

高 CO₂ 和土壤干旱对沙地优势植物 C, N 固定及分配的影响*

郭建平 高素华

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 通过模拟大气中 CO₂ 浓度升高和土壤干旱研究了沙地优势植物油蒿、柠条、沙柳 C, N 的固定及分配的影响. 结果表明: 大气中 CO₂ 浓度升高使沙地优势植物不同部位的生物量均显著增加, 而土壤干旱对不同部位的生物量有显著的不利影响, 使生物量下降. 大气中 CO₂ 浓度升高使植物根、茎、叶固定的 C 明显增加, 且这种增加的趋势随土壤湿度的增加而增大. 从 C 的分配看, 分配至茎的 C 最多, 其次是叶, 根中获得的 C 最少. 而不同植物对 N 的分配则不一致. 大气中 CO₂ 浓度升高和土壤干旱对沙地优势植物根、茎、叶中的 C/N 比有影响, 但规律不明显.

关键词 高 CO₂ 浓度 土壤干旱 沙地优势植物 C, N 固定及分配

大气中 CO₂ 浓度升高和土壤干旱是全球变化研究的主要内容之一, 而全球变化对陆地生态系统的影响又是全球变化研究的焦点之一. 沙地生态系统是陆地生态系统的主要组成成分, 油蒿、沙柳、柠条是我国北方地区毛乌素沙地生态系统中的主要优势植物群落. 过去有关沙柳、油蒿、柠条的研究主要是对自然状态下植物的生理生态和生长等的研究较多^[1~8], 集中研究了野外条件下叶水势、光合作用、蒸腾作用等生理特性及野外生长的生物量等. 但关于植物对 CO₂ 浓度和土壤干旱胁迫的复合影响方面的研究还较少^[9,10], 尤其是高 CO₂ 浓度和土壤干旱对油蒿、沙柳和柠条的 C, N 固定及在不同部位分配的研究还未见报道. 研究高 CO₂ 浓度和土壤干旱对油蒿、沙柳和柠条的 C, N 固定及在不同部位的分配, 有利于了解在全球变化情况下油蒿、沙柳、柠条的变化趋势及对温室效应的反馈作用. 因此, 研究大气中 CO₂ 浓度升高和土壤干旱对油蒿、沙柳、柠条 C, N 的固定及分配的影响具有重要的意义.

本文选择毛乌素沙地沙生植物群落的优势种沙柳(抗逆性较强, 不仅抗旱、寒、高温、风, 而且耐沙埋, 生长快且萌发力强, 是干旱半干旱及沙漠地区

优良的速生灌木, 也是毛乌素沙地优势灌木)、油蒿(被认为是毛乌素沙地偏途顶极植被类型, 多数生长在半固定与固定沙丘沙地, 是沙地天然牧场的主要植物群落, 具有较好的固沙作用, 因分布广, 在沙漠治理中有较大作用)、柠条(是毛乌素沙地防护林的主要灌木树种, 也是草-林-农复合生态系统中灌木带的优势物种)为主要研究对象, 在人工控制条件下, 以盆栽的方式, 通过控制不同的 CO₂ 浓度和土壤湿度来研究环境条件变化对油蒿、沙柳、柠条的 C, N 固定及分配的影响, 以揭示沙地优势植物的 C, N 循环及平衡, 并为沙地生态系统, 乃至陆地生态系统的 C, N 循环及平衡研究提供科学依据.

1 试验设计

柠条种子于 2001 年 4 月 29 日播种于高 6 cm, 直径 33 cm 的塑料盆中, 沙柳于同日扦插在相同塑料盆中, 油蒿采用移栽的方式种植在与上述相同的塑料盆中. 试验用土壤为沙土, 每盆 8 kg. 从 2001 年 6 月 12 日开始进行 CO₂ 浓度和土壤干旱处理, 至 9 月 12 日试验结束.

