



我国旱作农业黍、粟植硅体碳封存潜力估算

左昕昕^{①②}, 吕厚远^①

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: zuoxinxin@live.cn

2011-04-28 收稿, 2011-07-08 接受

中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130602)和国家自然科学基金(4107113)资助项目

摘要 植硅体是植物在生长过程中沉淀在细胞内的非晶质二氧化硅矿物, 在其沉淀过程中能够封存部分植物细胞的有机碳, 植物死亡、腐烂、燃烧后, 植硅体及其封存碳会被长期保存于土壤或沉积物中, 而这一部分碳封存量在陆地生态系统碳循环研究中一直没有得到计算. 黍、粟是我国北方新石器时代以来典型的旱作农作物, 是研究人类活动影响陆地碳循环平衡的重要材料, 通过湿式灰化法提取 8 种现代黍、粟植硅体并对其植硅体封存的碳含量进行测定, 计算了黍、粟干物质产量、植硅体产量及碳封存量, 结果表明: (1) 黍和粟的植硅体碳含量分别占其干物质质量的 $0.136\% \pm 0.070\%$ 和 $0.129\% \pm 0.085\%$; (2) 根据黍和粟近 10 年平均粮食产量计算, 中国的黍和粟植硅体碳封存速率平均值分别为 0.020 ± 0.010 和 $0.023 \pm 0.015 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 以粟植硅体的高碳封存速率 $0.038 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以及目前全国的旱作农业 $62.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的种植规模计算, 每年将通过旱作植硅体封存约 $2.37 \times 10^6 \text{ t CO}_2$; (3) 1949~2008 年间, 尽管我国粟种植面积和产量逐年减少, 仅粟植硅体累积封存了约 $7 \times 10^6 \text{ t CO}_2$. 植硅体碳有可能是生物地球化学循环中丢失碳汇的一部分, 研究不同农作物植硅体封存碳含量, 可以客观认识人类活动对碳循环变化的影响.

关键词

植硅体
旱作农业
碳封存
植硅体碳

碳循环是生物地球化学循环最活跃的循环之一, 受到了国际地圈生物圈计划等科学研究组织的重点关注, 成为全球变化研究中的热点^[1~4]. 碳循环研究中, 碳汇研究最具有不确定性, 特别是对 CO_2 失汇现象, 当前学术界有不同的解释^[5~8]. 理论上讲, 大气、海洋和陆地是 3 个可能的碳库. 目前对这部分 CO_2 失汇的研究一般认为存在于陆地生态系统^[9], 其地域最有可能是北半球中纬度地区^[10]. 陆地生态系统中土壤圈因其本身就是一个巨大的有机碳库, 其微小的环境变化会显著影响碳汇大小和分布^[11], 成为可能的碳汇之一^[12], 在减少碳汇不确定性方面具有深入探索的潜力和重要的研究空间^[13].

植硅体是植物生长过程中沉淀在植物细胞腔内或细胞间的非晶质二氧化硅矿物^[14,15], 植硅体碳(PhytOC)或植硅体封存碳, 是植硅体在形成过程中

封存的植物细胞内的有机碳^[16], 随植物的死亡及其有机质残体分解, 植硅体碳可以随植硅体长期存在于土壤和沉积物中, 在第三纪^[17]乃至晚白垩纪的地层中都有发现^[18]. 最近的研究表明, 全球竹林每年会通过植硅体长期封存 $15.6 \times 10^6 \text{ t CO}_2$, Parr 等人^[19]研究认为如果全球 $4.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 的潜在耕地都选择种竹子(或与竹子有相当植硅体碳封存潜力的作物), 按照中等的植硅体碳封存速率($0.36 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 全球植硅体碳封存量将达到每年 $1.5 \times 10^9 \text{ t CO}_2$. 这一碳封存速率将有效的减少全球 CO_2 排放量, 其占当前增加大气 CO_2 排放量的 11%^[19], 可见土壤里的植硅体封存碳可能是难以分解的有机物中的一员^[20], 其在陆地碳循环中的重要性已经逐渐被学术界关注^[21].

