

中国松嫩草原羊草植硅体对全球变暖和氮沉降模拟的响应研究

介冬梅¹, 葛勇¹, 郭继勋², 刘红梅¹

(1. 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024; 2. 东北师范大学生命科学学院, 植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要:在松嫩草原应用红外线增温和人工施氮的方法对羊草群落模拟全球变暖和氮沉降, 提取羊草中的植硅体, 分析探讨植硅体的形态及数量变化规律. 羊草中的植硅体可以划分为4个大类和12个亚类, 以及较小的植硅体碎片, 其中帽型植硅体含量高达70%. 尖顶帽型和平顶帽型植硅体与刺帽型植硅体可能有不同的发育机制, 并且尖型植硅体对施氮更为敏感; 与对照相比, 增温处理对羊草植硅体的发育有促进作用(长宽增加0.1~2.6 μm), 而施氮处理则有一定的抑制作用(长宽减小0.1~1.4 μm), 增温和施氮交叉作用, 则施氮对羊草植硅体发育表现出的抑制作用明显减弱; 施氮处理中出现其他处理中未见到的空心棒型(占棒型总量的46%), 而且除棒型、帽型、尖型以外的植硅体含量增加到10%, 从而推测, 对于以羊草为优势植物的松嫩草原, 施氮的影响可能要强于增温, 如果两者同时作用, 增温能在一定程度上缓解施氮的影响. 实验中的羊草植硅体对模拟全球变化很敏感, 说明植硅体对环境因子的改变很敏感, 其作为古环境的代用指标应是可靠的.

关键词: 全球变化; 增温; 施氮; 松嫩草原; 羊草; 植硅体

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)08-1708-08

Response of Phytolith in *Leymus chinensis* to the Simulation of Global Warming and Nitrogen Deposition on Songnen Grassland, China

JIE Dong-mei¹, GE Yong¹, GUO Ji-xun², LIU Hong-mei¹

(1. School of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. Key Laboratory for Vegetation Ecology, Ministry of Education, Institute of Grassland Science, School of Life Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Using infrared radiator and applying nitrogen on *Leymus chinensis* community on Songnen grassland to simulate global warming and nitrogen deposition, phytolith was extracted from *L. chinensis*, the morphology and content of phytolith were analyzed. Phytolith in *L. chinensis* were classified into 4 main classes and 12 subclasses, as well as some small phytolith fragments. Of all the phytolith types, the hat-shaped take as much as 70%. The hat-shaped with spire and hat-shaped with flat peak may have different growth mechanisms from the echinate hat-shaped, and the point-shaped phytolith is more sensitive to N deposition. Compared with control check (CK), the warming treatment seemed to promote the growth of phytolith (increased the length and width 0.1-2.6 μm), while the N deposition treatment had an effect of inhibition on the growth of phytolith (decreased the length and width 0.1-1.4 μm), and when warming and N deposition mixed, in this treatment the effect of inhibition caused by N deposition declined. Hollow elongate (46% of elongate) was observed only in N deposition treatment, and the content of other types (elongate, point-shaped, hat-shaped excluded) increased to 10%, it was supposed, as *L. chinensis* is the dominant species in Songnen grassland, the effect of N deposition might be more significant than warming on such grassland, and warming could mitigate the affection of N deposition. Phytolith was sensitive to the change of environmental factors, this study provided an experimental evidence for phytolith as a reliable proxy indicator for paleo-environment.

Key words: global change; warming; nitrogen deposition; Songnen grassland; *Leymus chinensis*; phytolith

全球变化研究已成为当今世界引人瞩目的重大科学和社会问题. 依据 IPCC-TAR 的预测结果和其他资料, Wigley 等^[1]认为, 从 1990~2100 年全球平均温度将上升 1.7~4.9℃. 同时, 在过去的几十年中, 化石燃烧、化肥使用以及工业排放等人类活动向大气排放了大量的氮化物, 它们在大气中累积并不断向陆地和水域生态系统沉降^[2]. 据估计^[3], 全球沉降到各类生物群系的活性氮达 43.47 Tg·a⁻¹.

目前中国已经成为全球三大氮沉降集中区之一, 并且有继续增加的趋势^[4]. 随着全球变化的加剧, 增温和氮沉降必然对生态系统产生深远的影响, 张新时等^[5]对中国东北样带 (NECT) 的模拟研究发现,

收稿日期: 2009-10-20; 修订日期: 2009-12-06

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (30870238); 国家自然科学基金项目 (40971116)

作者简介: 介冬梅 (1969~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为第四纪环境演变, E-mail: jiedongmei@nenu.edu.cn

