

杨蕊,周定国,连海兰,等. 农作物废弃物制备二氧化硅气凝胶的工艺优化[J]. 江苏农业科学,2018,46(16):256-260.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.16.061

农作物废弃物制备二氧化硅气凝胶的工艺优化

杨蕊,周定国,连海兰,兰平,冒海燕

(南京林业大学材料科学与工程学院,江苏南京 210037)

摘要:我国作为农业大国,丰富的粮食产量会伴随产生大量的农作物秸秆废弃物,焚烧秸秆既污染环境又会造成资源浪费。农作物秸秆中含有丰富的硅元素,而稻秸秆二氧化硅含量比其他秸秆多。提取稻秸秆材料中的二氧化硅,并用其制备新型材料,既可以变废为宝,减少环境污染,提高农作物秸秆的附加值,又有利于农业学科与其他学科的交叉。因此,分别利用硅酸钠和稻秸秆中的二氧化硅为硅源,通过真空冷冻干燥法制备二氧化硅气凝胶,并对气凝胶的微观形貌、密度、孔隙率以及组分进行分析,探讨较佳的制备工艺条件,研究以稻秸秆为原料制备生物质基气凝胶的可行性。结果表明,稻秸秆中提取得到的二氧化硅可以制备得到性能优异的生物质基二氧化硅气凝胶;在水玻璃与去离子水比例为 1:10、凝胶 pH 值为 7 的工艺条件下得到二氧化硅气凝胶具有密度最低和孔隙率最大的特点,利用扫描电镜观测其孔隙结构最为均匀。

关键词:稻秸秆;二氧化硅;气凝胶;冷冻干燥;制备工艺;扫描电镜;孔隙结构

中图分类号: X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)16-0256-04

天然生物质资源在蓄积量和生产量上是一切生物质资源中最巨大、最恒久的,千万年来一直是维持人类生存和发展的主要物质基础之一^[1]。我国农业剩余物(秸秆)的产量已达到 7 亿 t/年,工业利用率仅为 1% 左右,大量的秸秆在农田里焚烧,火光和浓烟严重污染环境,甚至对民用航空安全也造成影响。由此可见,农业剩余物亟待进行科学经营和高效利用^[2]。目前已有不少研究者试图从秸秆中提取二氧化硅,并对其加以利用^[3],既有利于农作物秸秆的合理利用,赋予其更高的价值,同时也符合可持续发展战略,满足不同的生产需要。

二氧化硅气凝胶是一种由纳米量级颗粒相互聚合形成的连续三维网络结构,孔隙中充满空气介质的高分散轻质多孔非晶态材料^[4-5],其具有高比表面积、高孔隙率、高热绝缘性、低密度等优异性能,且性能可随着对结构的控制而具有连续可调性,因此在热绝缘、催化、节能环保、石油化工、药物释放、航空航天等领域具有广阔的应用前景^[6-7],同时作为隔热保温材料、催化剂及载体、声阻抗耦合材料、Cherenkov 探测器等材料已经得到广泛应用^[8-9]。二氧化硅气凝胶一般通过溶胶-凝胶法制备,硅源在催化剂下进行水解,水解产物上的羟基进行缩合反应形成溶胶,构成溶胶的初级粒子及次级粒子,进一步以链状的结构组成粒子团簇,形成湿凝胶,最后通过超临界、常压或冷冻干燥方法将湿凝胶转换为气凝胶。从上述过程来看,硅源的选取对最终二氧化硅气凝胶的结构及性能

影响很大^[10]。自从 1931 年 Kistler 选用硅酸钠制备最早的二氧化硅气凝胶以来^[11],研究人员对二氧化硅气凝胶制备过程中各种工艺条件及反应机理进行了较为详尽的研究。研究发现,针对二氧化硅气凝胶的不同应用,选择合适的硅源对后期获得结构完整、性能优良的二氧化硅气凝胶至关重要^[12-14]。鉴于此,本研究分别以硅酸钠和稻秸秆为原料,采用真空冷冻干燥的方法制备二氧化硅气凝胶,并对制得的二氧化硅气凝胶的特性进行分析,以此探讨较佳的制备工艺条件,进而优化二氧化硅气凝胶的制备工艺,这样不仅有利于气凝胶材料的发展,扩大其生产来源,也对生物质废弃物资源的再利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