较早开展植硅体碳研究的学者对植硅体碳的物理化学性质以及其在植硅体中含量进行了研究, 并

发现部分植硅体碳含量占植硅体重量的 0.2%~5.78%左右^[22~25]. 当前对于植硅体的研究主要集中于古环境与古气候重建^[26~29]、农业考古^[30~32]、植硅体放射性定年^[23,24]、碳同位素研究^[33~35]以及植物分类学^[36,37]等方面, 对不同植物植硅体含量以及植硅体碳含量研究相对较少. 尽管当前已经有对竹子和甘蔗等植硅体碳封存的研究^[19,38], 但对于其他富含植硅体的禾本科植物如高粱(*Sorghum bicolor*)、水稻(*Oryza sativa*)、黍(*Panicum miliaceum*)和粟(*Setaria italica*)等, 其植硅体碳含量的研究目前尚处于空白.

传统观点认为作为草本植物的农作物, 茎秆等有机物质会快速腐烂分解, 其碳汇为零^[39], 忽视了农作物(以及其他草本植物)植硅体封存的碳. 考虑到中国广阔的耕地面积以及悠久的农作物栽培历史, 开展农作物植硅体碳研究, 清算过去农业活动碳汇并重新估计当前农业碳汇潜力, 可以为探索丢失碳汇的去向和国际气候谈判提供更多的科学依据. 本文以黍和粟作为研究对象, 目的在于分析其植硅体碳含量并对其植硅体碳封存速率进行估算, 最后利用以黍、粟为代表的旱作作物植硅体碳含量初步估算了中国旱作农业的植硅体碳封存潜力.

1 材料与方法

本文所选 8 个品种的黍(*Panicum miliaceum*)和粟(*Setaria italica*)植物样品分别采自于北京、甘肃以及辽宁 3 地(表 1). 采集成熟的黍、粟整株样品. 去除根部, 选择每株根部以上样品(包含完整的茎、叶和穗等)进行分析. 首先用蒸馏水辅以超声波(20 min, 100 Hz)对每株样品清洗 2 次, 然后以 70℃烘干(24 h), 最后搅碎样品, 使其充分混合. 每种黍和粟各分析 4 份

样品.

现代植物植硅体提取方法前人已有描述^[15,40], 本文采用传统成熟的湿式灰化法, 并略有修改, 旨在完全氧化样品中的有机质, 具体步骤如下: ① 用高精度天平(精确度 0.01 mg), 定量称取 1 g 左右烘干搅碎的样品, 放入试管中, 待氧化; ② 往试管中加入 5 mL 浓硝酸(65%)氧化植物有机质, 将试管放入沸水中加热, 直至反应完全停止, 离心, 用蒸馏水清洗干净(每次离心时间均为 5 min, 3000 转/min); ③ 加入 5 mL 浓度为 10%盐酸, 将试管在 80℃水中加热 30 min, 离心, 清洗; ④ 再次向清洗完毕的样品中加入 5 mL 浓硝酸(65%), 加热, 确保有机质被全部去除, 离心, 清洗; ⑤ 向清洗完毕的样品中加入 5 mL 浓硫酸, 并放入沸水中热浴 1 h; ⑥ 冷却试管至室温, 然后加热, 并向试管中缓慢注入浓度为 30%双氧水, 进一步氧化, 直至试管中液体澄清; ⑦ 用蒸馏水清洗 4 次, 将样品放入烤箱 70℃烘 24 h.

称取烘干的样品并减去试管空重得到植硅体含量. 对处理后的样品制作固定片, 使用奥林巴斯显微镜检查样品中植物有机物质是否被完全氧化. 如图 1 所示, 湿式灰化法去除了样品中其他有机质. 植硅体碳含量采用德国 Elemental Analyzer vario EL 元素分析仪测定, 每个样品测试 2 次. 测定工作在北京大学分析测试中心完成.

2 结果

如表 2 所示, 黍和粟的植硅体含量变化范围在 3.027%~18.787%之间. 8 种黍和粟的植硅体碳含量变化也比较明显, 其含量在 0.88%~4.775%之间. 黍的植硅体碳含量平均为 2.51%, 高于粟的平均含量 1.920%. 对黍和粟植硅体碳含量/干物质与其植硅体含量进行相关分析, 发现二者不存在相关性($P=0.071$, $R^2=0.105$), 而植硅体碳含量/干物质与植硅体碳含量具有显著的相关性($P<0.01$, $R^2=0.434$).