在模拟温度增加 2℃ 条件下,样带内的植物绿色生物量将在 30 a 内下降 25%,在模拟 CO₂ 浓度倍增、降水增量 10% 和温度增量 2℃ 的综合作用下,将使得样带区域内的植物总绿色生物量在 30 a 内增加约 8%。肖向明等^[6]运用 CENTURY 模型对内蒙古锡林河流域羊草草原和大针茅草原在全球变化下的趋势预测也得到相似的结论。氮作为陆生植物生长的主要限制因子,适当的氮沉降可以促进植物生长或增加生物量,这一点在许多研究中得到了证实^[7~9]。而过量的氮沉降会抑制植物生长^[10]。氮素输入的增加可能改变群落及其多样性,从而影响到陆地生态系统,这种改变在氮限制地区表现得尤为明显^[11]。

植硅体是发育在高等植物细胞以及细胞间隙的一种具有特殊形态的二氧化硅矿物^[12]。目前关于植硅体的研究主要集中在考古学和第四纪地质学中^[13~20]。植硅体之所以作为古环境的代用指标,得益于表土中存在丰富的植硅体。同时,在不同湿度和温度等环境条件下,某些形态的表土植硅体的数量存在统计规律。因此,国内外很多学者采用植硅体作为古气候的代用指标反演了不同区域的古植被、古温度和湿度^[21~32]。表土中的植硅体是来自植物体的,它的形态和大小受控于植物细胞及细胞间隙的形态和大小,而细胞及细胞间隙的发育是由环境因子影响下的植物生理机制所决定的,植硅体可以直接反映其形成时环境因子的状况。因此植物的植硅体与环境因子有着密切关系^[12],但对植物植硅体与环境因子关系研究的成果,目前还很少见到。

本研究在羊草自然生长状态下模拟全球变暖、氮沉降,探讨羊草植硅体形态和含量的变化对全球变化的响应。通过研究植物植硅体与气候因子之间的关系,以期植硅体作为古气候和古环境研究的代用指标,提供科学的实验证明。同时,通过研究羊草植硅体对模拟全球变化的响应,试图为全球变暖及氮沉降条件下生态系统的响应研究提供一个新的有效途径。

1 材料与方法

1.1 实验样地

定位模拟的研究地点(图 1)设在松嫩草原西南部长岭县境内的东北师范大学草地生态系统研究站,研究区地处东经 123°44′~123°47′,北纬 44°40′~44°44′。该区属于温带亚湿润季风气候,具有典型的大陆性气候特征。冬夏季风更替现象明显。温差较

大,冬季寒冷,夏季炎热。年平均气温为 4.9℃,年均降水量为 470 mm,大部分集中在 6~9 月份。春季干旱,年蒸发量达 1 600 mm,是降水量的 3.5 倍。该区为草甸草原,*Leymus chinensis* 群落占有绝对优势,此外还有 *Phragmites australis* 群落和杂草群落分布。该区处于丘间平地,为一小型闭流区。该区地表以下 0~15 cm 深的土层 pH 值为 8.2,有机质含量为 3%~4%。



图 1 实验区地理位置

Fig. 1 Geographic location of study site

1.2 实验设计

在 2006 年 5 月,进行样地设置。本实验样地总面积为 144 m²。在样地内设置 12 块面积为 4 m × 3 m 的长方形小样地,小样地间隔为 3 m,随机选取其中 6 块采用红外线加热仪(USA)进行温度控制,红外线加热仪距地面高度为 2.25 m,可使空气增温 2~3℃,并使表土增温约(1 ± 0.1)℃,温度处理保持全年实施。对于每一块样地,一半施氮,采用直接在样地内施用硝酸胺(分析纯),施用量为 10 g·m⁻²,另一半做对照样地。这样,样地中就有 2 种作用因子和 4 种处理方式,即增温、施氮、增温 + 施氮和对照,每个处理重复 6 次,并从 2006~2008 年连续进行 3 a 的处理和采样。

1.3 植硅体提取方法

植硅体的提取采用湿式灰化法^[33,34]。实验步骤如下:选择成熟期的长度和宽度相同的羊草叶片,将清洗干净的叶片剪成小段放入试管中,加入浓硝酸,

水浴加热,待有机质全部被氧化结束后再向试管中加入蒸馏水,用离心机(转数2 000 r/min)离心 10 min,共重复离心 3 次.将试管中的液体振荡均匀后制成固定片.最后采用 MOTIC 生物显微镜鉴定统计样品,每个样品统计植硅体至少 350 粒.

2 结果与分析

从 2006 ~ 2008 年共采集不同实验处理方式下的成熟期羊草样品 72 个,利用 MOTIC 生物显微镜在 900 倍下进行植硅体形态鉴定,共统计植硅体 4 585 粒,计算不同形态植硅体 3 a 的平均百分含量,同时对其长、宽进行测量.参考王永吉等^[12]对植硅体形态的划分及 ICPN 1.0^[35](International Code for Phytolith Nomenclature 1.0)的划分方案,发现所观测的植硅体中,主要类型有棒型(图 2A ~ D)、帽型(图 2G ~ I)和尖型(图 2E ~ F)以及蜂窝状、板状和薄片层状(图 2J ~ L)等.根据植硅体形态上更细微的差别,对棒型、帽型和尖型植硅体进行详细分类,棒型植硅体可分为:刺棒型、光滑棒型、两端有牛角状突起的棒型和空心棒型 4 个亚类;尖型植硅体可分为:有底座尖型和无底座尖型 2 个亚类;帽型植硅体可分为:刺帽型、光滑帽型和尖顶帽型 3 个亚类.