稻秸秆购于江苏省东海县,含水率为 10%~12%;硅酸钠购自上海试四赫维化工有限公司。

1.2 设备

真空冷冻干燥机(LGJ-18A)购自上海比朗仪器制造有限公司;恒速搅拌器(S312-60)购自上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S)购自河南省予华仪器有限公司;pH 计(FE28)购自上海右一仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 以硅酸钠为原料制备气凝胶 用电子天平准确称取 10 g 硅酸钠,将其溶解为水玻璃,分别按 1:7、1:10、1:13(水玻璃与去离子水的体积比)^[8]加入去离子水搅拌至全部溶解;再向水玻璃溶液中加入浓度为 10% 的硫酸调节 pH 值至 1~2,然后逐滴缓慢滴加 10% NaOH 溶液至 pH 值分别为 7、8、9,并不断进行搅拌,静置 24 h 使其成为凝胶,用去离子水反复冲洗去除杂质;然后用无水乙醇溶剂交换 72 h,每隔 24 h 更换 1 次无水乙醇;将制成的醇凝胶放入真空冷冻干燥

收稿日期:2017-09-26

基金项目:国家自然科学基金(编号:31500483);江苏省自然科学基金青年基金(编号:BK20150876)。

作者简介:杨蕊(1983—),女,江苏南京人,博士,讲师,研究方向为农作物秸秆综合利用研究。E-mail:yangrui@njfu.edu.cn。

通信作者:周定国,博士,教授,博士生导师,研究方向为农作物秸秆综合利用研究。E-mail:dgzhou@njfu.edu.cn。

机在真空度为 20 Pa 的条件下干燥 24 h, 得到二氧化硅气凝胶。

1.3.2 以稻秸秆为原料制备气凝胶 将稻秸秆经马弗炉 600 ℃ 燃烧, 称取 10 g 秸秆灰, 用硫酸对其进行酸洗, 再将秸秆灰和浓度为 5% NaOH 溶液以固液比为 1 g : 5 mL 的配比混合并加热 2.5 h, 经真空抽滤得到秸秆基水玻璃; 分别按 1 : 7、1 : 10、1 : 13 (水玻璃与去离子水的体积比) 加入去离子水搅拌至全部溶解; 再向秸秆基水玻璃溶液中加入浓度为 10% 的硫酸, 调节 pH 值至 1 ~ 2, 然后逐滴缓慢滴加 10% NaOH 溶液至 pH 值为 7、8、9, 滴加 NaOH 溶液时不断搅拌, 静置使其成为水凝胶, 再陈化静置水凝胶 24 h, 并用无水乙醇浸泡 72 h, 每隔 24 h 更换 1 次无水乙醇得到秸秆基醇凝胶; 将醇凝胶放入真空冷冻干燥机中在真空度为 20 Pa 的条件下干燥 24 h, 得到秸秆基二氧化硅气凝胶。

1.4 性能测试

1.4.1 振实密度测试 称取干燥小量筒 (规格 5 mL) 的质量 m_1 , 灌入一定体积的二氧化硅气凝胶粉末, 振实 500 下, 读取气凝胶粉末在小量筒的体积 V , 并称取小量筒和气凝胶的质量 m_2 , 利用公式 (1) 即可计算得到粉末气凝胶的振实密度。

$$\rho_m = (m_2 - m_1) / V. \quad (1)$$

式中: m_1 为量筒的质量, g; m_2 为装有气凝胶样品的量筒的质量, g; V 为通过量筒读出来的样品体积, cm^3 。

1.4.2 孔隙率 孔隙率 P 可按公式 (2) 计算:

$$P = (1 - \rho_m / \rho_A) \times 100\%. \quad (2)$$

式中: ρ_A 为理论上多孔二氧化硅的密度, g/cm^3 , 这里取 2.2 g/cm^3 ; ρ_m 为振实密度, g/cm^3 。

1.4.3 扫描电镜测试 采用场发射扫描电镜 (S4800, 日本 HITACHI 公司) 观察二氧化硅气凝胶的形貌特征和微观结构孔隙等。将所制备气凝胶进行研磨, 然后将少量干燥后的粉