3 讨论

3.1 植硅体与植硅体碳含量

不同植物的植硅体含量存在较大差异, 一般认为被子植物植硅体含量要高于裸子植物, 而在被子植物里, 隶属单子叶植物的禾本科植物植硅体含量较高^[41]. 是否不同植物其植硅体碳含量也存在差异

表 1 黍、粟采样地点及样本数量

黍、粟 编号	黍、粟种类	采样地点	样本 数量
甘肃粟	<i>Setaria italica</i> Gansu	甘肃省西峰区	4
辽宁粟 A	<i>Setaria italica</i> Liaoning A	辽宁省绥中县	4
辽宁粟 B	<i>Setaria italica</i> Liaoning B	辽宁省绥中县	4
北京粟	<i>Setaria italica</i> Beijing	北京市门头沟区	4
甘肃黍 A	<i>Panicum miliaceum</i> Gansu A	甘肃省西峰区	4
甘肃黍 B	<i>Panicum miliaceum</i> Gansu B	甘肃省西峰区	4
辽宁黍	<i>Panicum miliaceum</i> Liaoning	辽宁省绥中县	4
北京黍	<i>Panicum miliaceum</i> Beijing	北京市门头沟区	4

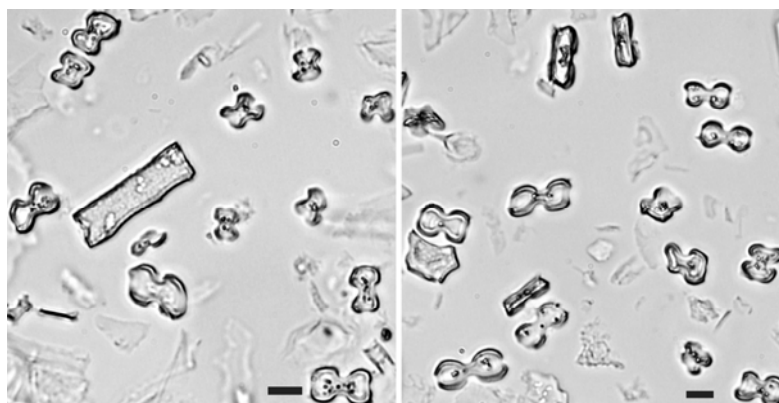


图 1 植硅体透射光照片
两图都为粟植硅体, 标尺为 10 μm

表 2 黍和粟样品干重、植硅体含量、植硅体百分含量、植硅体碳含量与植硅体碳含量植物干物质产量比值

粟和黍样品编号	样品干重(g)	植硅体含量(g)	植硅体百分含量(%)	植硅体碳百分含量(%)	植硅体碳占干物质百分含量(%)
甘肃粟-1	1.079	0.049	4.541	4.775	0.217
甘肃粟-2	1.075	0.058	5.395	2.085	0.112
甘肃粟-3	1.051	0.063	5.994	2.59	0.155
甘肃粟 4	1.040	0.042	4.038	4.605	0.186
辽宁粟 A-1	1.035	0.065	6.280	1.03	0.065
辽宁粟 A-2	1.014	0.065	6.410	1.17	0.075
辽宁粟 A-3	1.010	0.060	5.941	1.005	0.060
辽宁粟 A-4	1.033	0.065	6.292	0.97	0.061
辽宁粟 B-1	1.050	0.061	5.810	1.06	0.062
辽宁粟 B-2	1.015	0.076	7.488	0.98	0.073
辽宁粟 B-3	1.012	0.063	6.225	1.12	0.070
辽宁粟 B-4	1.037	0.106	10.222	1.15	0.118
北京粟-1	1.058	0.094	8.885	0.94	0.084
北京粟-2	1.004	0.142	14.143	0.88	0.124
北京粟-3	1.059	0.138	13.031	1.85	0.241
北京粟-4	1.073	0.086	8.015	4.515	0.362
粟平均		0.077±0.029	7.419±2.860	1.920±1.427	0.129±0.085
甘肃黍 A-1	1.054	0.050	4.744	2.92	0.139
甘肃黍 A-2	1.019	0.048	4.711	4.62	0.218
甘肃黍 A-3	1.017	0.055	5.408	3.665	0.198
甘肃黍 A-4	1.014	0.043	4.241	3.05	0.129
甘肃黍 B-1	1.037	0.044	4.243	3.86	0.164
甘肃黍 B-2	1.033	0.038	3.679	3.39	0.125
甘肃黍 B-3	1.041	0.042	4.035	2.95	0.119
甘肃黍 B-4	1.014	0.041	4.043	4.635	0.187
辽宁黍-1	1.022	0.192	18.787	1.45	0.272
辽宁黍-2	1.009	0.147	14.569	1.495	0.218
辽宁黍-3	1.015	0.058	5.714	1.815	0.104
辽宁黍-4	1.002	0.088	8.782	1.245	0.109
北京黍-1	1.024	0.031	3.027	1.345	0.041
北京黍-2	1.034	0.043	4.159	1.295	0.054
北京黍-3	1.020	0.034	3.333	1.215	0.040
北京黍-4	1.036	0.049	4.730	1.21	0.057
黍平均		0.063±0.044	6.138±4.384	2.51±1.265	0.136±0.070