2.1 羊草植硅体含量变化

实验获得的植硅体中棒型、尖型和帽型植硅体所占比例达 90% 以上(表 1),而其他类型所占的比例不足 10%.

所有样品中,帽型植硅体所占比例最高,达 70% 左右(表 1),其含量从对照处理、增温处理、施氮处理到增温 + 施氮处理由 64% 增加到 76%,呈增加趋势;尖型植硅体的含量则从对照处理、增温处理、施氮处理到增温 + 施氮处理由 25% 减少到 12%,表现出减少的趋势;棒型植硅体含量变化不明显,只有轻微的波动;其他类型的植硅体含量变化幅度在 2% ~ 5% 之间,只有在施氮处理中的含量为 10%,明显高于其它处理(表 1).

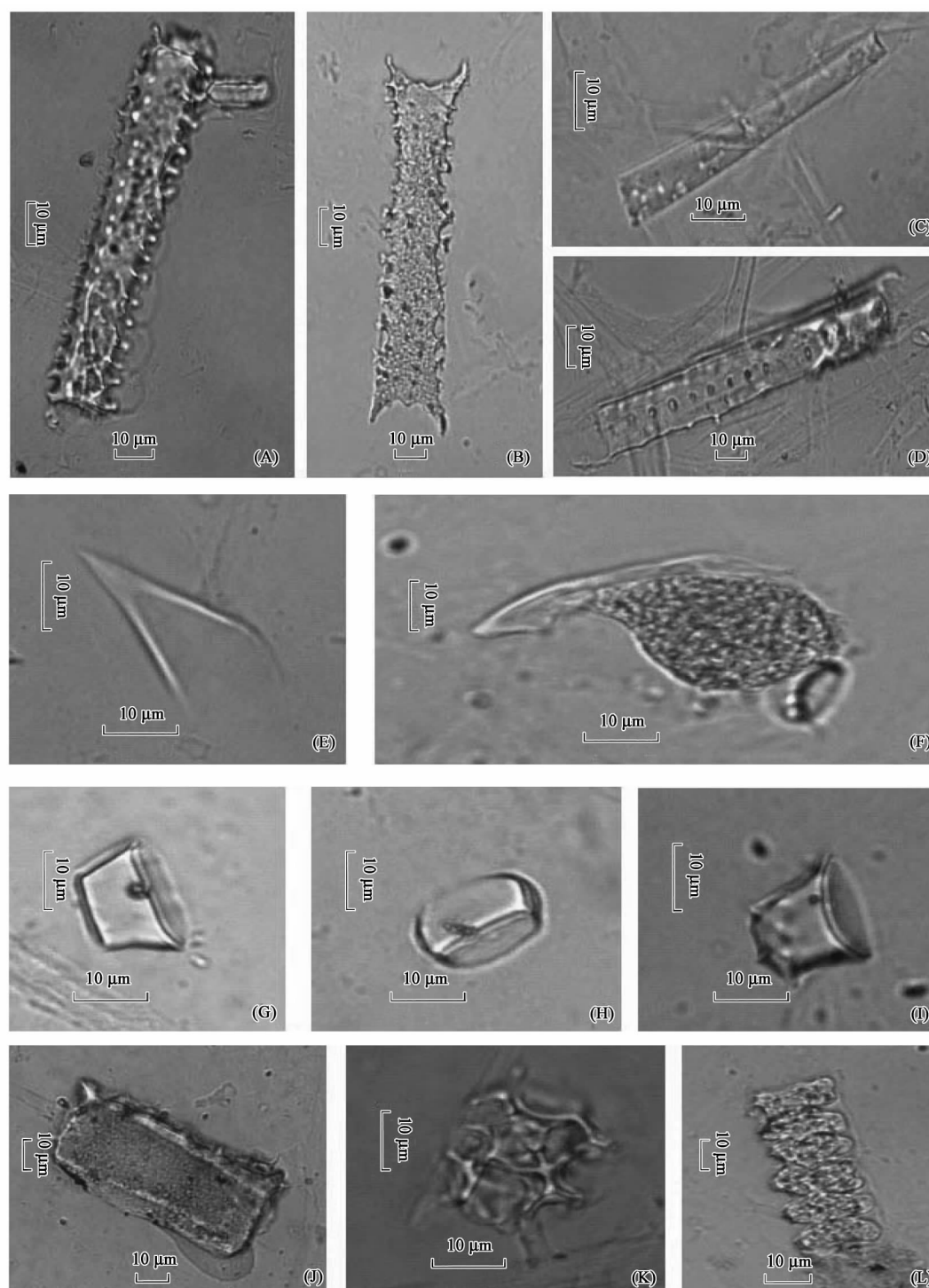
在帽型植硅体中,可以观察到尖顶帽型和平顶帽型的含量从对照处理、增温处理、施氮处理到增温 + 施氮处理呈现增加的趋势[图 3(a)],其中平顶帽型的含量变化较平缓,尖顶帽型的含量在增温 + 施氮处理含量急剧增加到 50%(表 2).刺帽型的含量呈现下降的趋势[图 3(a)],特别在增温 + 施氮处理中,含量急剧下降到 16%(表 2).在棒型植硅体中,光滑棒型和刺棒型的含量变化虽然没有一定的规律性,但两端有牛角状突起的棒型和空心棒