末粘于导电胶上。因为气凝胶不导电, 测试前将样品喷金处理, 测试电压为 10 kV。在真空环境下, 喷金处理后进行相关结构测试, 采用 SEM 配备的 X 射线能量色谱仪 (EDAX) 对气凝胶粉末进行分析。

1.4.4 X 射线衍射测试 X 射线衍射测试采用 Rigaku D/max - 2500B2 + /PCX 型衍射仪对气凝胶进行物相分析。测试条件: Cu - K (入射波长 $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) 作为射线源, Ni 滤波, 管电压为 40 kV, 电流为 200 mA, 温度为室温, 衍射扫描范围为 $10^\circ \sim 80^\circ$ 。

2 结果与分析

2.1 振实密度

2.1.1 硅酸钠制备的气凝胶振实密度 由图 1 - a 可以看出, 气凝胶的振实密度随着凝胶时溶液 pH 值的增大而增加, 当 pH 值为 7 时, 二氧化硅气凝胶的振实密度为 $0.075 \text{ g}/\text{cm}^3$, 而当 pH 值上升到 9 时, 振实密度提高至 $0.148 \text{ g}/\text{cm}^3$, 是因为当凝胶体系的 pH 值增大到碱性范围内时, 硅酸的缩聚反应越来越快, 水解生成的胶核来不及长大, 迅速发生交联, 凝胶速度较快, 形成的气凝胶三维网络结构骨架较致密, 导致产品的表观密度较大。由表 1 可知, 当水玻璃和去离子水的比例为 1 : 7 时, 二氧化硅气凝胶振实密度的最小值仅为 $0.075 \text{ g}/\text{cm}^3$, 而随着去离子水体积逐渐变大, 二氧化硅气凝胶的振实密度逐渐增大, 当水玻璃和去离子水体积比为 1 : 13 时, 振实密度达到最大值, 为 $0.280 \text{ g}/\text{cm}^3$, 发生这一现象的原因可能是反应物浓度低, 所形成的凝胶骨架纤细, 在干燥过程中易受毛细管力作用而发生坍塌, 导致气凝胶密度增加, 从图 1 - b 中可以明显看出水玻璃与去离子水体积比对振实密度的影响。

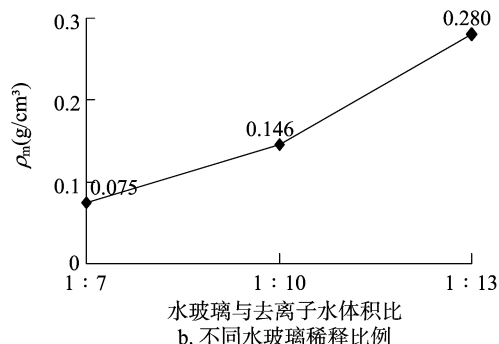
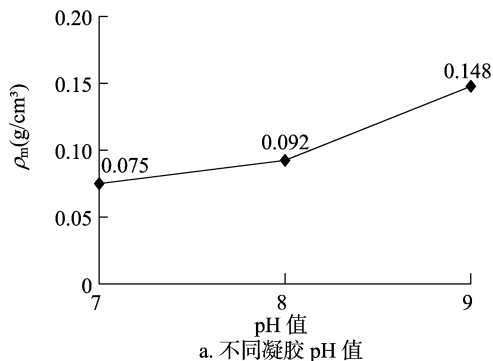