以及是什么因素控制着这种差异, 目前还没有得到完全的解答. 对前一问题的研究不是本文的研究重点, 但通过对 8 种黍和粟的植硅体碳含量/干物质与其植硅体含量统计分析, 发现二者之间不具有显著的相关关系($P=0.071$, $R^2=0.105$), 而黍和粟的植硅体碳含量/干物质则与植硅体中封存的碳含量相关($P<0.01$, $R^2=0.434$). 对小麦植硅体的研究也得出了同样的结论^[42], 这可能证实了植物的植硅体碳含量并不完全由植硅体含量多少决定, 而与其植硅体本身的固碳能力和效率相关^[19].

封闭在植硅体颗粒中的这部分碳, 随植物死亡而与植硅体长期沉积于土壤中. 在土壤碳库计算中, 常规的土壤有机碳分析方法如燃烧法和铬酸法^[43,44]无法检测到植硅体中封存的碳含量. 前人在测定植硅体碳含量时曾利用电子探针法^[45]. 其得到的结果仅仅是电子束激发区域内的信息, 因此测定的样品某种元素总含量是不准确的, 表现为得出部分植物植硅体局部区域的碳含量高达 30%. 本文所用元素分析仪采用动态燃烧法分解样品, 其温度超过 1000℃, 植硅体完全分解, 其中碳成分可以充分燃烧, 从而被仪器测定.

3.2 黍和粟植硅体碳封存量的计算

黍和粟是东亚干旱-半湿润地区重要的粮食作物^[46], 它们是以中国北方黄河中游的旱作农业区为中心最早被驯化的农作物^[47]. 迄今为止, 仍然是中国北方干旱半干旱地区的主要粮食作物. 由于二者生理特性和栽培条件相似, 因而其种植和分布范围多有重合^[48]. 根据中国农业统计资料, 2007 年全国粟种植面积约 $83.89 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 左右, 总产量为 $1.507 \times 10^6 \text{ t}$ ^[49]. 根据中国小杂粮产业发展报告, 黍的常年种植面积约 $1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[50], 年产量约 $1.5 \times 10^6 \text{ t}$ ^[51].

在计算每年单位面积农作物植硅体碳封存量中, 准确计算生物量至关重要. 粮草比, 即某种农作物单位面积籽粒产量与秸秆产量比值, 常被用于作物地上净初级生产量估计^[52,53]. 由于当前详细的粟、黍生物量的研究较少, 本文利用我国已有黍粟粮食产量和粮草比(或谷草比)估计单位面积作物秸秆产量, 进而估计单位面积作物的生物量.

粟粮草比来自于前人对全国 300 个地点的农作物资料的统计, 其平均值为 0.62^[54], 以 1999~2008 年全国平均粟产量 1.83 t/hm^2 计算^[49], 相对应每公顷粟

的生物量(秸秆+粮食)为 4.789 t , 粟的植硅体碳平均封存量为 $0.023 \pm 0.015 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 最高封存量为 $0.038 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. 通过统计 442 个品种的黍的粮草比^[55], 平均值为 0.58, 以平均粮食产量为 1.5 t/hm^2 计算^[51], 黍的生物量为 4.086 t/hm^2 , 其植硅体碳平均封存量为 $0.020 \pm 0.010 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. 与甘蔗植硅体碳封存量($0.12 \sim 0.36 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)相比^[38], 黍和粟的植硅体碳封存量较小, 这可能与它们的植硅体碳含量和生物量的大小有关.