CO₂ 体积分数 ϕ 为 $650 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$, 并以

2003-04-08 收稿, 2003-06-03 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”(编号: G1999043407)资助

E-mail: gjp@cma.gov.cn

当前环境大气 CO_2 体积分数 ψ (约 350×10^{-6}) 为对照, 采用红外 CO_2 分析仪监测 CO_2 浓度, 钢瓶液态 CO_2 为气源。

土壤湿度分别为占田间持水量 30%~45% (严重干旱) 和 45%~60% (轻度干旱), 并以 60%~80% (适宜) 为对照。每隔 1 d 测 20 cm 土壤湿度, 并根据土壤含水量用灌溉的方法补充水分, 使土壤湿度保持在试验要求的范围内。

试验在黑龙江省农业科学院的人工气候室内进行, 该人工气候室为自然光玻璃室, 每间面积 18 m^2 , 气温、空气湿度等环境参数可自动调节, 在

阴雨天可采用生理日光灯进行自动补光。

试验结束后进行取样, 并分离植物的根、茎、叶, 在 85°C 条件下进行烘干, 然后分别测定根、茎、叶中的 C, N 含量, 全 C 测定采用重铬酸钾容量法; 全 N 测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-蒸馏法。每个样品测定 2 次重复, 取平均值。

2 结果分析

2.1 对植物不同部位 C, N 相对含量的影响

高 CO_2 浓度和土壤干旱对沙地优势植物不同部位中 C, N 相对含量有显著的影响 (表 1)。

表 1 高 CO_2 和土壤干旱对沙地优势植物 C, N 相对含量 (%) 及分配的影响

植物	土壤湿度/%	$\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$						环境 $\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$					
		根		茎		叶		根		茎		叶	
		全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N
油蒿	30~45	40.59	1.826	42.23	1.678	48.46	3.208	41.25	1.463	34.05	1.831	42.51	3.272
	45~60	44.73	1.479	46.31	1.655	46.46	3.513	40.25	1.758	52.50	1.557	42.36	3.421
	60~80	44.44	1.374	44.03	1.449	47.95	3.301	44.63	1.782	38.60	1.600	45.28	3.801
沙柳	30~45	41.07	1.883	38.51	1.252	44.11	2.597	42.47	2.028	45.87	1.324	43.39	3.084
	45~60	42.67	1.657	43.35	1.220	44.73	2.868	43.24	1.610	42.03	1.069	43.19	2.869
	60~80	39.53	1.749	44.20	0.979	45.92	2.870	39.71	2.086	44.00	1.100	41.88	3.192
柠条	30~45	43.20	1.965	44.02	1.862	43.40	3.048	41.27	2.114	45.10	1.843	46.76	3.460
	45~60	42.77	2.037	44.64	1.791	42.29	3.349	43.67	2.223	46.77	1.815	42.47	3.211
	60~80	43.77	2.280	46.41	1.747	42.86	3.602	41.83	1.919	47.30	1.947	43.63	3.171

(1) 根 C, N 相对含量的变化

由表可见, 在高 CO_2 浓度情况下, 油蒿和沙柳全 C 相对含量的最高值出现在土壤水分轻度干旱的处理, 而柠条出现在土壤水分适宜的处理; 油蒿和沙柳全 N 的最大值出现在重度干旱的处理, 而柠条与全 C 一样出现在土壤水分适宜的处理。

在当前环境 CO_2 浓度情况下, 油蒿根中全 C 相对含量的最大值出现在土壤水分适宜的处理, 而沙柳和柠条的最大值则出现在土壤轻度干旱的处理, 而油蒿在土壤轻度干旱时全 C 相对含量的含量最小; 油蒿和沙柳根中全 N 含量的最大值出现在土壤湿度适宜的处理, 而柠条根中全 N 的最大值出现在土壤轻度干旱的处理, 而在此湿度下, 沙柳的全 N 含量最小。

(2) 茎 C, N 相对含量的变化

由表可见, 在高 CO_2 浓度下, 油蒿茎中全 C 相对含量的最大值出现在土壤水分轻度干旱的处理, 而沙柳和柠条茎中全 C 相对含量的变化趋势是随着土壤水分的增加而增加, 即土壤湿度越大, 茎中全 C 的相对含量就越高; 油蒿、沙柳和柠条茎中全 N

相对含量的变化规律比较明显, 且变化趋势也完全一致, 全 N 相对含量随土壤水分的增加而减小, 即土壤湿度越大, 茎中 N 的含量越低。

在当前环境的 $\psi(\text{CO}_2)$ 浓度下, 油蒿茎中全 C 相对含量的最高值出现在土壤湿度轻度干旱的处理, 而在该处理中沙柳全 C 的相对含量却最小, 柠条茎中全 C 相对含量随土壤湿度的增加而增加, 即土壤湿度越大, 全 C 的相对含量越高; 油蒿、沙柳和柠条茎中全 N 相对含量有一个共同的规律, 即在土壤湿度轻度干旱时, 全 N 含量最低, 但油蒿和沙柳的最大值出现在土壤湿度严重干旱的处理, 而柠条则出现在土壤湿度适宜的处理。

