

贺兰山油松年轮中稳定碳同位素含量和环境的 关系

马利民^{1,2}, 刘禹², 赵建夫¹ (1. 同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075, E-mail: ma.li.min@263.net)

摘要:植物中稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 变化和环境关系密切, 通过研究贺兰山油松 (*Pinus tabulaeformis*) 植物纤维素中稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和环境之间的关系, 发现该地区树轮纤维素中稳定碳同位素序列和大气中 CO_2 的含量关系密切, 据此可以推算大气中的 CO_2 浓度的变化情况. 研究还发现植物纤维素中稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化和生长年 1~7 月的总降水量显著负相关 ($r = -0.515$, $\alpha = 0.05$), 而和当年 6~8 月的平均气温显著正相关 ($r = 0.427$, $\alpha = 0.05$). 通过对比树轮纤维素稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值和太阳黑子之间的关系, 发现太阳黑子活动最强的年份往往对应较高的树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 值.

关键词:贺兰山; 树轮年轮; 环境变化; $\delta^{13}\text{C}$

中图分类号: X171.1, S153 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)05-05-0049

The Relationship Between Environmental Change and Stable Carbon Isotopes Records from Tree ring in Mt. Helan

Ma Li min^{1,2}, Liu Yu², Zhao Jianfu¹ (1. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, College of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China E-mail: ma-li.min@263.net)

Abstract: The value of stable carbon isotope in plants is closely correlative with environmental factors. The stable carbon isotope chronology was attained from tree-ring α cellulose in pine (*Pinus tabulaeformis*), Mt. Helan. The relation between $\delta^{13}\text{C}$ series and precipitation from January to July was negatively correlative ($r = -0.515$, $\alpha = 0.05$). And the $\delta^{13}\text{C}$ series was positive correlative with the average temperature from June to August ($r = 0.427$, $\alpha = 0.05$). Also the atmospheric CO_2 content relates to the $\delta^{13}\text{C}$ series in the tree-ring cellulose. It was easy to find the increasing trend of CO_2 composition in the atmosphere from the tree rings. By the relation between the number of sunspot and $\delta^{13}\text{C}$ series, the more number sunspot was correlated with higher $\delta^{13}\text{C}$ value was found.

Keywords: Mt. Helan; environment change; tree-ring; stable carbon isotope

植物在生长的过程中不断地与外部环境进行物质和能量的交换, 当外部环境发生变化时植物的生长就会对这些变化做出相应的反应, 这些变化就会通过植物的生理活动记录在植物体内. 树木年轮就是这样一种活的环境监测器, 由于其每年一轮的生长习性, 能够提供精确到年、甚至季节的环境变化的信息而受到环境学家们的高度重视. 树木年轮在研究过去环境变化时具有定年准确、分辨率高、连续性好、数据量化程度高、可信度高、分布广泛等特点, 利用蕴藏在树木年轮年层中丰富的高分辨率环境信

息, 在环境领域的研究工作已取得十分理想的成果^[1~5].

同位素在自然界中具有示踪作用, 树木由于外界环境的变化及植物生理过程的影响, 在与外界进行碳、氢、氧元素交换时, 就会产生元

基金项目: 国家 973 重点规划项目 (G1999043401); 国家自然科学基金项目 (40071081); 中科院知识创新工程项目 (KZCX1-10-02, KZCX2-108); 中科院黄土与第四纪地质国家重点实验室基金项目 (SKLLQG0016); 中国博士后基金项目.

作者简介: 马利民 (1968~), 男, 博士后, 从事生物地球化学研究.

收稿日期: 2002-09-21; 修订日期: 2002-11-18

素的同位素的分馏,通过研究植物中稳定同位素的变化情况,就能了解过去环境中降水同位素的组成、降水量、温度和湿度等的变化情况^[6~10]。其中,树木年轮中碳同位素的研究是该领域的一个重要的研究内容,树木年轮中的稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)含量和环境的关已在全世界广泛开展,取得了一些重要成果^[11~16]。环境要素和树轮稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)含量的关系比较复杂,有些因素是全球性的,有一些是局部因素。我国在这方面的研究开展得比较少^[17~20],作为全球环境系统的一部分有必要进行进一步地研究。本文通过贺兰山树木年轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 和环境要素关系的研究,揭示它们之间的内在联系,为今后进一步利用树轮资料重建过去环境要素打好基础,同时为全球环境变化的研究提供基础数据。