图1 以硅酸钠为原料制备的二氧化硅气凝胶密度

2.1.2 稻秸秆制备的气凝胶振实密度 由表 2 可知, 当水玻璃和去离子水的配比为 1 : 7 时, 溶液始终呈液态, 没有形成凝胶; 当配比为 1 : 13 时, 在凝胶过程中逐渐反应出现不同程度的结晶, 导致凝胶密度不均, 因此也无法制备出均匀分散的二氧化硅气凝胶, 只有当水玻璃和去离子水的配比为 1 : 10 时, 才制备出较为均质的二氧化硅气凝胶。以稻秸秆为原料制备得到的气凝胶密度大致为 $0.2 \text{ g}/\text{cm}^3$, 最小振实密度为 $0.194 \text{ g}/\text{cm}^3$, 最大为 $0.219 \text{ g}/\text{cm}^3$, 均符合气凝胶材料的密度要求。当凝胶体系的 pH 值在 7、8、9 时, 所对应的稻秸秆基气凝胶样品密度相差不大, 可知以稻秸秆为原料制备的气凝

胶在碱性条件下对密度的影响不大。

2.2 孔隙率

2.2.1 硅酸钠制备的气凝胶孔隙率 由表 3 可知, 二氧化硅气凝胶的孔隙率最高可达 96%, 最低也有 87%, 不难看出二氧化硅气凝胶是一种多孔的物质, 且孔隙多, 凝胶 pH 值和水玻璃稀释程度对二氧化硅气凝胶的孔隙率都有影响。当凝胶的 pH 值一定时, 随着去离子水体积比的增大, 孔隙率呈现减小趋势, 主要是因为反应物的浓度降低, 所形成的气凝胶骨架变得更加纤细, 干燥过程中易受毛细管力的作用发生坍塌, 气凝胶的密度增加, 孔隙率下降。在水玻璃与去离子水体积比

表 1 以硅酸钠为原料制备的二氧化硅气凝胶的密度

$V_{\text{水玻璃}}:V_{\text{去离子水}}$	pH 值	m_1 (g)	m_2 (g)	V (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)
1:7	7	33.258 1	33.303 3	0.60	0.075
1:7	8	33.258 5	33.304 7	0.50	0.092
1:7	9	33.236 1	33.310 3	0.50	0.148
1:10	7	32.975 7	33.070 8	0.65	0.146
1:10	8	32.975 9	33.128 9	0.60	0.255
1:10	9	32.975 6	33.071 7	0.5	0.192
1:13	7	32.979 5	33.049 5	0.25	0.280
1:13	8	32.979 1	33.050 4	0.3	0.238
1:13	9	32.977 2	33.036	0.55	0.107

表 2 以稻秸秆为原料的气凝胶振实密度

$V_{\text{水玻璃}}:$ $V_{\text{去离子水}}$	pH 值	m_1 (g)	m_2 (g)	V (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	备注
1:7	7	—	—	—	—	未形成凝胶
1:7	8	—	—	—	—	未形成凝胶
1:7	9	—	—	—	—	未形成凝胶
1:10	7	32.977 7	33.087 6	0.50	0.219	—
1:10	8	32.977 2	33.083 9	0.55	0.194	—
1:10	9	32.977 0	33.093 8	0.55	0.212	—
1:13	7	—	—	—	—	起结晶
1:13	8	—	—	—	—	起结晶
1:13	9	—	—	—	—	起结晶

表 3 以硅酸钠为原料制备的二氧化硅气凝胶孔隙率

$V_{\text{水玻璃}}:V_{\text{去离子水}}$	pH 值	ρ_m (g/cm^3)	孔隙率 P (%)
1:7	7	0.075	96.58
1:7	8	0.092	95.80
1:7	9	0.148	93.79
1:10	7	0.146	93.35
1:10	8	0.255	88.41
1:10	9	0.192	91.26
1:13	7	0.280	87.27
1:13	8	0.238	89.20
1:13	9	0.107	95.14

一定的情况下,随着凝胶体系 pH 值的增大,气凝胶的孔隙率会降低,当 pH 值 >7 时,随着 pH 值增加,体系缩合速率增加,凝胶时间缩短,在 pH 值 =7 时几乎瞬间凝胶,缩聚速率过快,易形成致密的凝胶结构,凝胶表面有很多羟基,在干燥过程中,羟基易发生脱水缩合,导致凝胶骨架收缩,从而引起气凝胶密度增加、孔隙率降低。