表 1 主要类型植硅体平均百分含量/%
Table 1 Average percentage of main types of phytolith/%

植硅体类型	对照			增温			施氮			增温 + 施氮		
	平均值	标准差	值域	平均值	标准差	值域	平均值	标准差	值域	平均值	标准差	值域
帽型	64	1.1	62 ~ 65	69	1.2	67 ~ 73	73	1.3	72 ~ 75	76	2.2	71 ~ 79
棒型	7	1.5	3 ~ 8	5	1.4	3 ~ 7	7	1.4	4 ~ 10	9	1.7	7 ~ 12
尖型	25	1.4	20 ~ 27	24	1.8	21 ~ 26	10	0.8	9 ~ 11	12	1.6	9 ~ 15
其它类型	4	1.9	1 ~ 8	2	2.1	1 ~ 5	10	1.1	8 ~ 13	3	1.4	1 ~ 6
总数/粒	1 116			1 215			1 101			1 153		

表 2 各亚类植硅体平均百分含量/%
Table 2 Average percentage of subclasses of phytolith/%

植硅体类型	对照			增温			施氮			增温 + 施氮		
	平均值	标准差	值域	平均值	标准差	值域	平均值	标准差	值域	平均值	标准差	值域
帽型												
尖顶帽型	27	1.5	24 ~ 29	31	1.6	28 ~ 36	33	1.2	30 ~ 34	50	1.6	48 ~ 55
平顶帽型	29	1.6	27 ~ 32	31	1.3	29 ~ 34	36	1.4	33 ~ 38	34	1.4	30 ~ 37
刺帽型	44	1.9	41 ~ 48	38	1.7	35 ~ 40	31	1.2	28 ~ 33	16	1.9	8 ~ 19
棒型												
光滑棒型	29	1.6	25 ~ 33	14	1.3	10 ~ 16	21	1.8	16 ~ 24	41	1.2	38 ~ 43
刺棒型	59	1.4	56 ~ 60	76	1.5	73 ~ 78	29	1.4	25 ~ 34	45	1.7	41 ~ 50
两端有牛角状突起的棒型	12	1.2	9 ~ 15	10	1.2	8 ~ 14	4	0.8	3 ~ 6	14	1.3	11 ~ 16
空心棒型	—	—	—	—	—	—	46	1.3	42 ~ 48	—	—	—
尖型												
有底座尖型	2	0.4	1 ~ 3	2	0.5	1 ~ 3	23	1.6	20 ~ 25	21	1.1	18 ~ 22
无底座尖型	98	0.4	97 ~ 99	98	0.5	97 ~ 99	77	1.6	75 ~ 80	79	1.1	78 ~ 82



A. 刺棒型植硅体, B. 两端有牛角状突起的棒型植硅体, C. 光滑棒型植硅体, D. 空心棒型植硅体, E. 无底座尖型植硅体, F. 有底座尖型植硅体, G. 平顶帽型植硅体, H. 尖顶帽型植硅体, I. 刺帽型植硅体, J. 板状植硅体, K. 蜂窝状植硅体, L. 薄片层状植硅体

图2 实验中观察到的典型羊草植硅体图版

Fig.2 Microphotographs of phytolith observed

型的含量均在施氮处理中出现突变,两端有牛角状突起的棒型下降至4%,空心棒型仅在施氮处理中出现,并且含量很高,达到46%(表2).尖型植硅体中有底座尖型和无底座尖型的含量变化也因是否有

施氮处理而产生明显变化[图3(b)].

