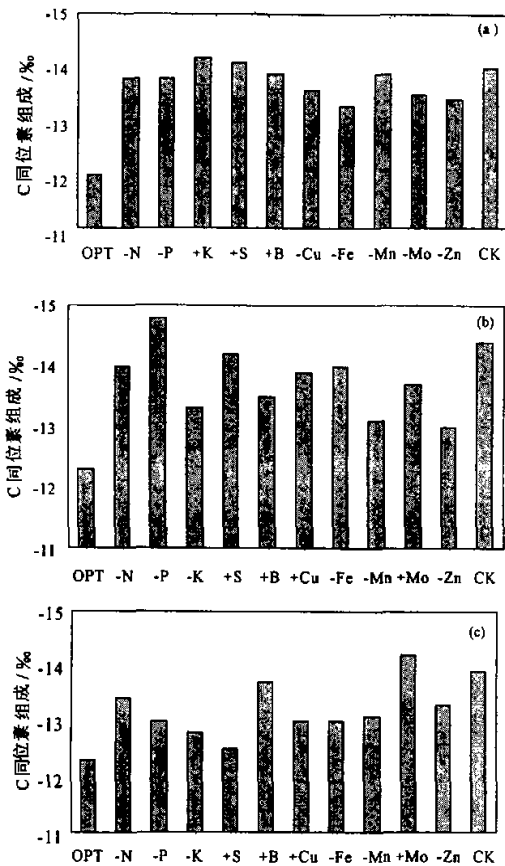


图2 各土壤不同处理对高粱茎叶
稳定C同位素组成的影响

Fig. 2 The effect of experimental treatment
on sorghum $\delta^{13}\text{C}$ in different soils
a-小井子; b-武威湖里; c-武威白云
a-soil from Xiaojingzi; b-soil from Huli, Wuwei;
c-soil from Baiyun, Wuwei

小井子农场土壤的高粱茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 变化幅度在 $-14.2\text{‰} \sim -12.0\text{‰}$ 之间, 其中 OPT 处理最高, 为 -12.0‰ , +K 处理高粱茎叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 最低, 分别为 -14.2‰ , +S 及 CK 处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 也低, 分别为 -14.1‰ 和 -14.0‰ , 其余处理高粱茎叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-13.9\text{‰} \sim -13.3\text{‰}$ 之间。武威湖里土壤的高粱茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 变化幅度在 $-14.8\text{‰} \sim -12.3\text{‰}$ 之间, OPT 处理最高, 为 -12.3‰ , -P 处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -14.8‰ 居最低, CK、+S、-N 及 -Fe 处理也低, 分别为 -14.4‰ 、 -14.2‰ 、 -14.0‰ 及 -14.0‰ , 除 -Zn 处理 $\delta^{13}\text{C}$ 较高 (-13.0‰), 其余处理在 $-13.9\text{‰} \sim -13.1\text{‰}$ 之间。武威白云土壤的作物 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-14.2\text{‰} \sim -12.3\text{‰}$ 之间, OPT 处理 $\delta^{13}\text{C}$

最高为 -12.3‰ , +Mo 处理最低为 -14.2‰ , +B 和 +Cu 处理 $\delta^{13}\text{C}$ 分别为 -13.7‰ 和 -13.0‰ 。-N、-P、-Mn 及 -Zn 处理 $\delta^{13}\text{C}$ 分别为 -13.4‰ 、 -13.0‰ 、 -13.1‰ 及 -13.3‰ , 其余处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-13.0\text{‰} \sim -12.5\text{‰}$ 之间。可见本次试验结果与 Francy (1982) 和 Balesdent (1993) 研究结果相一致。说明土壤的营养状况对作物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值有着极为显著的影响。