2.2.2 稻秸秆制备的气凝胶孔隙率 由表 4 可知,以稻秸秆为原料制备的二氧化硅气凝胶孔隙率的大小均符合气凝胶材料孔隙率的要求。同时,在不同凝胶 pH 值下得到的气凝胶孔隙率均在 90% 以上,由此表明以稻秸秆作为硅源,同样可以制备得到多孔性、表面形态较好的二氧化硅气凝胶。并且凝胶 pH 值的大小对以稻秸秆为原料的气凝胶材料孔隙率的影响不大。

2.3 微观形貌表征

2.3.1 硅酸钠制备的气凝胶微观形貌 从图 2-a、图 2-b

表 4 以稻秸秆为原料制备的气凝胶孔隙率

$V_{\text{水玻璃}}:V_{\text{去离子水}}$	pH 值	ρ_m (g/cm^3)	孔隙率 P (%)	备注
1:7	7	—	—	未形成凝胶
1:7	8	—	—	未形成凝胶
1:7	9	—	—	未形成凝胶
1:10	7	0.219	90.01	—
1:10	8	0.194	91.18	—
1:10	9	0.212	90.35	—
1:13	7	—	—	起结晶
1:13	8	—	—	起结晶
1:13	9	—	—	起结晶

可以看出,水玻璃与去离子水体积比为 1:7、凝胶 pH 值为 7 时,得到的二氧化硅气凝胶由大量的纳米颗粒堆积而成,结构较疏松,颗粒大小也较均匀,且孔隙结构相对均匀。从图 2-c、图 2-d 可以看出,在相同的凝胶体系 pH 值为 7、水玻璃与去离子水体积比为 1:10 条件下,水玻璃稀释倍数增大,体系中固含量降低,形成的凝胶网络骨架也变得纤细,并结合之前的密度测试分析,气凝胶的密度也随之增大。从图 2-e 可以明显看到,当水玻璃与去离子水体积比为 1:13 时,气凝胶有少量团聚现象,孔隙分布没有前面 2 种配比均匀,但是在 10 万倍的放大图中可以看到在没有结块区域的气凝胶的孔径分布还是非常均匀的,纳米颗粒分布也很均匀(图 2-f)。

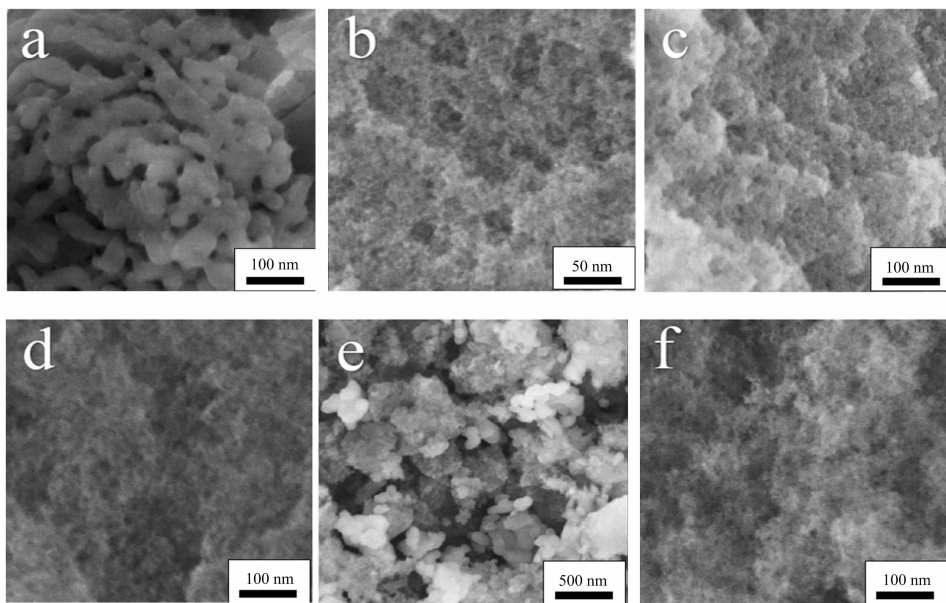
2.3.2 稻秸秆制备的气凝胶微观形貌 以稻秸秆为原料制备的二氧化硅气凝胶对制备条件要求更为苛刻,当凝胶 pH 值为 7、8 时,稻秸秆基气凝胶能够较好地成型且具有一定的骨架强度。从图 3 可以看出,当凝胶 pH 值为 7、8 时,气凝胶由大量三维纳米颗粒堆积形成许多孔洞,结构较疏松,颗粒大小也较均匀,孔隙和尺寸都为纳米级。不同 pH 值下所制备的气凝胶的内部结构均为网状结构,孔隙率较发达,但随着体系 pH 值增大,硅酸缩聚速率越来越快,所制备的气凝胶网络结构也变得致密。凝胶体系 pH 值增大,相应的气凝胶密度也会变大,孔隙率会变低,所以凝胶体系 pH 值 =7 是更好的制备二氧化硅气凝胶的条件。