(3) 叶 C, N 相对含量的变化

由表可见, 在高 CO_2 浓度下, 油蒿和柠条叶中全 C 相对含量的最大值出现在土壤湿度严重干旱的处理中, 而沙柳全 C 的相对含量随土壤湿度的增加而增加; 沙柳和柠条叶中全 N 的相对含量有随土壤湿度的增加而增加的变化规律。

在当前环境 CO_2 浓度下, 油蒿叶中全 C 相对含量的最大值出现在土壤湿度适宜的处理中, 而沙柳

和柠条出现在土壤严重干旱的处理中；油蒿叶中全N相对含量有随土壤湿度增加而增加的变化趋势，而柠条则正好相反，随土壤湿度增加而下降，沙柳叶中土壤湿度轻度干旱时最小。

由此可见，由于植物本身代谢规律及受不同环境条件的影响，植物体从大气和土壤中固定的C、N量及分配到植物不同部位的量是不同的，表现出不同的植物种对高CO₂浓度和土壤干旱响应的多样性。这种多样性对于研究和分析在未来全球变化环境下的沙地植物发展提供了依据。

2.2 高CO₂浓度和土壤干旱对全C、N的固定和分配的影响

不同植物对C、N的固定以及在根、茎、叶中分配的多少不仅取决于相对含量的大小，更取决于生物量的大小，这是因为生物量对环境条件的反应更加敏感。因此，在分析C、N固定量和分配之前，首先要分析植物不同部位生物量在不同环境条件下的变化和分配。

2.2.1 高CO₂浓度和土壤干旱对根、茎、叶生物量的影响

沙地植物根、茎、叶的生物量取决于在不同环境中植物光合作用的大小及其光合产物在不同器官的分配(表2)。

(1) 高CO₂浓度和土壤干旱对根生物量的影响

CO₂浓度升高使根生物量显著增加，在土壤湿度适宜时，CO₂浓度升高使柠条、油蒿和沙柳根生物量分别增加了112.36%，82.88%和57.89%；在土壤轻度干旱时，CO₂浓度升高使柠条、油蒿和沙柳根生物量分别增加了58.87%，10.47%和93.83%；在土壤严重干旱时，CO₂浓度升高使柠条、油蒿和沙柳根生物量分别增加了28.25%，18.15%和68.68%。

表2 高CO₂和土壤干旱对沙地优势植物生物量(g)及分配的影响

植物	土壤湿度/%	$\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$			环境 $\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$		
		根	茎	叶	根	茎	叶
油蒿	30~45	0.4408	1.9700	0.8407	0.3731	1.0912	0.7664
	45~60	0.5191	2.6400	1.1610	0.4699	2.5123	1.1193
	60~80	0.9817	5.0100	1.5968	0.5368	2.9769	1.2309
沙柳	30~45	0.3436	0.3666	0.5552	0.2037	0.2401	0.3896
	45~60	0.6003	0.5835	0.7547	0.3097	0.4089	0.6233
	60~80	0.6906	1.3898	1.1289	0.4374	1.0779	0.8381
柠条	30~45	0.2415	0.4052	0.2496	0.1883	0.3546	0.2496
	45~60	0.3268	0.5751	0.3405	0.2057	0.4074	0.2575
	60~80	0.4570	0.9889	0.5188	0.2152	0.4835	0.2695

土壤干旱胁迫使根生物量显著减小。在高CO₂浓度条件下，土壤轻度干旱使柠条、油蒿和沙柳的根生物量分别减小了28.49%，47.12%和13.08%；土壤严重干旱使柠条、油蒿和沙柳的根生物量分别减小了47.16%，55.10%和50.25%。在当前环境CO₂浓度条件下，土壤轻度干旱使柠条、油蒿和沙柳的根生物量分别减小了4.41%，12.46%和29.20%；土壤严重干旱使柠条、油蒿和沙柳的根生物量分别减小了12.50%，30.50%和53.43%。

由于不同的植物对CO₂浓度和土壤干旱的响应有明显的差异，因此，CO₂浓度升高和土壤干旱对植物根生物量的影响就有不同的变化趋势。以当前环境CO₂浓度和土壤水分适宜处理为对照，则CO₂浓度升高并有轻度土壤干旱处理的柠条和沙柳的根生物量分别比对照增加51.86%和37.24%，而油蒿则下降了3.30%；CO₂浓度升高并有重度土壤干旱处理的柠条根生物量增加12.22%，油蒿和沙柳的根生物量分别比对照减小17.88%和21.44%。