Parr 等人^[16]通过对位于巴布新几内亚西不列颠省纳姆度(Numundo)地区的火山灰和古土壤互层中有机碳和植硅体碳研究, 发现经过 2 千多年的分解, 植硅体碳所占土壤碳的比例由表土不到 10%, 上升到 2 千多年前的 82%(图 2), 因此包括黍和粟, 其他植物植硅体对碳的封存都是一个长期的累积过程. 参照 1949~2008 年间粟产量变化(<http://www.sannong.gov.cn>), 以粮草比(0.62)和最高植硅体碳占干物质的比值 0.214%($0.129\%+0.085\%$)计算过去 60 年以来粟植硅体碳封存量变化, 60 年共封存约 $7 \times 10^6 \text{ t CO}_2$ (图 3), 可以抵消 $2.69 \times 10^6 \text{ t}$ 标准煤燃烧所排放的 CO_2 . 如图 3 所示, 1949 年以来粟植硅体碳的年封存量大体上呈减少趋势, 这与粟作物种植面积缩小的趋势是一致的, 小麦等同样具有植硅体碳封存能力的旱作作物仍然在封存大气中的 CO_2 .

以 2006 年底全国耕地面积为 $130 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 计算^[56], 我国旱作农业耕地占全国耕地面积的 48% ($62.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$)^[57], 若所有旱作农业区耕地都种植与粟或黍具有相当植硅体碳封存量的作物, 以本研究中

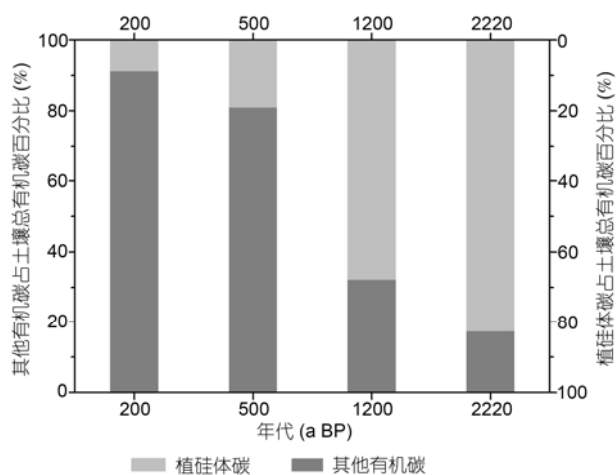


图 2 纳姆度地区土壤中植硅体碳和其他有机碳含量变化^[16]

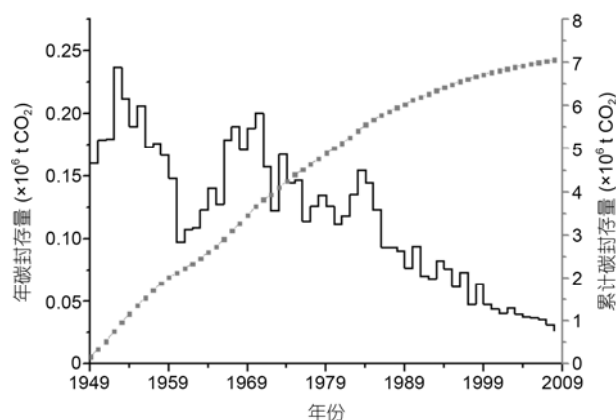


图3 1949~2008 粟植硅体碳封存量变化

粟的高封存速率 $0.038 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 计算, 整个旱作农业作物植硅体碳每年可封存约 $2.37 \times 10^6 \text{ t CO}_2$. 虽然很早就有学者发现植硅体里封闭部分碳^[58], 但一直以来忽视了其对碳循环研究的重要性. 深入理解

植硅体碳的封闭机制并研究不同植物植硅体碳含量将有助于我们准确估算全球植硅体碳封存速率.