1 材料和方法

研究所用树轮同位素样品取自于贺兰山西坡的腰坝沟,取样点位于内蒙古阿拉善左旗境内(MHL04, $38^{\circ}31' \text{N}$, $105^{\circ}46' \text{E}$),海拔高度2400~2500 m。取样点地势险峻,高低起伏相差较大,地势较开阔。样品取自山坡上的次生天然林中,油松(*Pinus tabulaeformis*)为林中主要树种,参杂生长有少量青海云杉和山杨等。采样点森林郁闭度较小,地面土壤层厚10~20 cm,植被稀疏,坡度30~60°。样本多采自生长在贫瘠土壤,甚至岩石缝隙中的孤树,采样树种以油松为主。

将样品风干、打磨,进行交叉定年,确定了每轮的生长年代。在没有碳污染的环境中,用不锈钢刀在显微镜下逐轮剥离,干燥,然后粉碎至60目,提取纤维素^[17,*,21~24]。所有样品测试在中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室MAT-251质谱仪上完成。实验系统误差小于0.2‰。树轮纤维素碳同位素组成以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 表示,定义为:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{样品}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{标准}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{标准}} \times 1000} \right] \text{‰} \quad (1)$$

从图1中可以看出,1950年以来树轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 的含量为下降趋势,其中最高为

-20.423‰,最低为-23.259‰。

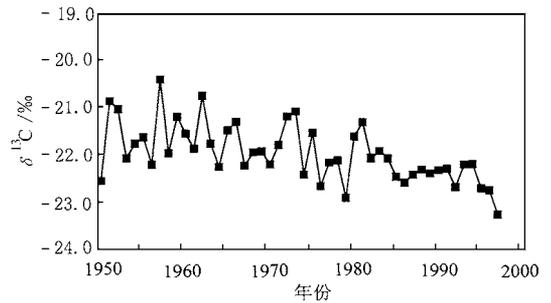


图1 贺兰山1950年来树木年轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化序列

Fig.1 Tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ chronology from Mt. Helan since 1950

2 树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 和大气中 CO_2 含量的关系

植物生长的过程中,碳的主要来源为光合作用所固定的大气中的 CO_2 。植物在光合作用和呼吸作用同化大气中的 CO_2 的过程中,会引起碳同位素的分馏。不同固碳类型的植物(C_3 、 C_4 、CAM等),其固碳能力不同,引起的同位素分馏也不同。本文所研究的油松(*Pinus tabulaeformis*)为 C_3 植物,其将 CO_2 合成复杂的高分子纤维素时,要经历一系列复杂的生物、化学过程,尽管到目前为止还不能精确描述这一过程的各个细节,但在总体上已有基本的认识。

Francey和Farquhar(1982)从植物生理学的角度解释了 $\delta^{13}\text{C}$ 意义,认为植物中稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 是大气 CO_2 浓度(c_a)、植物同化速率(A)和叶片气孔导度(g)的函数。而同化速率 A 和气孔导度与气候要素,如温度、湿度、降水、光照及风等有关。在干旱、半干旱区,极度的干旱会引起植物叶片的气孔关闭, CO_2 浓度(c_i)减少,因此在干旱年形成的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值更大,宽度较小;相反,较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 反应充沛的降水、较低的温度,而该年形成的年轮宽度也较大。该模式经过White等(1994)完善成模型为:

$$\delta^{13}\text{C} = \delta^{13}c_a - a - (b - a)c_i/c_a \quad (2)$$

* 马利民,贺兰山环境变化的树轮宽和稳定碳同位素记录,博士论文,中国科学院地球环境研究所,2001。

其中, a 为二氧化碳从气孔进入叶片引起的分馏值, 为 4.4‰ ; b 为羟化阶段引起的碳同位素分馏值, 为 30‰ ; $\delta^{13}\text{C}_a$ 为叶片周围空气二氧化碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值; c_a 和 c_i 分别为空气和叶片间隙二氧化碳的浓度. 且

$$c_i = c_a - A/g \quad (3)$$

其中, A 为植物 CO_2 同化速率, g 为叶片气孔导度或:

$$A = (c_a - c_i) \times r \quad (4)$$

其中, $r = r_a + r_d + r_m$, r_a 为 CO_2 的扩散阻抗, 它是大气边界阻尼系数 r_a , 气孔阻抗 r_d 及叶肉阻抗 r_m 的总和. A 受到一系列环境因子如光照、温度、水分、大气 CO_2 浓度、营养条件等的影响.