2.3 生物产量与作物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 关系

2.3.1 减元素处理的生物产量与作物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系 作物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 与生物产量存在密切关系。Condon 等 (1990) 认为在没有水分胁迫的大田试验中, $\delta^{13}\text{C}$ 与生物产量和籽粒产量呈正相关, 因而 $\delta^{13}\text{C}$ 可以作为反映小麦产量的指标。本次试验结果表明 (图 3), 在 OPT 及所有减元素处理中, 盆栽高粱生物产量的相对产量与其稳定 C 同位素组成呈相同的变化趋势。小井子农场土壤 (图 3-a) 中, OPT 处理的相对产量最高 (100%), 其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也最高 (-12.0‰), CK 处理的相对产量最低 (28.07%), 其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也最低 (-14.0‰), -N、-Zn、-Mn 及 -P 处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 降低程度也较大, 4 个元素对应的生物产量也较低, 可见在该土壤中, 氮肥、磷肥、锌肥及锰肥无论生物产量还是 $\delta^{13}\text{C}$ 值都可以反映其养分限制因子。武威湖里 (图 3-b) 土壤中, OPT 处理的相对产量最高, 其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也最高 (-12.3‰), CK 处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 略高于 -P 处理, 为 -14.4‰ , -P 处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低 (-14.8‰), 相对产量除 CK 处理外也最低; -N 处理高粱生物产量与茎叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也低, 这说明磷肥和氮肥尤其是磷肥是该土壤的极为重要的限制因子。武威白云 (图 3-c) 土壤的 OPT 及 CK 处理的高粱茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 和生物产量与小井子土壤相同, 也为最高与最低, -N、-Mn 及 -Zn 处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低, 对应的生物产量也低, 且随生物产量的增减而升降。-K 处理作物茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高对应的生物产量较高, 则该土壤钾肥充足, 不宜再施。由此所得的结论与本文 2.1 节依高粱的生物产量所得结果相一致。说明在该试验条件下可以用作物 $\delta^{13}\text{C}$ 值来表示土壤养分的丰缺状况, 也可以用其来作为生物产量指标。

2.3.2 加元素处理的生物产量与作物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系 土壤养分在一定范围内对作物生长起促进作用, 但是当土壤中某营养元素过量则对作物产生毒害作用 (孙颖等, 2001)。如 B 在过量和不足的情况

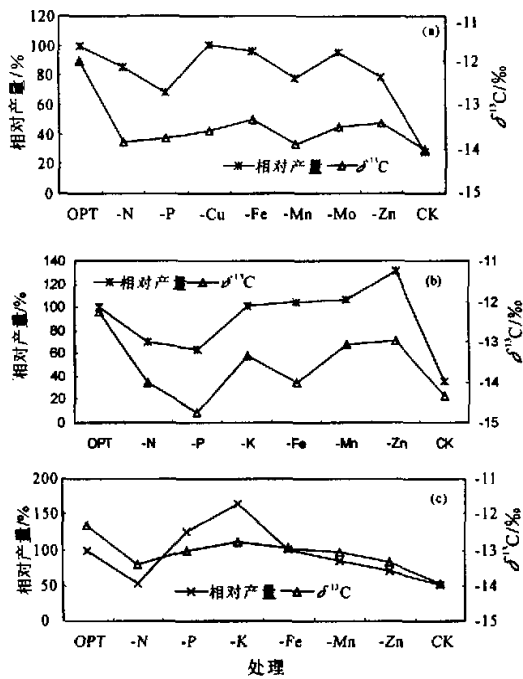


图 3 不同土壤减素处理作用组织 $\delta^{13}\text{C}$ 与生物产量关系
Fig. 3 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ in crop organism and biomass of different minus treatment
a-小井子; b-武威湖里; c-武威白云
a-soil from Xiaojingzi; b-soil from Huli, Wuwei;
c-soil from Baiyun, Wuwei

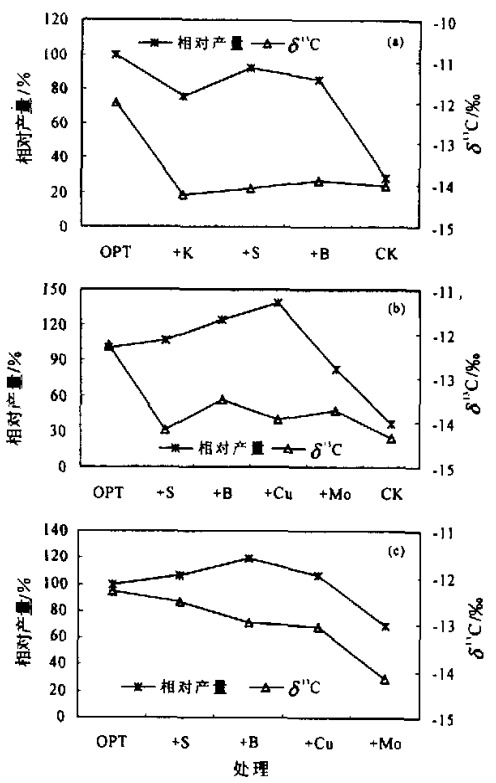


图 4 不同土壤处理作物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 与生物产量关系
Fig. 4 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ in crop organism and biomass of different added treatment
a-小井子; b-武威湖里; c-武威白云
a-soil from Xiaojingzi; b-soil from Huli, Wuwei;
c-soil from Baiyun, Wuwei