4 结论

传统观点认为, 农作物以及草本植物的有机物质会快速分解, 其碳汇为零, 新的研究发现农作物(以及其他草本植物)植硅体中封存了大量的碳. 在碳平衡研究中, 富含植硅体的农作物(如禾本科作物)其碳封存效应都不容忽视. 中国的旱作农业黍和粟, 其植硅体碳封存量分别为 0.020 ± 0.010 和 $0.023 \pm 0.015 \text{ t CO}_2 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 1949~2008 年期间, 通过粟植硅体碳共封存约 $7 \times 10^6 \text{ t CO}_2$, 大约可以抵消 $2.69 \times 10^6 \text{ t}$ 标准煤燃烧排放的 CO_2 . 以黍粟植硅体碳封存量估算中国北方旱作农业每年将封存约 $2.37 \times 10^6 \text{ t CO}_2$, 农业活动与碳平衡的关系是复杂的, 现有陆地生态系统碳汇研究并未考虑通过植硅体封存的碳, 是潜在的还没有被完全认知的碳封存方式, 拥有很大的封存潜力.

致谢 山东大学靳桂云教授和《第四纪研究》编辑部田万华老师协助样品采集; 中国科学院地质与地球物理研究所吴海斌研究员对本工作给予的建议和中国科学院地理科学与资源研究所吴文祥副研究员提供的黍粮食产量资料; 与澳大利亚南十字大学 Jeffrey F. Parr 教授和威灵顿维多利亚大学 John A. Carter 博士就实验方法进行了交流, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 2000, 290: 291–296
- 2 Schimel D. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biol*, 1995, 1: 77–91
- 3 Kosten S, Roland F, Da Motta Marques D M L, et al. Climate-dependent CO_2 emissions from lakes. *Global Biogeochem Cycles*, 2010, 24: GB2007
- 4 Post W, Peng T, Emanuel W, et al. The global carbon cycle. *Amer Sci*, 1990, 78: 310–326
- 5 Gifford R. The global carbon cycle: A viewpoint on the missing sink. *Funct Plant Biol*, 1994, 21: 1–15
- 6 Houghton R A, Davidson E A, Woodwell G M. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Glob Biogeochem Cycl*, 1998, 12: 25–34
- 7 Field C B. Plant physiology of the “Missing” carbon sink. *Plant Physiol*, 2001, 125: 25–28
- 8 Clark D A. Are tropical forests an important carbon sink? reanalysis of the long-term plot data. *Ecol Appl*, 2002, 12: 3–7
- 9 Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292: 2316–2320
- 10 Siegenthaler U, Sarmiento J L. Atmospheric carbon-dioxide and the ocean. *Nature*, 1993, 365: 119–125
- 11 方精云, 郭兆迪. 寻找失去的陆地碳汇. *自然杂志*, 2007, 29: 1–6
- 12 Harrison K, Broecker W, Bonani G. A strategy for estimating the impact of CO_2 fertilization on soil carbon storage. *Glob Biogeochem Cycle*, 1993, 7: 69–80
- 13 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO_2 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. *植物生态学报*, 2001, 25: 594–602
- 14 Rovner I. Plant opal phytolith analysis: Major advances in archaeobotanical research. In: Schiffer M B, ed. *Advances in Archaeological Method and Theory* Vol. 6. New York: Academic Press, 1983. 225–266
- 15 Piperno D. *Phytoliths: A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists*. London: Altamira Press, 2006. 117–124