从图 2 中可以看出, 树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为明显下降的趋势, 而同时大气中 CO_2 浓度的实测值^{**} 却是稳定的上升趋势. 从长时间尺度来看, 树木年轮中的 $\delta^{13}\text{C}$ 虽和环境中的气温、降水等多种因素有关, 但是在树木的立地条件, 环境中的气温、降水等因素无明显趋势性的变化情况下, 树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 这种下降的趋势应该是和大气中 CO_2 浓度的趋势性变化密切相关的. 它们之间的量化关系比较复杂, 其研究内容涉及生物圈和大气圈的碳平衡、全球碳循环等一系列复杂的问题, 需要进一步地大量研究来阐明^[12]. 工业革命以来大气中 CO_2 浓度的持续增加主要是由人类的过量排放所引起

表 1 贺兰山树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 序列和逐月平均气温的相关分析

Table 1 The correlation coefficient matrix between monthly mean temperature and tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ chronology

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	6~8
r	0.004	-0.083	0.365	-0.052	-0.060	0.252	0.122	0.439 ¹⁾	-0.044	-0.369	-0.055	-0.110	0.427 ¹⁾

1) 数据为显著相关(置信度超过 95%) ; r 为相关系数.

α 树轮纤维素中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值越高. 相反, 如当年 6~8 月的平均气温越低, 当年树轮 α 树轮纤维素中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值就越低. 6~8 月正是植物生长最快的季节, 外界环境对植物中稳定碳同位素的影响最为明显.

4 树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 和降水的关系

水分是自然界中植物生长的重要制约因

的, 因此, 人类活动对树木年轮中的 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响是不容置疑的.

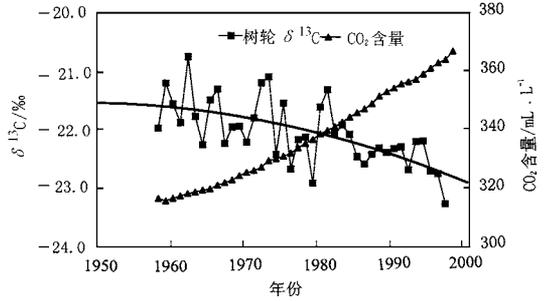


图 2 贺兰山树轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 和大气中 CO_2 长期变化的比较

Fig. 2 The comparison of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ chronology and long trends of CO_2 composition in the atmosphere

3 树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和温度的关系

为分析树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和温度的关系, 将树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 序列和环境中的实测月平均气温进行了相关分析. 经过比较, 气象数据选用离取样点很近的 (2km)、且海拔高度和取样点位置相当的贺兰山高山气象站 ($38^{\circ}46' \text{N}$, $105^{\circ}54' \text{E}$, 海拔 2901 m) 的实测气象数据. 该站位于贺兰山东坡近山顶, 观测资料从 1961 年 7 月开始, 至 1990 年 12 月, 气象资料经均匀分布和突变检验可靠后, 用以相关分析^[17, * 1].

分析结果表明(表 1), 树轮测量 $\delta^{13}\text{C}$ 值序列和当年 6~8 月的平均气温显著正相关 ($r = 0.427$, $\alpha = 0.05$), 即平均气温越高, 当年树轮

素, 贺兰山植物生长所需要的水分主要有大气降水供给, 降雨量的多少会影响植物的生长和植物碳同位素的分馏. 将实测贺兰山树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 序列和逐月总降水量进行相关分析, 来

** 资料来自美国夏威夷 Mauna Loa 观测站年观测值, 资料来源: <http://www.ncep.noaa.gov>.

寻找它们之间的关系.降水量数据也选用离取
样点很近的贺兰山高山气象站的实测气象
数据.

分析结果表明(表 2),树轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 原始测
量值序列和当年 1~7 月的总降水量显著负相

关($r = -0.515, \alpha = 0.05$),即降水量越大,当
年树轮 α 树轮纤维素中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值越低.相反,
如当年 1~7 月的总降水量越少,当年树轮 α 树
轮纤维素中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值就越高.

贺兰山地处西北干旱地区,植物生长和降

表 2 贺兰山树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 序列和逐月总降水量相关分析

Table 2 The correlation coefficient matrix between monthly precipitation and tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ chronology

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1~7
r	-0.030	-0.297	-0.072	-0.096	-0.206	-0.449 ¹⁾	-0.306 ¹⁾	-0.024	0.044	0.377	0.138	0.034	-0.515 ¹⁾

1) 数据为显著相关(置信度超过 95%); r 为相关系数.