(2) 高CO₂浓度和土壤干旱对茎生物量的影响

CO₂浓度升高使茎生物量显著增加，在土壤湿度适宜时，CO₂浓度升高使柠条、油蒿和沙柳茎生物量分别增加了104.53%，68.30%和28.94%；在土壤轻度干旱时，CO₂浓度升高使柠条、油蒿和沙柳茎生物量分别增加了41.16%，5.08%和42.70%；在土壤严重干旱时，CO₂浓度升高使柠条、油蒿和沙柳茎生物量分别增加了14.27%，80.54%和52.69%。

土壤干旱使茎生物量显著减小。在高CO₂浓度条件下，土壤轻度干旱使柠条、油蒿和沙柳的茎生物量分别减小了41.84%，47.31%和58.02%；土壤严重干旱使柠条、油蒿和沙柳的茎生物量分别减小了59.03%，60.68%和73.62%。在当前环境CO₂浓度条件下，土壤轻度干旱使柠条、油蒿和沙柳的茎生物量分别减小了15.74%，15.61%和62.07%；土壤严重干旱使柠条、油蒿和沙柳的茎生物量分别减小了26.66%，63.34%和77.73%。

以当前环境CO₂浓度和土壤水分适宜处理为对照，则CO₂浓度升高并有轻度土壤干旱处理的柠条的茎生物量分别比对照增加18.95%，而油蒿和沙柳则下降了11.32%和45.87%；CO₂浓度升高并有重度土壤干旱处理的柠条、油蒿和沙柳茎生物量则分别比对照减小16.19%，33.82%和65.99%。

(3) 高CO₂浓度和土壤干旱对叶生物量的影响

CO₂ 浓度升高使叶生物量显著增加, 在土壤湿度适宜时, CO₂ 浓度升高使柠条、油蒿和沙柳叶生物量分别增加了 92.50%, 29.73% 和 34.70%; 在土壤轻度干旱时, CO₂ 浓度升高使柠条、油蒿和沙柳叶生物量分别增加了 32.23%, 3.73% 和 21.08%; 在土壤严重干旱时, CO₂ 浓度升高使柠条、油蒿和沙柳叶生物量分别增加了 4.96%, 9.69% 和 42.52%.

土壤干旱使叶生物量显著减小. 在高 CO₂ 浓度条件下, 土壤轻度干旱使柠条、油蒿和沙柳的叶生物量分别减小了 34.37%, 27.29% 和 33.15%; 土壤严重干旱使柠条、油蒿和沙柳的叶生物量分别减小了 51.89%, 47.35% 和 50.82%. 在当前环境 CO₂ 浓度条件下, 土壤轻度干旱使柠条、油蒿和沙柳的叶生物量分别减小了 4.45%, 9.07% 和 25.63%; 土壤严重干旱使柠条、油蒿和沙柳的叶生物量分别减小了 11.76%, 37.74% 和 53.51%.

以当前环境 CO₂ 浓度和土壤水分适宜处理为对照, 则 CO₂ 浓度升高并有轻度土壤干旱处理的柠条叶生物量比对照增加 26.35%, 而油蒿和沙柳则分别下降了 5.68% 和 9.95%; CO₂ 浓度升高并有重度土壤干旱处理的柠条、油蒿和沙柳叶生物量分别比对照减小 7.38%, 31.70% 和 33.75%.

由此可见, 不同的沙地优势植物种根、茎、叶生物量对高 CO₂ 浓度和土壤干旱的响应程度有显著差异, 大气中 CO₂ 浓度升高使不同部位的生物量均显著增加, 而土壤干旱对不同部位的生物量有显著的不利影响, 使生物量下降. 但不同的植物种及不同部位对高 CO₂ 浓度和土壤干旱的响应有明显的差异.

2.2.2 高 CO₂ 浓度和土壤干旱对全 C 的固定和分

配的影响 尽管植物不同部位全 C 相对含量随土壤湿度和 CO₂ 浓度升高的变化规律不明显, 但由于生物量随土壤湿度的增加和 CO₂ 浓度的升高而显著增加, 从而使得不同部位中固定和分配的 C 随土壤湿度和大气中 CO₂ 浓度升高的变化趋势比较一致(表 3). 在大多数情况下, 根、茎、叶中固定的 C 随土壤湿度的增加而增加, 随大气中 CO₂ 浓度的升高而增加. 仅在少数情况下出现不一致的变化趋势, 这主要是由于在不同的环境条件下, 植物某个部位的生物量的相对变化趋势与全 C 相对含量变化趋势出现了较大的差异所致. 从植物所固定的 C 的分配看, 不同植物的反应也十分一致, 分配最多的部位是茎, 其次是叶, 根中获得的 C 的分配量最少.