- 16 Parr J F, Sullivan L A. Soil carbon sequestration in phytoliths. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 117–124
- 17 Strömberg C. Using phytolith assemblages to reconstruct the origin and spread of grass-dominated habitats in the great plains of North America during the late Eocene to early Miocene. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2004, 207: 239–275
- 18 Prasad V, Strömberg C, Alimohammadian H, et al. Dinosaur coprolites and the early evolution of grasses and grazers. *Science*, 2005, 310: 1177
- 19 Parr J, Sullivan L, Chen B, et al. Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species. *Glob Change Biol*, 2010, 16: 2661–2667
- 20 Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle. *J Ecol*, 2004, 92: 189–202
- 21 Oldenburg C M, Torn M S, DeAngelis K M, et al. Biologically Enhanced Carbon Sequestration: Research Needs and Opportunities. Report on the Energy Biosciences Institute Workshop on Biologically Enhanced Carbon Sequestration, 2008
- 22 Jones R L, Beavers A H. Aspects of catenary and depth distribution of opal phytoliths in Illinois soils. *Soil Sci Soc Amer J*, 1964, 28: 413–416
- 23 Wilding L P, Brown R E, Holowaychuk N. Accessibility and properties of occluded carbon in biogenetic opal. *Soil Sci*, 1967, 103: 56–61
- 24 Mulholland S, Prior C. AMS radiocarbon dating of phytoliths. *MASCA Res Pap Sci Archaeol*, 1993, 10: 21–23
- 25 Smith F, Anderson K, Meunier J, et al. Characterization of organic compounds in phytoliths: Improving the resolving power of phytolith $\delta^{13}\text{C}$ as a tool for paleoecological reconstruction of C_3 and C_4 grasses. In: Meunier J D, Colin F, eds. *Phytoliths: Applications in Earth Sciences and Human History*. Netherlands: A A Balkema, 2001. 317–327
- 26 Carter J A. Phytolith analysis and paleoenvironmental reconstruction from Lake Poukawa Core, Hawkes Bay, New Zealand. *Glob Planet Change*, 2002, 33: 257–267
- 27 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. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 945–959
- 28 Bremond L, Alexandre A, Wooller M J, et al. Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains. *Glob Planet Change*, 2008, 61: 209–224
- 29 葛勇, 介冬梅, 郭继勋, 等. 松嫩草原羊草植硅体对模拟全球 CO_2 浓度升高的响应研究. *科学通报*, 2010, 55: 2735–2741
- 30 Lu H, Zhang J, Wu N, et al. Phytoliths Analysis for the Discrimination of Foxtail Millet (*Setaria italica*) and Common Millet (*Panicum miliaceum*). *PLoS ONE*, 2009, 4: 4448
- 31 Ranere A J, Piperno D R, Holst I, et al. The cultural and chronological context of early Holocene maize and squash domestication in the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 5014–5018
- 32 李小明, 周新鄂, 张宏宾, 等. 考古生物指标记录的中国西北地区 5000 a BP 水稻遗存. *科学通报*, 2007, 52: 673–678
- 33 Kelly E F, Amundson R G, Marino B D, et al. Stable isotope ratios of carbon in phytoliths as a quantitative method of monitoring vegetation and climate change. *Quat Res*, 1991, 35: 222–233
- 34 Krull E S, Skjemstad J O, Graetz D, et al. ^{13}C -depleted charcoal from C_4 grasses and the role of occluded carbon in phytoliths. *Org Geochem*, 2003, 34: 1337–1352
- 35 王永吉, 吕厚远, 王国安, 等. C_3 , C_4 植物和现代土壤中植物硅酸体碳同位素分析. *科学通报*, 2000, 45: 978–982
- 36 Blackman E. Observations on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*). *Can J Bot*, 1969, 47: 827–838
- 37 Piperno D. *Phytolith Analysis: An Archaeological and Geological Perspective*. San Diego: Academic Press, 1988
- 38 Parr J, Sullivan L, Quirk R. Sugarcane phytoliths: Encapsulation and sequestration of a long-lived carbon fraction. *Sugar Tech*, 2009, 11: 17–21
- 39 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 804–812
- 40 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体研究及应用. 北京: 海洋出版社, 1993. 37–43
- 41 Hodson M J, White P J, Mead A, et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Ann Bot*, 2005, 96: 1027–1046
- 42 Parr J, Sullivan L. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars. *Plant Soil*, 2011, 342: 165–171
- 43 Kerven G, Menzies N, Geyer M. Soil carbon determination by high temperature combustion: A comparison with dichromate oxidation procedures and the influence of charcoal and carbonate carbon on the measured value. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2000, 31: 1935–1939
- 44 Chatterjee A, Lal R, Wielopolski L, et al. Evaluation of Different Soil Carbon Determination Methods. *Crit Rev Plant Sci*, 2009, 28: 164–178
- 45 王永吉. 植物硅酸体化学成分的研究. *黄渤海海洋*, 1998, 16: 33–38
- 46 Lü H, Zhang J, Liu K B, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10000 years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 7367–7372
- 47 陈文华. 农业考古. 北京: 文物出版社, 2002. 42–48

