

## 3种生物炭的理化性质及其对水中铵态氮和磷的吸附作用

刘壮壮<sup>1</sup>, 郭怡欣<sup>1</sup>, 吕建<sup>2</sup>, 贾明云<sup>1</sup>, 滕孝名<sup>3</sup>, 周瑞荣<sup>3</sup>, 于金平<sup>1,①</sup>

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源保护与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;  
2. 天邦食品股份有限公司天邦研究院, 安徽 合肥 230001; 3. 连云港金海岸开发建设有限公司, 江苏 连云港 222042]

**摘要:** 为探究不同材料来源生物炭理化性质的差异及不同生物炭对水中铵态氮和磷的吸附特性,以玉米(*Zea mays* Linn.)秸秆、‘中山杉’(*Taxodium ‘Zhongshanshan’*)枝条、小叶黄杨(*Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng)枝条为原料制备生物炭,并对3种生物炭的理化性质以及在不同质量浓度铵态氮和磷及吸附时间下对铵态氮和磷的吸附量进行测定和分析。结果显示:小叶黄杨枝条炭具有最大的比表面积和总孔容(分别为 $76.83 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.0246 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ),而‘中山杉’枝条炭的平均孔径最大(4.56 nm)。在傅里叶变换红外光谱和X射线衍射光谱上,‘中山杉’枝条炭与小叶黄杨枝条炭呈现较为相似的特征,而前者与玉米秸秆炭有相近的拉曼光谱特征,且其有序石墨化程度高于小叶黄杨枝条炭。玉米秸秆炭的pH值和阳离子交换量显著( $P < 0.05$ )高于其他生物炭,‘中山杉’枝条炭具有最低的电导率。元素分析结果显示:‘中山杉’枝条炭中碳含量最高(81.75%),氢碳比最低(0.32);小叶黄杨枝条炭中氮和总磷的含量最高(分别为2.67%和 $3.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),而玉米秸秆炭中全钾含量最高( $16.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。小叶黄杨枝条炭在不同质量浓度铵态氮和磷及吸附时间下,整体具有最大的吸附量,呈现出最优的吸附效果。以上研究结果显示:不同原料类型对生物炭的理化性质具有较明显的影响,其中小叶黄杨枝条炭在铵态氮和磷的吸附上具有突出的效果。因此,可根据实际需求选择合适的生物炭应用于土壤改良和污染物吸附等领域。

**关键词:** 生物炭; 理化性质; ‘中山杉’; 小叶黄杨; 铵态氮; 磷; 吸附作用

中图分类号: S888.5; TK61; X52 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)05-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.05.01

### Analysis on physical and chemical properties of three biochars and their adsorption effects on ammonium nitrogen and phosphorus in water

LIU Zhuangzhuang<sup>1</sup>, GUO Yixin<sup>1</sup>, LYU Jian<sup>2</sup>, JIA Mingyun<sup>1</sup>, TENG Xiaoming<sup>3</sup>, ZHOU Ruirong<sup>3</sup>, YU Jinping<sup>1,①</sup> [1. Jiangsu Key Laboratory for Conservation and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. TECH-BANK Research Institute of TECH-BANK Food Co., Ltd., Hefei 230001, China; 3. Lianyungang Golden Coast Development and Construction Co., Ltd., Lianyungang 222042, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(5): 1-10

**Abstract:** To investigate the differences in physical and chemical properties of biochars derived from different materials and their adsorption characteristics for ammonium nitrogen and phosphorus in water, biochars were prepared by using straws of *Zea mays* Linn., branches of *Taxodium ‘Zhongshanshan’*, and branches of *Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng as feedstocks, and physical and chemical properties of three biochars and their adsorption amounts for ammonium nitrogen and phosphorus under different mass concentrations of ammonium nitrogen and phosphorus, and adsorption times were measured and analyzed.

收稿日期: 2025-04-28

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022306); 江苏省植物资源保护与利用重点实验室开放基金项目(JSPKLB202407)

作者简介: 刘壮壮(1991—),男,江苏徐州人,博士,助理研究员,主要从事植物生态修复方面的研究。

①通信作者 E-mail: yujinping@cnbg.net

引用格式: 刘壮壮, 郭怡欣, 吕建, 等. 3种生物炭的理化性质及其对水中铵态氮和磷的吸附作用[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 1-10.