水量关系密切,特别是与 1~7 月的总降水相
关系数达 -0.515,说明在干旱区,1~7 月正是树
木的生长期,降水量的大小直接影响植物的新
陈代谢强度,会引起植物固碳能力的不同,从而
影响了植物纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 的值.

5 树轮纤维素中 $\delta^{13}\text{C}$ 和太阳黑子活动之间的关系

太阳最底层的大气称为光球,太阳黑子是
光球上相对较暗的地区,它的温度比光球温度
低 1500 K,黑子是太阳活动的一个重要标志.太
阳活动的强弱可用太阳黑子的相对数目来表
示.1848 年吴尔夫发现太阳黑子具有 11.1 年
的平均周期.1908 年海尔发现太阳黑子 22 年
的磁性周期.此外,还发现太阳黑子有 90 年、
180 年的周期^[25].尽管太阳黑子的周期性及其
本质,至今尚未得到很好的解释,但是太阳辐
射和太阳大气发生的各种物理过程,都在直接
或间接地影响着地球,如红外线可以影响地球
表面和大气温度,可见光提供地球植物光合作
用的能量,紫外线影响着地球的电离层等等.

在植物固碳的光合作用中,太阳光是主要
的能量来源,太阳辐射强度的变化也会影响树
轮 $\delta^{13}\text{C}$,为了评价太阳活动对树轮纤维素碳稳
定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 影响,本研究将贺兰山树轮纤
维素碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值和太阳黑子活动周
期表进行了对比(图 3).

对比发现,部分太阳黑子活动最强的年份
往往对应较高的树轮纤维素碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$
值.周期分析表明,树轮纤维素碳稳定同位素的

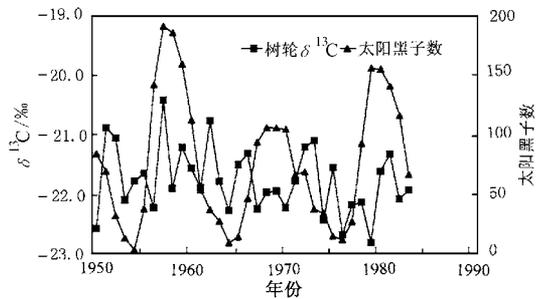


图 3 贺兰山树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值和太阳黑子活动周期表对比

Fig. 3 Comparison of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ chronology and the number of sunspot

变化具有明显的 12 年左右的周期*,这和太阳
黑子的 11.1 年的平均周期可能有一定的联系.
利用树木年轮宽度来研究太阳黑子的活动已有
较长的历史,20 世纪 20 年代现代树轮气候学
的奠基人 A. E. Douglass 就开展过这方面的研
究工作,由于其关系比较复杂,至今尚未取得重
大突破.树轮纤维素碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值和太
阳黑子活动的联系,涉及植物的光合作用、植
物体碳同位素的分馏以及太阳黑子对太阳辐
射的影响等许多复杂的问题,其内在联系需要
进一步研究.

6 结论

贺兰山油松树轮纤维素稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$
的年际变化和过去环境变化关系密切.研究发
现,1950 年以来树轮纤维素稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$
值呈现下降的趋势,其中,树轮纤维素中稳定碳
同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 序列和油松生长年 1~7 月的总降
水量显著负相关,而和当年 6~8 月的平均气温

显著正相关. 研究树轮纤维素稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值和太阳黑子之间的关系, 发现部分太阳黑子活动最强的年份往往对应较高的树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 树轮纤维素稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值有明显 12 年左右的周期变化. 作为天然的环境监测器, 树木年轮和周围环境之间的关系以及利用这种内在联系研究过去环境变化方面具有巨大的潜力, 有许多工作值得进一步开展.

致谢: 研究得到了美国亚利桑那大学的 S. W. Leavitt 教授、中国科学院南京地理及湖泊研究所王苏民、沈吉、钱君龙教授、中国科学院地球环境研究所刘卫国副研究员、曹蕴宁女士、贺兰山国家自然保护区马振山和吕海军先生等的帮助, 在此表示诚挚感谢.