2.2 羊草植硅体形态变化

实验得到的所有植硅体测量数据介于4.1~287.8 μm之间,可划分为7个长度区间,其中不同

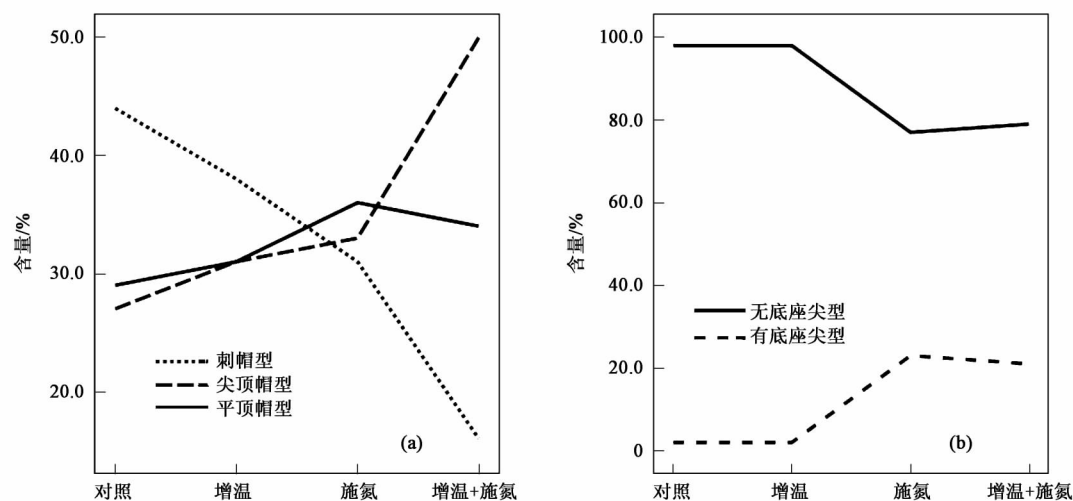


图3 帽型和尖型植硅体含量变化

Fig. 3 Variation of hat-shaped and point-shaped phytolith

长度区间的测量数据所占比例存在极显著差异 ($p < 0.01$). 其中, 区间 2 ($10 \sim 20 \mu\text{m}$) 的测量数据量最大, 占有数据的 62.4%, 并且长度的分布近似服从正态分布 (图 4).

区间	频数	百分含量/%	有效百分比/%	累积百分比/%
1. $0 \sim 10 \mu\text{m}$	1 404	15.9	15.9	15.9
2. $10 \sim 20 \mu\text{m}$	5 508	62.4	62.4	78.3
3. $20 \sim 30 \mu\text{m}$	891	10.1	10.1	88.3
4. $30 \sim 40 \mu\text{m}$	243	2.8	2.8	91.1
5. $40 \sim 50 \mu\text{m}$	159	1.8	1.8	92.9
6. $50 \sim 100 \mu\text{m}$	300	3.4	3.4	96.3
7. $100 \sim 300 \mu\text{m}$	327	3.7	3.7	100.0
总数	8 832	100.0	100.0	

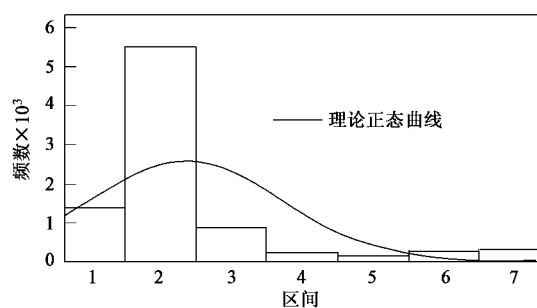


图4 实验全部测量数据不同区间分布

Fig. 4 Histogram of all measure data in different intervals

所有的长和宽的数据中, 处于 $0 \sim 30 \mu\text{m}$ 区间的数据占总数据的 88.3%, 用这一区间的数据对植硅体的变化趋势进行解释具有很高的可信度和代表性. 帽型植硅体的全部测量数据和无底座尖型植硅体的绝大部分测量数据均处于这一区间, 并且这两类植硅体的测量数据的方差均较小, 数据量充足. 因

此, 本研究主要对帽型和无底座尖型植硅体的数据进行深入统计分析.

对长度区间 $0 \sim 30 \mu\text{m}$ 的测量数据分析发现, 相对于对照处理 (表 3), 增温处理和增温 + 施氮处理中的帽型植硅体长和宽的平均值都有所增大. 施氮处理中的帽型植硅体长和宽的平均值要普遍小于增温处理和增温 + 施氮处理, 其中平顶帽型长、尖顶帽型宽度和刺帽型宽度的平均值比对照处理的还要小. 无底座尖型长和宽的平均值在增温处理中要大于对照处理, 在施氮处理中要小于对照处理, 在增温 + 施氮处理中其长度的平均值小于对照处理, 宽度的平均值则高于对照处理.

3 讨论

羊草属于早熟禾亚科, 对早熟禾亚科的植硅体前人已经有过很多研究. 早在 1936 年 Part 就对 Festucoideae 的植硅体进行分析和报道, 认为这类植物的植硅体中以圆形、椭圆形、矩形为主; 近藤鍊三的研究认为早熟禾亚科植硅体典型形态主要有船形、帽型、堆形、星形和齿形, 棒型和尖型也较丰富, 但长方形或方形在早熟禾亚科中并不常见^[12]. 黄翥等^[36]曾做过内蒙古典型羊草草原的羊草的植硅体分析, 发现羊草中圆形植硅体 (即文中的帽型) 占 69.1%, 羊草表皮短细胞中齿形植硅体极少甚至缺乏, 这一结果与本实验结果相一致. 在实验所观察到的羊草植硅体中, 不仅观测到了以往研究中发现的帽型、棒型、尖型及蜂窝状、板状等植硅体类型, 还新发现了两端有牛角状突起的棒型 (图 2B)、空