2.4 X 射线衍射分析

从图 4 可以看出,2 θ 在 35°左右均出现 1 个强度较大的衍射峰,但二者的强度大小不同,强度相差近 1 倍,稻秸秆基气凝胶在 2 θ 为 68°时也出现了另一个衍射峰,而在二氧化硅气凝胶的 XRD 图中并未发现。由于 XRD 图中出现多个衍射峰,无法确定是否为非晶态物质的特征衍射图谱,其原因可能是试验中水凝胶在陈化前用去离子水未能完全将杂质离子去除。

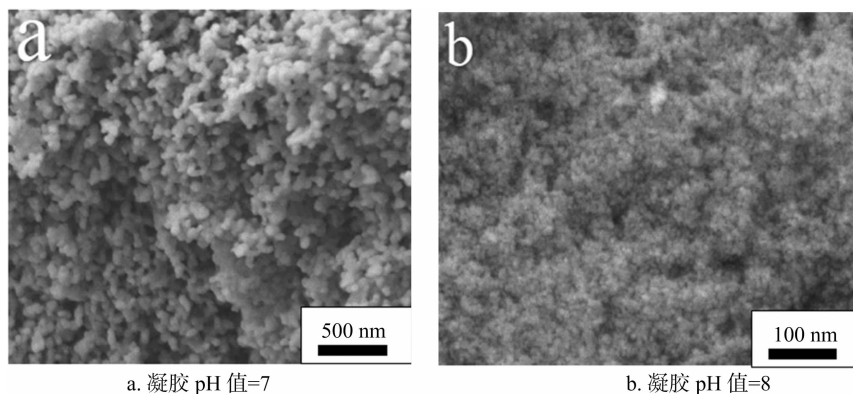
3 讨论与结论

稻秸秆为原料制备的二氧化硅气凝胶的密度均符合气凝胶材料的密度要求。当凝胶体系的 pH 值 =7 时,2 种原料制备得到的气凝胶密度均最好。稻秸秆制备得到的气凝胶孔隙率在 90% 左右,硅酸钠为原料制备得到的气凝胶孔隙率由于制备工艺条件的不同会有变化,当去离子水体积变大时,孔隙率会降低。不同的凝胶 pH 值也会对孔隙率产生影响,即当凝胶 pH 值增大时,孔隙率会降低,而综合来看,当凝胶 pH



a—水玻璃与去离子水比例为 1 : 7, 凝胶 pH 值=7, 放大倍数 50.0×10^3 ; b—水玻璃与去离子水比例为 1 : 7, 放大倍数 100.0×10^3 ; c—水玻璃与去离子水比例为 1 : 10, 凝胶 pH 值=7, 放大倍数 50.0×10^3 ; d—水玻璃与去离子水比例为 1 : 10, 凝胶 pH 值=7, 放大倍数 100.0×10^3 ; e—水玻璃与去离子水比例为 1 : 7, 凝胶 pH 值=7, 放大倍数 50.0×10^3 ; f—水玻璃与去离子水比例为 1 : 7, 凝胶 pH 值=7, 放大倍数 100.0×10^3