2.2.3 高 CO₂ 浓度和土壤干旱对全 N 的固定和分

配的影响 尽管植物不同部位全 C 相对含量随土壤湿度和 CO₂ 浓度升高的变化规律与全 C 一样不明显, 但由于生物量随土壤湿度的增加和 CO₂ 浓度的升高而显著增加, 从而使得不同部位中固定和分配的 N 随土壤湿度和大气中 CO₂ 浓度升高的变化趋势也比较一致(表 3). 在大多数情况下, 根、茎、叶中固定的 N 随土壤湿度的增加而增加, 随大气中 CO₂ 浓度的升高而增加. 仅在少数情况下出现不一致的变化趋势, 这主要是由于在不同的环境条件下, 植物某个部位的生物量的相对变化趋势与全 N 相对含量变化趋势出现了较大的差异所致. 从植物所固定的 N 在根、茎、叶中的分配看, 与全 C 的分配不一致, 不同植物在不同环境中分配有较大的差异. 油蒿除了在当前环境 CO₂ 浓度和严重干旱的处理外, 其余情况下都是在茎中的分配量最大, 其次

表 3 高 CO₂ 和土壤干旱对沙地优势植物 C, N 固定量(mg)及分配的影响

植物	土壤湿度/%	$\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$						环境 $\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$					
		根		茎		叶		根		茎		叶	
		全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N	全 C	全 N
油蒿	30~45	178.9	8.05	831.9	33.06	407.4	26.97	153.9	5.46	371.5	19.98	325.8	25.08
	45~60	232.2	7.68	1222.6	43.69	539.4	40.79	189.1	8.26	1319.0	39.12	474.1	38.29
	60~80	436.3	13.49	2205.9	72.60	765.7	52.71	239.6	9.57	1149.3	47.63	557.4	46.79
沙柳	30~45	141.1	6.47	141.2	4.59	244.9	14.42	86.51	4.13	110.1	3.18	169.1	12.02
	45~60	256.2	9.95	253.0	7.12	337.6	21.65	133.9	4.99	171.9	4.37	269.2	17.88
	60~80	273.0	12.08	614.3	13.61	518.4	32.40	173.7	9.12	474.3	11.86	351.0	26.75
柠条	30~45	104.3	4.75	178.4	7.55	108.3	7.61	77.7	3.98	159.9	6.54	116.7	8.64
	45~60	139.8	6.66	256.7	10.30	144.0	11.40	89.8	4.57	190.5	7.39	109.4	8.27
	60~80	200.0	10.42	459.0	17.28	222.4	18.69	90.0	4.13	228.7	9.41	117.6	8.55

是叶, 根中最少; 沙柳在叶中的分配最多, 根和茎中的分配差异不大; 柠条根中的分配最少, 茎和叶中的分配基本一致.

2.3 高 CO₂ 浓度和土壤干旱对 C/N 比的影响

植物体内的 C 主要是植物通过光合作用从大气中固定并以碳水化合物的形式存在, 而 N 则主要是从土壤中吸收并以蛋白质的形式存在. 因此, 植物 C/N 比的大小可以在一定程度上反映植物的品质. C/N 比高说明蛋白质的相对含量少, 植物的品质差, 反之, 则植物的品质高.

大气中 CO₂ 浓度升高和土壤干旱影响沙地优势植物根、茎、叶中的 C/N 比, 但规律不明显(表 4), 这充分说明了不同的植物及不同部位对高 CO₂ 浓度和土壤干旱反应的多样性. 由表可见, 高 CO₂ 浓度环境下, 油蒿根和茎的 C/N 比随土壤湿度的增加而增大, 而叶的 C/N 比在轻度干旱时最小, 重度干旱时最大; 在当前环境 CO₂ 浓度下, 根和茎的 C/N 比随土壤湿度的变化规律正好相反, 叶的 C/N 比则随土壤湿度的增加而减小. 在高 CO₂ 浓度下, 沙柳根和叶的 C/N 比随土壤湿度的变化规律完全相反, 茎的 C/N 比随土壤湿度的增加呈增加的趋势; 在当前环境 CO₂ 浓度下, 沙柳根和叶的 C/N 比随土壤湿度的变化规律一致, 在土壤轻度干旱时最大, 水分适宜时最小, 而茎的 C/N 比随土壤湿度的增加而表现出增加的趋势. 在高 CO₂ 浓度下, 柠条根和叶的 C/N 比随土壤湿度的增加表现出减低的趋势, 而茎的 C/N 比则表现出增加的趋势; 在当前环境 CO₂ 浓度下, 柠条根的 C/N 比为随土壤湿度的增加而增加, 茎的 C/N 比在土壤轻度干旱时最大,