表 3 各亚类植硅体形态大小统计
Table 3 Size of the subclass phytolith

植硅体形态	处理方法	长/ μm			宽/ μm		
		中值	标准差	值域	中值	标准差	值域
平顶帽型	对照	16.5	3.1	11.2 ~ 25.0	10.6	1.9	7.0 ~ 17.2
	增温	16.9	2.9	10.4 ~ 23.6	11.5	1.9	7.7 ~ 16.4
	施氮	16.4	2.8	11.7 ~ 22.4	10.7	1.8	7.4 ~ 15.7
	增温 + 施氮	19.3	3.7	11.2 ~ 31.7	11.2	3.1	5.1 ~ 11.7
尖顶帽型	对照	13.9	2.5	10.4 ~ 19.9	10.8	1.5	7.2 ~ 13.7
	增温	15.5	2.2	12.0 ~ 23.0	10.9	2.1	5.9 ~ 14.6
	施氮	15.1	2.3	10.6 ~ 19.9	10.4	1.7	7.5 ~ 15.2
	增温 + 施氮	14.5	2.4	10.0 ~ 21.0	10.8	1.9	7.6 ~ 14.0
刺帽型	对照	16.2	2.1	11.6 ~ 22.1	12.1	2.2	7.0 ~ 19.4
	增温	16.7	2.7	13.0 ~ 23.8	12.3	2.5	7.8 ~ 16.3
	施氮	16.3	2.9	10.3 ~ 23.2	11.7	1.7	7.9 ~ 15.8
	增温 + 施氮	16.8	2.2	12.3 ~ 22.0	13.0	2.2	8.6 ~ 17.7
无底座尖型	对照	22.0	6.4	9.5 ~ 38.9	12.7	3.2	6.9 ~ 23.4
	增温	24.1	8.5	9.2 ~ 48.5	14.1	4.9	5.3 ~ 27.9
	施氮	20.6	7.6	11.4 ~ 38.3	12.5	4.2	7.5 ~ 24.8
	增温 + 施氮	20.2	5.7	12.9 ~ 32.3	14.7	2.9	9.4 ~ 20.7

心棒型(图 2D)以及薄片层状(图 2L)等 3 种形态规则并且含量较多的植硅体,其中空心棒型仅出现在施氮处理中(表 2),剩余的植硅体则呈现破碎以及不规则的形状,并且含量很少.实验收集到的各种植硅体中,帽型植硅体的含量高达 70%,因此,在进行讨论的时候,本研究主要对帽型植硅体进行详细讨论分析.

3.1 羊草植硅体对增温处理的响应

增温处理的羊草地上生物量及地下生物量与对照相比均有所增加^[37],说明增温处理可能加强了羊草的同化作用.因此,羊草在增温条件下可能吸收更多的硅元素.增温处理的羊草植硅体中,帽型植硅体的含量随着温度升高而上升,这与王永吉等^[12]所作的表土样品中帽型植硅体含量变化的趋势相反,可能与本实验采用的是单一物种有关.帽型植硅体中尖顶帽型和平顶帽型的含量随着温度增加而增加,刺帽型含量则下降,这种含量的变化说明增温处理对不同帽型植硅体的影响并不是一致的,3 种帽型植硅体可能有着不同的形成机制.尖型植硅体虽然总体的含量仅下降 1%,但其中无底座尖型和有底座尖型含量的比例并无变化,说明增温处理对尖型植硅体含量影响不明显,而且对 2 种尖型植硅体的比例影响也不明显.在增温处理下,帽型和无底座尖型植硅体的长和宽的平均值均增大,可以认为增温能够促进植硅体的发育.

3.2 羊草植硅体对施氮处理的响应

施氮处理中帽型植硅体含量相对于对照处理仍

然增加,其中平顶帽型和尖顶帽型的含量增加,但刺帽型含量下降,这与增温处理中的帽型植硅体含量的变化相一致,从而推测这 3 种帽型植硅体的形成过程有可能是不一样的.尖型植硅体的含量明显下降,并且 2 种尖型植硅体的比例也有所改变,有底座尖型含量明显增加,几乎为对照和增温处理的 10 倍.特别值得注意的是,其他类型的植硅体含量在施氮处理中含量明显增加,可达到 10%,同时棒型植硅体中出现新的亚类:空心棒型,空心棒型即棒型轮廓硅化,中间未被硅质填充而呈现空心的形态,其含量相当高,占棒型总量的 46%.因此推断施氮处理对羊草产生了重要影响,可能直接影响了羊草对硅的吸收,因而棒型植硅体的形成过程中断,以至于形成空心棒型.同时,破碎和不规则的植硅体含量增加也说明了这一点.此外还发现,在施氮处理中帽型植硅体含量的变化趋势与增温处理中帽型植硅体含量变化趋势相一致,但其长和宽的平均值与增温处理相比明显减小,并且无底座尖型的长和宽的平均值也有所下降,而与对照相处理比较,施氮处理下羊草植硅体不但没有显著增大,甚至要小于对照处理中的羊草植硅体,进而推测施氮处理有可能对羊草植硅体的生长发育产生负面的影响.