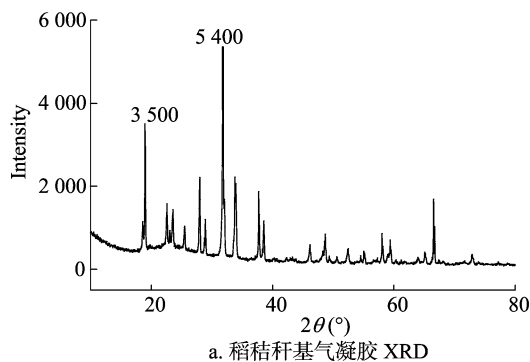
图2 以硅酸钠为原料制备的二氧化硅气凝胶的微观形貌



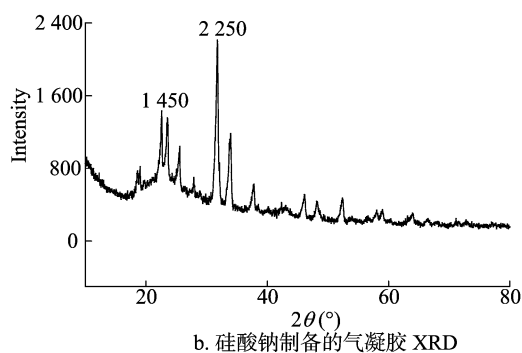
a. 凝胶 pH 值=7

b. 凝胶 pH 值=8

图3 稻秸秆制备的气凝胶微观形貌



a. 稻秸秆基气凝胶 XRD



b. 硅酸钠制备的气凝胶 XRD

图4 不同原料的气凝胶在凝胶 pH 值=7 时的 XRD

值=7 时,气凝胶的孔隙率最大。稻秸秆制备的气凝胶在凝胶 pH 值=7 的条件下具有较好的网络结构,由大量三维纳米颗粒堆积组成形成孔洞,结构较疏松,颗粒大小也较均匀。硅酸钠制备得到的气凝胶在水玻璃与去离子比为 1 : 10、凝胶 pH 值=7 的条件下具有更好的网络结构,但随着水玻璃与去离子水体积比的增大,体系中固含量降低,形成的凝胶网络骨

架也变得纤细。凝胶 pH 值也会对气凝胶的网络结构有影响,随着体系 pH 值增大,硅酸缩聚速率越来越快,所制备的气凝胶网络结构也变得致密。

参考文献:

[1] 李 坚,邱 坚. 气凝胶型木材的形成与分析[M]. 北京:科学

张金平,李香颜. 基于敏感因子的河南省小麦干热风风险区划分[J]. 江苏农业科学,2018,46(16):260-263.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.16.062

基于敏感因子的河南省小麦干热风风险区划分分析

张金平^{1,2,3}, 李香颜^{1,3}

(1. 中国气象局·河南气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室,河南郑州 450003; 2. 兰州大学大气科学学院,甘肃兰州 730000; 3. 河南省新乡市气象局,河南新乡 453003)

摘要:干热风是发生在小麦灌浆期,影响河南省小麦高产、稳产的主要农业气象灾害。根据小麦干热风气象行业标准,利用河南省 18 地市 1981—2014 年的逐日气象观测数据,选取各地市小麦相对气象产量和千粒质量数据及 2010—2014 年耕地面积、小麦播种面积等敏感因子,构建基于风险源危险性和承灾体易损性等指标的河南省干热风风险评估体系,并结合 GIS 技术,利用 IDW 方法进行河南省干热风的综合风险区划分分析。结果表明,河南省干热风的危险性分布呈现东高西低的规律,中东部的干热风发生强度和频率明显高于西部;在不考虑抗灾能力的情况下,综合危险性和易损性指标进行综合风险区划分分析,河南省干热风综合风险分布规律为东部高于西部,北部高于南部,驻马店市为干热风的高风险区,次高区为豫北和豫东等地,豫西和豫南各地的干热风风险等级最低,属低风险地带。