The results show that branch biochar of *B. sinica* var. *parvifolia* possesses the largest specific surface area and total pore volume (which are  $76.83 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  and  $0.0246 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively), while branch biochar of *T.* 'Zhongshanshan' has the largest average pore diameter (4.56 nm). On Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction spectroscopy, branch biochar of *T.* 'Zhongshanshan' and branch biochar of *B. sinica* var. *parvifolia* show similar characteristics, whereas branch biochar of *T.* 'Zhongshanshan' shows similar Raman spectroscopy features with straw biochar of *Z. mays*, and it exhibits a higher degree of ordered graphitization than branch biochar of *B. sinica* var. *parvifolia*. Straw biochar of *Z. mays* has significantly ( $P < 0.05$ ) higher pH value and cation exchange capacity than the other biochars, while branch biochar of *T.* 'Zhongshanshan' has the lowest electric conductivity. The element analysis result shows that branch biochar of *T.* 'Zhongshanshan' has the highest carbon content (81.75%) and the lowest hydrogen/carbon ratio (0.32); branch biochar of *B. sinica* var. *parvifolia* shows the highest nitrogen and total phosphorus contents (which are 2.67% and  $3.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively), while straw biochar of *Z. mays* has the highest total potassium content ( $16.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Branch biochar of *B. sinica* var. *parvifolia* exhibits the highest adsorption amount under different mass concentrations of ammonium nitrogen and phosphorus, and adsorption times in general, indicating superior adsorption performance. These research results suggest that different feedstock types have evident impacts on the physical and chemical properties of biochar, among which branch biochar of *B. sinica* var. *parvifolia* has outstanding adsorption effects for ammonium nitrogen and phosphorus. Therefore, suitable biochar can be selected based on practical needs for applications in fields including soil improvement and pollutant adsorption.

**Key words:** biochar; physical and chemical property; *Taxodium* 'Zhongshanshan'; *Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng; ammonium nitrogen; phosphorus; adsorption effect

随着世界人口的增长,农林业的发展规模逐步扩大,随之产生大量的农林废弃物,而农林废弃物中含有丰富的生物质。目前,尽管有部分农林废弃物作为发电原料、饲料、堆置有机肥的物料等,但多数废弃物被粉碎还田、焚烧或填埋处理,造成了严重的资源浪费和环境污染<sup>[1]</sup>。因此,探索绿色、循环、可持续的农林废弃物资源化利用方式显得尤为迫切。

生物炭是以生物质材料为原料,在高温和限氧条件下,经热裂解制备出的一种有机质固体<sup>[2]</sup>。因其具有较大的比表面积、孔隙度,以及丰富的表面官能团,可有效改善土壤结构,并具有较强的水肥保持及水体污染物吸附能力<sup>[3-4]</sup>;生物炭中碳等营养元素较为丰富,施用于土壤后可显著增加土壤肥力,由于其稳定的分子结构,生物炭不易被微生物分解,可将碳进行长期封存<sup>[5-6]</sup>。此外,添加生物炭能有效调节土壤(特别是酸性土壤)的酸碱度(pH)和阳离子交换量,并且影响土壤微生物群落的多样性<sup>[4]</sup>。虽然生物炭在污染物吸附、土壤改良等方面发挥着突出作用,但其应用效果也因生物炭理化性质的不同而存在差异。除热解温度、升温速率、滞留时间等条件外,原料类型同样是影响生物炭理化性质的重要因子<sup>[7]</sup>。相关研究表明:与粪便生物炭相比,利用植物材料制备的生物炭中氮和磷的含量较低,碳含量却较高<sup>[8]</sup>;

而软木材料制备的生物炭比硬木生物炭具有更大的比表面积<sup>[9]</sup>。鉴于不同材料来源的生物炭存在理化性质上的差异,有必要对不同生物炭的理化性质进行分析,从而为其在农业、环境等领域中的应用提供依据。