3.3 羊草植硅体对增温 + 施氮处理的响应

增温和施氮的双重处理下,羊草植硅体中帽型含量继续上升,并且其中平顶帽型和尖顶帽型的含量也有所上升,刺帽型的含量下降,这种植硅体含量的变化趋势与前 2 种处理相似,说明对于帽型植硅

体而言,增温和施氮表现出协同作用.尖型植硅体的含量则与施氮处理中的尖型植硅体含量相似,2种尖型的比例也与施氮处理相类似,由此可以发现,尖型植硅体对于氮素的响应更为敏感,对于增温则不太敏感.空心棒型植硅体在此消失,说明增温减弱了施氮的影响,增温与施氮表现出拮抗作用.增温+施氮处理的帽型植硅体和无底座尖型植硅体的长和宽的平均值与对照处理相比有所增大,只有无底座尖型的长度的平均值有所下降,与施氮处理相比,其长和宽的平均值也有所增大,只有尖顶帽型和无底座尖型的长的平均值比施氮处理还要小一些,在这里增温与施氮也表现出一定的拮抗作用,并且增温的作用要强于施氮.

4 结论

(1)在实验的不同处理中,羊草植硅体的含量表现出有规律的变化,说明植硅体对于外界环境温度升高和氮素增加都很敏感,能够反映外界各种环境因子的变化,用植硅体作为指示古环境的代用指标是有效的.

(2)不同类型的羊草植硅体含量对不同的环境因子变化有着不同的响应程度,羊草中帽型植硅体对增温和施氮处理都较为敏感,并且在2种处理的双重作用下变化更为剧烈.不同类型的帽型植硅体变化趋势也不一致,实验中尖顶和平顶帽型植硅体变化趋势一致,与刺帽型植硅体相反,从而推测刺帽型植硅体与平顶和尖顶帽型植硅体可能有着不一样的形成机制;尖型植硅体对施氮处理更敏感,这在2种尖型植硅体的比例上表现更为明显.植硅体的大小也有明显变化,其中增温处理可以使得植硅体普遍有所增大,施氮处理中的植硅体普遍小于增温处理,甚至要小于对照处理;增温+施氮处理中观察到大部分植硅体要大于施氮处理中的植硅体,所以认为增温可能在一定程度上减弱了施氮的影响.

(3)实验在松嫩草原模拟了全球变暖和氮沉降,对比温度和氮素这2个环境因子,增温在更大的程度上表现出对羊草植硅体的发育有促进作用,而施氮则表现出抑制作用.因为在增温+施氮处理下,施氮处理中表现的抑制作用得以缓解,因而认为适当的增温可能缓解氮素增加对羊草植硅体的发育造成的负面影响.进而推测,对于以羊草为主的羊草草原而言,氮沉降的影响可能要强于全球变暖,而全球变暖又会在一定程度上缓解氮沉降造成的影响.

致谢:在论文的写作和修改过程中,石连旋副教

授、吕金福教授提供了许多帮助和宝贵的意见及建议,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] Wigley T M L, Raper S C B. Interpretation of high projections for global-mean warming[J]. Science, 2001, **293**(5529): 451-454.
- [2] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecological Applications, 1997, **7**(3): 737-750.
- [3] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets[J]. Biogeochemistry, 1999, **46**(1): 7-43.
- [4] Zheng X, Fu C, Xu X, et al. The Asian nitrogen cycle case study[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, **31**(2): 79-87.
- [5] 张新时,高琼,杨奠安,等.中国东北样带的梯度分析及其预测[J].植物学报:英文版,1997, **39**(9): 785-799.
- [6] 肖向明,王义凤,陈佐忠.内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反应[J].植物学报,1996, **38**(1): 45-52.
- [7] Hättenschwiler S, Körener C. Biomass allocation and canopy development in spruce model ecosystems under elevated CO₂ and increased N deposition[J]. Oecologia, 1997, **113**(1): 104-114.
- [8] Berger T W, Glatzel G. Response of *Quercus petraea* seedlings to nitrogen fertilization[J]. Forest Ecology and Management, 2001, **149**(1-3): 1-14.
- [9] Nakaji T, Takenaga S, Kuroha M, et al. Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedlings to high nitrogen load[J]. Environmental Sciences, 2002, **9**(4): 269-282.
- [10] Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, et al. Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings[J]. Trees Structure and Function, 2001, **15**(8): 453-461.
- [11] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands[J]. Science, 1996, **274**(5293): 1720-1723.
- [12] 王永吉,吕厚远.植物硅酸体研究及应用[M].北京:海洋出版社,1992.
- [13] 秦颖,姚政权,魏国锋,等.利用植硅石示踪九连墩战国楚墓出土青铜器产地[J].中国科学技术大学学报,2008, **38**(3): 326-330.
- [14] 张玉兰,张敏斌,宋建.从广富林遗址中的植硅体组合特征看先民农耕发展[J].科学通报,2003, **48**(1): 96-99.
- [15] 靳桂云,燕生东,兰玉富,等.山东胶州赵家庄遗址4000年前稻田的植硅体证据[J].科学通报,2007, **52**(18): 2161-2168.
- [16] Piperno D R. Phytolith analysis: an archaeological and geological perspective[M]. Academic Press: San Diego, 1988.
- [17] Horrocks M, Deng Y, Ogden J, et al. A reconstruction of the history of a Holocene sand dune on Great Barrier Island, northern New Zealand, using pollen and phytolith analyses[J]. Journal of Biogeography, 2000, **27**(6): 1269-1277.