下,均会影响¹⁴C同化物的输出,使得油菜产量降低(Warington,1995)。在3种土壤的11个加元素处理中,小井子农场土壤加入了K、S及B元素,小井子土壤中加入元素处理的生物产量与 $\delta^{13}\text{C}$ 表现相反的趋势(图4-a)。⁺K及⁺S处理生物产量随 $\delta^{13}\text{C}$ 的降低而降低。武威湖里土壤⁺S及⁺B处理的生物产量与 $\delta^{13}\text{C}$ 呈相同的变化趋势,而⁺Cu及⁺Mo则呈相反的变化趋势(图4-b)。武威白云土壤的⁺S、⁺B、⁺Cu及⁺Mo 4个处理生物产量与 $\delta^{13}\text{C}$ 则表现相同的变化趋势(图4-c)。添加营养元素后生物产量与 $\delta^{13}\text{C}$ 的复杂关系可能与各元素对作物的毒害程度有关。

2.4 讨论

土壤营养状况会影响植物稳定C同位素组成。关于土壤养分对 $\delta^{13}\text{C}$ 的作用,梁银丽(2000)等研究表明,磷水平的差异导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显变化,而且不同水分和养分变化使得土壤养分与 Δ 值之间的关系变得非常复杂。本次试验是在水分充足的条件下

进行的,结果显示在一定范围内土壤养分状况对作物 $\delta^{13}\text{C}$ 有很大的影响,土壤养分状况越好,高粱生物产量越高,高粱茎叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 越高,尤其在土壤适应作物生长的最佳营养状况下(如OPT处理),高粱茎叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 达到最高值,与不施肥条件(CK)相比小井子农场、武威湖里及白云作物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加幅度分别为16.628%、17.153%和13.174%。

作物生物产量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系,也有着许多不同的结果。Condon等(1987)研究报道,在24个普通小麦、1个硬粒小麦、2个黑麦品种间, $\delta^{13}\text{C}$ 值确实存在差异;在没有水分胁迫的大田试验中, $\delta^{13}\text{C}$ 与生物产量和籽粒产量呈正相关。Ehdaie等(1991)通过2年的大田试验表明,无论干旱和供水处理, $\delta^{13}\text{C}$ 值和作物收获指数都呈弱的正相关($r = 0.17 \sim 0.55$),然而也有许多研究发现作物的生物量与 $\delta^{13}\text{C}$

呈负相关关系 (Farquhar 等, 1989; O'leary, 1988)。这两种相反的结论, 除与不同基因性在不同地点的实验差异有关外, 是否与其他因素有关, 尚不清楚。此次研究得到的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与生物产量间的关系表现得较为复杂, 在 OPT、减元素及 CK 处理中, 高粱生物产量与其茎叶 $\delta^{13}\text{C}$ 呈相同的变化趋势, 但 3 种土壤加元素处理的生物产量与 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系则较为复杂, 可见在不同营养条件下不能仅用简单的正或负相关关系来表示生物产量与 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系。

致谢 此次试验的室内土壤养分分析部分由中国农业科学院土壤与肥料研究所中·加实验室杨俐苹分析, 甘肃省农业科学院土壤与肥料研究所李娟、孙丽英等参加了盆栽试验, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- 李相博, 陈践发. 1998. 植物碳同位素分馏作用与环境变化研究进展. 地球科学进展, 13(3): 285~290.
- 林植芳. 1990. 稳定碳同位素在植物生理生态研究中的应用. 植物生理学通讯, (3): 1~6.
- 梁银丽, 康绍忠, 山仑. 2000. 水分和氮磷水平对小麦碳同位素组成的水分利用效率的影响. 植物生态学报, 24(3): 289~292.
- 郭卫东, 杨逸萍, 吴林兴等. 2002. 南沙诸岛礁生态系营养关系的稳定碳同位素研究. 台湾海峡, 21(1): 94~101.
- 冯虎元, 安黎哲, 王勋陵. 2000. 环境条件对植物稳定碳同位素组成的影响. 植物学通报, 17(4): 312~318.
- 金继运. 1992. 土壤养分系统研究法及其在我国的初步应用. 见: 加拿大钾磷研究所北京办事处编. 土壤养分系统研究法. 北京: 中国农业出版社, 1~16.
- 赵良菊, 肖洪浪, 刘晓宏等. 2003. 甘肃省河西地区荒漠土养分限制因子研究. 干旱地区农业研究, 21(2): 50~53.
- 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅等. 2003. 西藏喜马拉雅冷杉年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的气候意义. 科学通报, 48(11): 1209~1213.
- 孙颖, 胡志强. 2001. 微量元素的生理功能及其在农业生产中的应用. 松江学刊(自然科学版), (2): 74~76.