在环境领域,由多种元素(特别是氮和磷)引起的水体富营养化是目前较为突出的问题。随着世界人口的增长和城市化进程的加快,大量生活污水、畜禽粪便的排放以及农药和化肥的过量施用,导致氮和磷以点源或面源的方式在水体中富集(无机态氮和磷主要以  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{PO}_4^{3-}$  等形式存在),加重了水体的富营养化<sup>[10]</sup>。水体富营养化会使水生态系统退化,造成生物多样性丧失、水华爆发、鱼类大量死亡及严重的经济损失。为了应对水体的富营养化,研发去除氮和磷的手段势在必行,目前主要有物理、生物、化学等方法<sup>[11]</sup>。与生物、化学等方法相比,利用吸附剂去除水体中氮和磷具有效率高、环境友好的优点,已得到广泛应用<sup>[12]</sup>。然而,目前常用的吸附剂(包括活性炭、离子交换树脂、沸石等)的原料仍存在成本较高的问题<sup>[13]</sup>。生物炭因具有良好的吸附性能,且其原料来源广泛、价格低廉,在去除水体中氮和磷方面展现了较大的应用潜力<sup>[14]</sup>。现有研究表明:不同材料来源的生物炭在对氮和磷的吸附能力上存在不同

程度的差异。例如:花生(*Arachis hypogaea* Linn.)壳炭、玉米(*Zea mays* Linn.)秸秆炭在不同铵态氮浓度下的吸附氮饱和量分别为 15.0 和 12.5  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,分别为杨(*Populus* spp.)木屑炭吸附氮饱和量的 1.6 和 1.3 倍<sup>[15]</sup>,而稻(*Oryza sativa* Linn.)壳和松(*Pinus* spp.)木炭的吸附磷饱和量分别为玉米秸秆炭吸附磷饱和量的 1.5 和 1.3 倍<sup>[16]</sup>。因此,探究不同生物炭对氮和磷的吸附特性,可为生物炭吸附剂的选择及制备奠定基础。

目前,在生物炭制备原料上,常见的有小麦(*Triticum aestivum* Linn.)、水稻、玉米等农作物秸秆及松树、杨树、竹(subfam. Bambusoideae spp.)等林木废弃物。而作为重要的生态修复和园林绿化树种,‘中山杉’(*Taxodium* ‘Zhongshanshan’)和小叶黄杨(*Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng)在季节更替和养护管理过程中同样会产生大量的枝条、叶片等废弃物(‘中山杉’为南京中山植物园选育的特色落叶或半常绿乔木,小叶黄杨为常绿灌木或小乔木),但尚未有利用‘中山杉’和小叶黄杨废弃物制备生物炭及相关生物炭应用的系统报道。基于此,本研究选择常规农业废弃物(玉米秸秆)及‘中山杉’枝条、小叶黄杨枝条为原料制备 3 种生物炭,通过测定其理化性质,分析不同原料生物炭在物理结构和化学组成上的差异,明确其在农业、环境等领域的应用潜力;并将不同生物炭分别添加到含铵态氮和磷的水体中,探究其在不同质量浓度铵态氮和磷及吸附时间下对铵态氮和磷的吸附特性,筛选出可用于吸附污染物和减少面、点源污染的生物炭,以期为农林废弃物的绿色、循环利用及高附加值生物炭产品开发提供理论和现实依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

生物炭制备原料‘中山杉’枝条、小叶黄杨枝条于 2019 年 6 月修剪自江苏省中国科学院植物研究所(北纬 32°03′、东经 118°50′),玉米秸秆(同年秋季玉米收获后收集)由南京勤丰秸秆科技有限公司提供。将收集的原料(每种约 10 kg)洗净、晾干,粉碎后过孔径 1 cm 筛,于 105 °C 下干燥至恒质量。参照课题组前期报道的方法<sup>[17]</sup>,将原料置于 KSL-1200X 马弗炉(合肥科晶材料技术有限公司)中,在 500 °C、

10 °C · min<sup>-1</sup>下限氧热解 1 h 制备出 3 种生物炭。将生物炭过 100 目筛,在 105 °C 下烘干至恒质量后保存、备用。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 生物炭理化性质测定