- 48 游修龄. 中国农业通史(原始社会卷). 北京: 中国农业出版社, 2008. 162-173
- 49 陈晓华. 中国农业统计资料. 北京: 中国农业出版社, 2009
- 50 柴岩, 万富世. 中国小杂粮产业发展报告. 北京: 中国农业科学出版社, 2007. 32-53
- 51 魏仰浩. 糜黍在中国的分布、生产和科学研究概况. 见: 魏仰浩, 王星玉, 柴岩, 编. 中国黍稷论文选. 北京: 中国农业出版社, 1990. 6-11
- 52 Anthoni P, Freibauer A, Kolle O, et al. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. *Agricul Forest Meteor*, 2004, 121: 55-67
- 53 Zhang W J, Wang X J, Xu M G, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China. *Biogeosciences*, 2010, 7: 409-425
- 54 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数. *中国农业科学*, 1990, 23: 83-87
- 55 王星玉, 魏仰浩. 中国黍稷(糜)品种志. 北京: 农业出版社, 1990
- 56 中国国家统计局. 中国统计年鉴-2006. 北京: 中国统计出版社, 2006
- 57 高照良, 冯兴平, 彭珂珊. 试论我国北方旱地农业与持续发展. *生态经济*, 2005, 9: 91-94
- 58 Jones L, Milne A, Wadham S. Studies of silica in the oat plant. *Plant Soil*, 1963, 18: 358-371

· 动 态 ·

“2011 年政策模拟理论与技术”学术研讨会 在杭州召开

近年来, 信息科学与社会科学的结合越来越紧密, 由此形成的政策模拟学科发展迅速, 政策模拟已经深入到了国民经济与发展管理的各个方面. 2011 年 10 月 29~30 日, 由中国科学学与科技政策研究会主办、浙江大学社会科学研究院和中国科学院政策模拟研究中心承办的“2011 年政策模拟理论与技术”学术研讨会在杭州召开. 来自中国科学院、中国社会科学院、北京大学、浙江大学、复旦大学、华东师范大学、河南大学等 20 余所高校和研究机构的 80 多位专家、学者出席了研讨会, 有 38 位专家、学者在会议上作了精彩的学术报告. 与会者围绕“政策模拟理论、技术及实践”这一主题, 就全球气候变化经济学、人口与社会保障、低碳城市、区域发展、宏观经济等多领域进行了成果汇报和研讨.

为了应对全球环境变化, 各种气候保护和碳减排方案的有效性和经济影响评估研究越来越受到重视. 中国科学院科技政策与管理科学研究所王铮研究员等构建了一个新型集成评估(IAM)模型, 模拟出各种可能的全球减排方案的公平性, 提出在各种减排目标下保障中国经济平稳最优增长的路线和政策. 河南大学的秦耀辰教授, 对我国城市的低碳发展水平作了研究, 揭示产业结构演化与碳排放强度有复杂的关系. 在人口和社会保障领域, 浙江大学尹文耀研究员认为目前我国的生育政策研究存在诸多理论和技术问题, 他针对不同生育政策方案进行了模拟仿真, 运用综合评价和定量比较的方法, 建议了各省最佳生育政策方

案. 浙江大学何文炯教授模拟提出社会医疗保险政策, 指出随着社会医疗保险“系统老龄化”, 如果政策不作重大调整, 我国多数地区的社会医疗保险基金余额将在缓慢增长后逐步下降并将变为负数. 华东师范大学的丁金宏教授研究了我国的人口发展动态, 认为当期中国的人口问题不是老龄化而是少子化. 北京大学薛领副教授使用遗传计算法, 利用自主体建模描述了商业中心的动态演化.

一些学者还将政策模拟的理论与技术广泛地运用到了低碳发展、区域经济、人口城市化、人口和社会保障、宏观经济领域. 特别是模拟研究宏观经济某个方面的影响, 如对人民币汇率变动、通货膨胀、工资水平和经济增长等一系列相关问题. 此外, 与会的专家、学者还交流了政策模拟基础理论、模型构建、技术创新方面的成果和政策模拟基础平台的建设经验.

这次会议有众多的研究生参加, 他们在政策模拟的方法和应用方面作出了积极的探索. 一些研究成果, 得到了会议的高度评价.

与会代表一致认为, 此次“政策模拟理论与技术”的学术研讨会为从事科学研究和政策制定者提供了许多具有重要学术价值和决策参考价值的科学成果, 进一步推动了“政策模拟理论与技术”在全方位多领域的研究、应用和发展, 成为了自然科学与社会科学结合的范例.

(本刊讯)