References

- Balesdent J. 1993. Site-related $\delta^{13}\text{C}$ of tree leaves and soil organic matter in a temperate forest. Ecology, 74(6): 1713~1721.
- Condon A G, G D Farquhar, R A Richards. 1990. Genotype variation in carbon isotope discrimination and transpiration efficiency in wheat. Australian Journal of Plant Physiology, 17(1): 9~22.
- Condon A G, R A Richards, G D Farquhar. 1987. Carbon isotope discrimination is positively correlated with grain yield and dry matter production in field-grown wheat. Crop Science, 27(4): 996~1001.
- Ehdaie B A E, Hall G D, Farquhar et al. 1991. Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in wheat. Crop Sci., 31: 1282~

1288.

- Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 40: 503~537.
- FENG Huyuan, AN Lizhe, WANG Xunling. 2000. The effects of environment on plant stable carbon isotope discrimination. Botanica Bulletin, 17(4): 312~318 (in Chinese with English abstract).
- Francey R J, Farquhar G D. 1982. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. Nature, 295: 28~31.
- JIN Jiyun. 1992. The systemic research of soil nutrients and its application in China. Edited by the Peking office of Canada Potassium and Phosphor institute. The systemic research of soil nutrients. Beijing of China: Chinese Agr-tech press, 1~16 (in Chinese with English abstract).
- GUO Weidong, YANG Yiping, WU Linxin et al. 2002. Stable carbon isotope study on trophic relationships of Zhubi reef ecosystem in Nansha islands. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 21(1): 94~101 (in Chinese with English abstract).
- Körner C H, Farquhar G D, Wong S C. 1991. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends. Oecologia, 88: 30~40.
- LI Xiangbo, CHEN Jianfa. 1998. The research advance of plant carbon isotope fractionation function and environmental change. Geoscience advance, 13(3): 285~290 (in Chinese with English abstract).
- LIN Zhifang. 1990. The application of stable carbon isotope in the research of ecophysiology of plant. Phytophysiological communications, (3): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- LIANG Yinli, KANG Shaozhong, SHAN Lun. 2000. The effects of soil moisture and nitrogen and phosphorus addition on carbon isotope discrimination and water use efficiency in wheat. Acta Phytocologica Sinica, 24(3): 289~292 (in Chinese with English abstract).
- LIU Xiaohong, QIN Dahe, SHAO Xuemei et al. 2003. The climatic significance of fir tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in XiMalaya in Tibet. Chinese Science Bulletin, 48(11): 1209~1213 (in Chinese with English abstract).
- O'leary M H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. Phytochemistry, 20(4): 553~567.
- O'leary M H. 1988. Carbon isotope in photosynthesis. Biosci, 38(5): 497~502.
- Stuiver M, Braziunas T F. 1987. Tree cellulose $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios and climatic change. Nature, (328): 58~60.
- Saurer M, Sigenthaler U. 1995. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and the significance of site conditions. Tellus, (46B): 320~330.
- Warrington K. 1995. The influences of high concentrations of commonium and sodium molybdates on flax, soybean and pea grown in nutrient solutions containing deficient or excess. Ann Appl Biol, 43: 709~719.
- ZHAO Liangjio, XIAO Honglang, LIU Xiaohong et al. 2003. Soil nutrient limiting factors of irrigation desert soils in Hexi region, Gansu Province. Agricultural Research in the Arid Areas, 21(2): 50~53 (in Chinese with English abstract).
- Zimmerman J K, Ehleringer J R. 1990. Carbon isotope ratios are correlated with irradiance levels in the Panamanian orchid catasetum viridiflavum. Oecologia, (83): 247~249.