表 4 高 CO₂ 和土壤干旱对沙地优势植物 C/N 比的影响

植物	土壤湿度/%	$\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$			环境 $\psi(\text{CO}_2)/10^{-6}$		
		根	茎	叶	根	茎	叶
油蒿	30~45	22.22	25.16	15.11	28.17	18.59	12.99
	45~60	30.23	27.98	13.22	22.89	33.72	12.38
	60~80	32.32	30.38	14.53	25.04	24.13	11.91
沙柳	30~45	21.81	30.76	16.98	20.94	34.62	13.86
	45~60	25.75	35.53	15.59	26.83	39.34	15.06
	60~80	22.56	45.14	16.00	19.04	39.99	13.12
柠条	30~45	21.96	23.63	14.23	19.52	24.45	13.51
	45~60	20.99	24.92	12.63	19.65	25.78	13.23
	60~80	19.23	25.56	11.89	21.79	24.30	13.75

叶中则相反. 而 CO₂ 浓度变化对根、茎、叶的 C/N 比的影响则不明显.

3 结论

(1) 大气中 CO₂ 浓度升高使沙地优势植物不同部位的生物量均显著增加, 而土壤干旱对不同部位的生物量有显著的不利影响, 使生物量下降. 但不同植物种根、茎、叶生物量对高 CO₂ 浓度和土壤干旱的响应程度有显著差异.

(2) 总体上看, 大气中 CO₂ 浓度升高使植物根、茎、叶固定的 C 明显增加, 且这种增加的趋势随土壤湿度的增加而增大. 从 C 的分配看, 分配至茎的 C 最多, 其次是叶, 根中获得的 C 最少. 而 N 的分配则不一致, 油蒿除了在当前环境 CO₂ 浓度和严重干旱的处理外, 其余情况下都是在茎中的分配量最大, 其次是叶, 根中最少; 沙柳在叶中的分配最多, 根和茎中的差异不大; 柠条根中的分配最少, 茎和叶中的分配基本一致.

(3) 大气中 CO₂ 浓度升高和土壤干旱对沙地优势植物根、茎、叶中的 C/N 比有影响, 但规律不明显, 说明了不同的植物及不同部位对高 CO₂ 浓度和土壤干旱反应的多样性.

参 考 文 献

- 姚洪林, 等. 内蒙古毛乌素沙地开发整治研究中心概况. 见: 王家祥主编. 毛乌素沙地开发整治研究文集(第1集), 呼和浩特: 内蒙古出版社, 1992. 1~7
- 肖春旺, 等. 鄂尔多斯高原沙柳幼苗对模拟降水量变化的响应. 生态学报, 2001, 21(1): 172
- 王邦锡, 等. 不同生长季节光照强度和温度对柠条叶片光合作用和呼吸作用的影响. 中国沙漠, 1996, 16(2): 146
- 章 中, 等. 柠条造林土壤水分临界值测定. 内蒙古林业科技, 1994, (3): 35
- 古 松. 花棒、杨柴、毛条苗期生长特性与气候因子的关系. 干旱区研究, 1994, 11(2): 60
- 董学军. 九种沙生灌木水分关系参数的实验测定及生态意义. 植物学报, 1998, 40(7): 657
- 董学军, 等. 依据野外实测的蒸腾速率对几种沙地灌木水分平衡的初步研究. 植物生态学报, 1997, 21(3): 208
- 李新荣, 等. 毛乌素沙地飞播植被与生境演变的研究. 植物生态学报, 1999, 23(2): 116
- 高素华, 等. 毛乌素沙地优势种在高 CO₂ 浓度条件下对土壤干旱胁迫的响应. 水土保持学报, 2002, 16(6): 116
- 郭建平, 等. 高 CO₂ 浓度和突然土壤干旱胁迫对柠条影响的试验研究. 水土保持学报, 2002, 16(1): 23