1.2.1.1 比表面积、总孔容和平均孔径测定 利用 ASAP 2460 分析仪(美国 Micromeritics 公司)进行氮气吸附实验,并根据文献[17]中的方法,采用 Brunauer-Emmett-Teller (BET)方法计算生物炭比表面积和平均孔径,采用单点吸附法测定生物炭的总孔容。

1.2.1.2 pH 值、电导率和阳离子交换量测定 将生物炭与去离子水按照 1 : 20 (*m* : *V*) 比例混匀,在摇床中振荡 8 h 后,利用 PHS-3E 型 pH 计和 DDS-307 电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)分别测定 pH 值和电导率。根据 HJ 889—2017 中的方法,利用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定阳离子交换量,其中生物炭和三氯化六氨合钴溶液(1.66  $\text{cmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )按照 1 : 40 (*m* : *V*) 比例混匀。pH 值、电导率和阳离子交换量测定均设置 3 次生物学重复。

1.2.1.3 元素分析 利用 vario EL cube 元素分析仪(德国 Elementar 公司)对生物炭中碳、氢、氮、硫的含量进行分析,基于测定数据,计算氢和碳的原子比(氢碳比)。利用浓硫酸和过氧化氢将生物炭样品消煮分解<sup>[18]314-316</sup>后,采用钼锑抗比色法<sup>[18]314</sup>测定生物炭中总磷含量,采用火焰光度计法<sup>[18]315-316</sup>测定全钾含量,总磷和全钾含量测定均设置 3 次生物学重复。

1.2.1.4 光谱检测 利用 VERTEX 80V 傅里叶变换红外光谱仪(德国 Bruker 公司)对生物炭表面官能团进行扫描分析,波数检测范围为 400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 。经 Ultima IV X 射线衍射仪(日本 Rigaku 公司)检测,获得生物炭的 X 射线衍射图谱,测试角度( $2\theta$ )范围为 5°~80°,扫描步长为 0.02°。利用 DXR532 拉曼光谱仪(美国 Thermo Fisher 公司)对生物炭进行拉曼光谱分析,并基于拉曼光谱中的 D 峰和 G 峰强度(分别为  $I_D$  和  $I_G$ ),计算  $I_D/I_G$  比,用于反映无序或强烈扭曲的乱层碳占有有序石墨晶体的比率,比值越大表示有序石墨化程度越低。

#### 1.2.2 生物炭对铵态氮和磷的吸附量测定

1.2.2.1 不同质量浓度铵态氮和磷下生物炭对铵态氮和磷的吸附量测定 用纯水将试剂  $\text{NH}_4\text{Cl}$ (纯度大于或等于 99.5%)、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ (纯度大于或等于 99.5%)

分别配制成质量浓度为 5、10、40、80、160 mg · L<sup>-1</sup> 的溶液(以氮和磷计)。称取 0.2 g 生物炭于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 各质量浓度的 NH<sub>4</sub>Cl 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液,在 25 °C、150 r · min<sup>-1</sup> 下恒温振荡 24 h,过孔径 0.22 μm 滤膜,获得滤液样品。利用 San++ 连续流动分析仪(荷兰 Skalar 公司)检测滤液中铵态氮的质量浓度,并采用钼锑抗比色法<sup>[18]314</sup>测定滤液中磷的质量浓度。吸附实验均设置 3 次生物学重复。根据公式计算生物炭对铵态氮和磷的吸附量,计算公式为  $Q_e = [(C_0 - C_e) \times V] / m$ ,式中,  $Q_e$  为吸附平衡时的吸附量,  $C_0$  为溶液的初始质量浓度,  $C_e$  为吸附平衡时的溶液质量浓度,  $V$  为溶液体积,  $m$  为生物炭添加量。

1.2.2.2 不同吸附时间下生物炭对铵态氮和磷的吸附量测定 分别配制铵态氮质量浓度为 30 mg · L<sup>-1</sup> 的 NH<sub>4</sub>Cl 溶液和磷质量浓度为 20 mg · L<sup>-1</sup> 的 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液。称取 0.2 g 生物炭,加入上述 NH<sub>4</sub>Cl 和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液中,在吸附 10、30、180、300 min 后,测定滤液中铵态氮和磷的质量浓度。其他实验条件和吸附量计算方法同“1.2.2.1”部分。