关键词:干热风;小麦;敏感因子;相对气象产量;千粒质量;风险评估体系;区划

中图分类号: S429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)16-0260-04

河南省是小麦主要生产基地,小麦种植面积占全国的 10%,总产量占全国的 25% 左右。近年来,随着中国小麦生产格局的演变,小麦生产更加集中,河南在小麦生产的重要性更加突出^[1]。但是在全球气候变化的大背景下,气候变化也导致我国粮食主产区气候事件频发,促进了农业生物灾害与农业气象灾害形成与发展^[2],尤其是旱、涝、风、雹、霜冻等影响农业气象灾害的发生频度和强度都有上升趋势,对河南省小麦高产、稳产带来威胁^[3]。其中干热风灾害是发生在冬小麦灌浆期的高温、低湿并伴有一定风力的天气,发生干热风

时植株蒸腾加剧,而根系吸水能力有限,导致小麦灌浆不足甚至枯萎死亡,可造成小麦减产 5%~10%,严重年份减产可达 20%,是河南省危害小麦生长的主要农业气象灾害。

建国以来,国内外气象工作者针对干热风开展了大量研究,前期研究内容主要是干热风的气象指标和防御措施等,1975 年中国农业科学院委托原华北农业大学组成的北方麦区干热风科研协作组,后中国气象局又委托甘肃等十几个省参与研究,对干热风危害的气象指标、生理机制、天气形势、气候特征,以及防御措施效应等进行了大量的研究^[4-10]。进入 21 世纪,众多学者对干热风的研究进一步深入,主要针对区域性干热风的发生规律及致灾机制和预报预警^[11-13] 方面进行应用。刘静等以宁夏引黄灌区为例分析了春小麦干热风灾害的监测指标和损失评估模型^[14]。邹定荣等对华北地区近 50 年干热风发生时空分布特征进行了研究,得出华北大部区域干热风日数呈明显递减的趋势^[15]。张志红等进行

收稿日期:2017-04-10

基金项目:中国气象局/农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放基金(编号:AMF201409)。

作者简介:张金平(1982—),女,河南南阳人,硕士,工程师,主要从事农业气象技术研究。E-mail:zjp_0524@163.com。

出版社,2010.

[2]周定国. 我国秸秆人造板产业的腾飞与超越[J]. 林产工业, 2016,43(1):3-8.

[3]潘明珠,周晓燕,陈成. 纳米二氧化硅在稻秸上的形态分布及制备工艺[J]. 农业工程学报,2012,28(2):250-255.

[4]张志华,王文琴,祖国庆,等. SiO₂ 气凝胶材料的制备、性能及其低温保温隔热应用[J]. 航空材料学报,2015,35(1):87-96.

[5]李华,霍丽,吴乌云高娃. 二氧化硅气凝胶制备条件的选择[J]. 广州化工,2012,40(3):14-16.

[6]Geng G Q, Bi W T, Zhang Y, et al. Study on preparation of mesoporous silica aerogels with low density and high properties via ambient pressure drying[J]. Advanced Materials Research, 2011, 148-149:1491-1496.

[7]Cai J, Liu S, Feng J, et al. Cellulose-silica nanocomposite aerogels by in situ formation of silica in cellulose gel[J]. Angewandte Chemie, 2012, 51(9):2076-2079.

[8]许辉,汪牡丹,涂进春,等. SiO₂ 气凝胶对复合隔热涂料性能的影响[J]. 材料导报,2013,27(7):100-103.

[9]沈军,连娅,祖国庆,等. 气凝胶低成本制备及其在建筑保温领域中的应用[J]. 功能材料,2015,46(7):8-16.

[10]王妮,任洪波. 不同硅源制备二氧化硅气凝胶的研究进展[J]. 材料导报,2014,28(1):42-45.

[11]Kistler S S. Coherent expanded aerogels and jellies[J]. Nature, 1931,127(3211):741.

[12]Liu L H, Wang H Y, Zhang S Y, et al. Progress of biomimetic synthesis of fire-retardant nano-silica aerogels[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(24):15-16, 28.

[13]Zhu P. Preparation of wheat straw ash derived silica aerogel materials via ambient pressure drying[C]//International Conference on Materials Engineering and Environmental Science, 2016:182-189.

[14]刘晓晖,韩永翔,于辛瑶,等. 秸秆基气凝胶的制备[J]. 大连工业大学学报,2016(5):343-346.