- [18] Kondo R, Childs C, Atkinson I. Opal Phytoliths of New Zealand [M]. Lincoln, NZ: Manaaki Whenua Press, 1994.
- [19] Madella M. Phytoliths from a Central Asia loess-paleosol sequence and modern soils: their taphonomical and palaeoecological implication [J]. The State of the Art of Phytoliths in Plants and Soils. Monografias del Centro de Ciencias Medambioentales, Madrid, 1997: 49-58.
- [20] 黄翡, Lisa K, 卮发, 等. 内蒙古中东部全新世草原植被, 环境及人类活动[J]. 中国科学(D 辑), 2004, **34**(11): 1029-1040.
- [21] Bremond L, Alexandre A, Vêla E, *et al.* Advantages and disadvantages of phytolith analysis for the reconstruction of Mediterranean vegetation: an assessment based on modern phytolith, pollen and botanical data (Luberon, France) [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2004, **129**(4): 213-228.
- [22] Fredlund G G, Tieszen L T. Modern phytolith assemblages from the North American great plains [J]. Journal of Biogeography, 1994, **21**(3): 321-335.
- [23] Fredlund G G, Tieszen L L. Phytolith and carbon isotope evidence for late Quaternary vegetation and climate change in the southern Black Hills, South Dakota [J]. Quaternary Research, 1997, **47**(2): 206-217.
- [24] Guiot J, Harrison S P, Prentice I C. Reconstruction of Holocene precipitation patterns in Europe using pollen and lake-level data [J]. Quaternary Research, 1993, **40**(2): 139-149.
- [25] Iriarte J, Paz E A. Phytolith analysis of selected native plants and modern soils from southeastern Uruguay and its implications for paleoenvironmental and archeological reconstruction [J]. Quaternary International, 2009, **193**(1-2): 99-123.
- [26] 吕厚远, 吴喆, 刘东生, 等. 150ka 来宝鸡黄土植物硅酸体组合季节性气候变化[J]. 中国科学(D 辑), 1996, **26**(2): 131-136.
- [27] Birks H, Birks H. Frey D G, *et al.* Review 1: Numerical tools in palaeolimnology—Progress, potentialities, and problems [J]. Journal of Paleolimnology, 1998, **20**(4): 307-332.
- [28] Lu H Y, Wu N Q, Yang X D, *et al.* Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China I: phytolith-based transfer functions [J]. Quaternary Science Reviews, 2006, **25**(9-10): 945-959.
- [29] Lu H Y, Wu N Q, Liu K B, *et al.* Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: palaeoenvironmental reconstruction in the Loess Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2007, **26**(5-6): 759-772.
- [30] Prebble M, Schallenberg M, Carter J, *et al.* An analysis of phytolith assemblages for the quantitative reconstruction of late Quaternary environments of the Lower Taieri Plain, Otago, South Island, New Zealand I. Modern assemblages and transferfunctions [J]. Journal of Paleolimnology, 2002, **27**(4): 393-413.
- [31] Prebble M, Shulmeister J. An analysis of phytolith assemblages for the quantitative reconstruction of late Quaternary environments of the Lower Taieri Plain, Otago, South Island, New Zealand II. Paleoenvironmental reconstruction [J]. Journal of Paleolimnology, 2002, **27**(4): 415-427.
- [32] Wu N Q, Lu H Y, Sun X J, *et al.* Climatic factor transfer function from Opal Phtolith and its application in paleoclimate reconstruction of China loess-paleosol sequence [J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, (Suppl 1): 105-114.
- [33] 王永吉, 吕厚远, 衡平. 植物硅酸体的分析方法 [J]. 植物学报, 1994, **36**(10): 797-804.
- [34] 徐德克, 李泉, 吕厚远. 棕榈科植硅体形态分析及其环境意义 [J]. 第四纪研究, 2005, **25**(6): 785-792.
- [35] Madella M, Alexandre A, Ball T. International code for phytolith nomenclature 1.0 [J]. Annals of Botany, 2005, **96**: 253-260.
- [36] 黄翡, 黄凤宝. 内蒙古典型草原禾本科植硅体形态 [J]. 古生物学报, 2004, **43**(2): 246-253.
- [37] 高嵩. 模拟增温和氮素沉降对羊草群落特征及物候期的影响 [D]. 长春: 东北师范大学, 2008.