参考文献:

- 1 Briffa K R. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 1998, **391**: 678 ~ 682.
- 2 Fritts H C, Swetnam T W. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environment. *Advances in Ecology Research*, 1989, **28**: 857 ~ 862.
- 3 Jacoby G C, Sheppard P R, Sleh K L. Irregular recurrence of large earthquakes along San Andreas Fault: evidence from trees. *Science*, **141**: 1996 ~ 1999.
- 4 LaMarch V C Jr, Hirschboeck K K. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature*, **307**: 121 ~ 126.
- 5 Shaun Watmough, Tom Brydges, Tom Hutchinson. The Tree-ring Chemistry of Declining Sugar Maple in Central Ontario, Canada. *AMBIO*, 1999, **28**(7): 612 ~ 617.
- 6 Leavitt S W, Long A. Seasonal stable-carbon isotope variability in tree rings possible paleoenvironmental signals. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Science)*, 1991, **87**: 59 ~ 70.
- 7 Lipp J Trimbom, P Fritz P et al. Stable isotopes in tree ring cellulose and climate change. *Tellus*, 1991, **43B**: 322 ~ 330.
- 8 February E C, Stock W D. Declining trend in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric carbon dioxide from tree ring of South African Widdringtonia Cedarbergensis. *Quat. Res.*, 1999, **52**: 229 ~ 236.
- 9 Sauver M, Borella S, Leuenberger M. $\delta^{18}\text{O}$ of tree ring of beech (*Fagus sylvatica*) as a record of $\delta^{18}\text{O}$ of growthy season precipitation. *Tellus*, 1997, **49B**(1): 80 ~ 92.
- 10 Feng X, Epstein S. Climatic temperature records in δD data from tree rings. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, **59**(14): 3029 ~ 3037.
- 11 Stuiver M, Braziunas T F. Isotopic and solar records in bloble changes of the past. *Snawmass, Colorado*: 1989. 225 ~ 244.
- 12 Stuiver M, Bruk R L, Quay P D. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio in tree rings and the transfer of biospheric carbon to the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 11731 ~ 11784.
- 13 Francey R J, Farquhar G D. An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings. *Nature*, 1982, **297**: 28 ~ 31.
- 14 Freyer H D, Belacy N. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ records in northern hemispheric trees during the past 500 years—anthropogenic impact and climatic superposition. *Jour. Geophys. Res.*, 1983, **88**: 6844 ~ 6852.
- 15 Leavitt S W, Long A. Drought indicated in carbon-13 / carbon-12 ratio of southwestern tree rings. *Water Resources Bulletin*, 1989, **25**: 341 ~ 347.
- 16 Leavitt S W, Long A. An atmospheric $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ reconstruction generated through removal of climatic effects from tree ring $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ measurement. *Tellus*, 1983, **35B**: 92 ~ 102.
- 17 刘禹, 马利民, 蔡秋芳等. 采用树轮稳定碳同位素重建贺兰山 1890 年以来夏季 (6 ~ 8 月) 气温. *中国科学 (D)*, 2002, **32**(8): 667 ~ 672.
- 18 刘禹, 吴祥定, 邵雪梅等. 树轮密度、稳定 C 同位素对过去 100 年陕西黄陵的季节气温与降水的恢复. *中国科学 D 辑*, 1996, **27**(3): 271 ~ 277.
- 19 钱君龙, 吕军, 屠其璞等. 用树轮 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 重建天目山地区近 160 气候. *中国科学 (D 辑)*, 2001, **31**(4): 333 ~ 341.
- 20 李正华, 刘荣谟, 安芷生等. 树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 季节性变化及其气候意义. *科学通报*, 1995, **40**(22): 2064 ~ 2067.
- 21 Leavitt S W, Danzer S R. Method for batch processing small wood samples to holocellulose for stable-carbon isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 1993, **65**: 87 ~ 89.
- 22 刘荣谟等. 咸阳古冷杉树轮宽度及稳定同位素比值测定. *第四纪研究*, 1989, **1**: 26 ~ 28.
- 23 轻工业部造纸研究所. 造纸原料综合纤维素含量测定. GB2677, 10 - 81, 中国标准出版社, 1981. 250 ~ 251.
- 24 轻工业部造纸研究所. 化学纸浆甲种纤维素的测定. GB744-79, 中国标准出版社, 1981.
- 25 许道一, 杨正宗, 张勤文等. 天文地质学概论. 北京: 地质出版社, 1983. 50 ~ 92.