### 1.3 数据统计和分析

使用 EXCEL 2016 软件对数据进行整理,并使用 SPSS 25 软件对方差齐性的各处理数据进行单因素方差分析和 Duncan's 新复极差检验,而对方差不齐的数

据进行 Welch 和 Games-Howell 检验。使用 Origin 2021 软件绘制傅里叶变换红外光谱、X 射线衍射光谱和拉曼光谱。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同生物炭理化性质分析

2.1.1 比表面积、总孔容和平均孔径分析 结果(表 1)显示:小叶黄杨枝条炭的比表面积最大,玉米秸秆炭的比表面积次之,‘中山杉’枝条炭的比表面积最小;小叶黄杨枝条炭的总孔容最大,玉米秸秆炭和‘中山杉’枝条炭的总孔容接近,分别为 0.012 2 和 0.012 6 cm<sup>3</sup> · g<sup>-1</sup>;‘中山杉’枝条炭的平均孔径最大,小叶黄杨枝条炭的平均孔径次之,玉米秸秆炭的平均孔径最小。

2.1.2 pH 值、电导率和阳离子交换量分析 结果(表 1)显示:玉米秸秆炭、‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭的 pH 值均高于 pH 7,呈碱性,其中,小叶黄杨枝条炭和‘中山杉’枝条炭的 pH 值显著( $P < 0.05$ ) 低于玉米秸秆炭;电导率从高到低依次为小叶黄杨枝条炭、玉米秸秆炭、‘中山杉’枝条炭,三者间差异显著。小叶黄杨枝条炭和‘中山杉’枝条炭的阳离子交换量显著低于玉米秸秆炭,且前二者间差异显著。

表 1 不同生物炭理化性质分析 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Physical and chemical property analysis of different biochars ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

生物炭 Biochar	比表面积/(m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ) Specific surface area	总孔容/(cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> ) Total pore volume	平均孔径/nm Average pore diameter	pH 值 pH value	电导率/(μS · cm <sup>-1</sup> ) Electric conductivity	阳离子交换量/(cmol · kg <sup>-1</sup> ) Cation exchange capacity
YM	51.53	0.012 2	0.95	7.93±0.08a	1 170.67±21.50b	12.12±0.18a
ZS	11.07	0.012 6	4.56	7.44±0.02b	780.33±27.43c	3.55±0.06c
HY	76.83	0.024 6	1.28	7.52±0.08b	1 988.50±2.12a	6.48±0.06b

生物炭 Biochar	碳含量/% Carbon content	氢含量/% Hydrogen content	氮含量/% Nitrogen content	硫含量/% Sulphur content	氢碳比 Hydrogen/carbon ratio	总磷含量/(g · kg <sup>-1</sup> ) Total phosphorus content	全钾含量/(g · kg <sup>-1</sup> ) Total potassium content
YM	51.77	1.75	1.53	0.42	0.41	2.37±0.11b	16.72±0.36a
ZS	81.75	2.15	1.12	0.38	0.32	2.15±0.11b	9.28±0.17c
HY	69.89	2.89	2.67	0.40	0.50	3.95±0.12a	15.35±0.19b

<sup>1)</sup> YM: 玉米秸秆炭 Straw biochar of *Zea mays* Linn.; ZS: ‘中山杉’枝条炭 Branch biochar of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’; HY: 小叶黄杨枝条炭 Branch biochar of *Buxus sinica* var. *parifolia* M. Cheng. 同列中不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ).

2.1.3 元素含量分析 结果(表 1)显示:‘中山杉’枝条炭、小叶黄杨枝条炭中的碳含量明显高于玉米秸秆炭。小叶黄杨枝条炭中的氢和氮含量最高,明显高于玉米秸秆炭;‘中山杉’枝条炭中的氢含量亦高于

玉米秸秆炭,而氮含量低于玉米秸秆炭。‘中山杉’枝条炭、小叶黄杨枝条炭中硫含量低于玉米秸秆炭。小叶黄杨枝条炭的氢碳比最大,玉米秸秆炭次之,‘中山杉’枝条炭的氢碳比最小。小叶黄杨枝条炭中

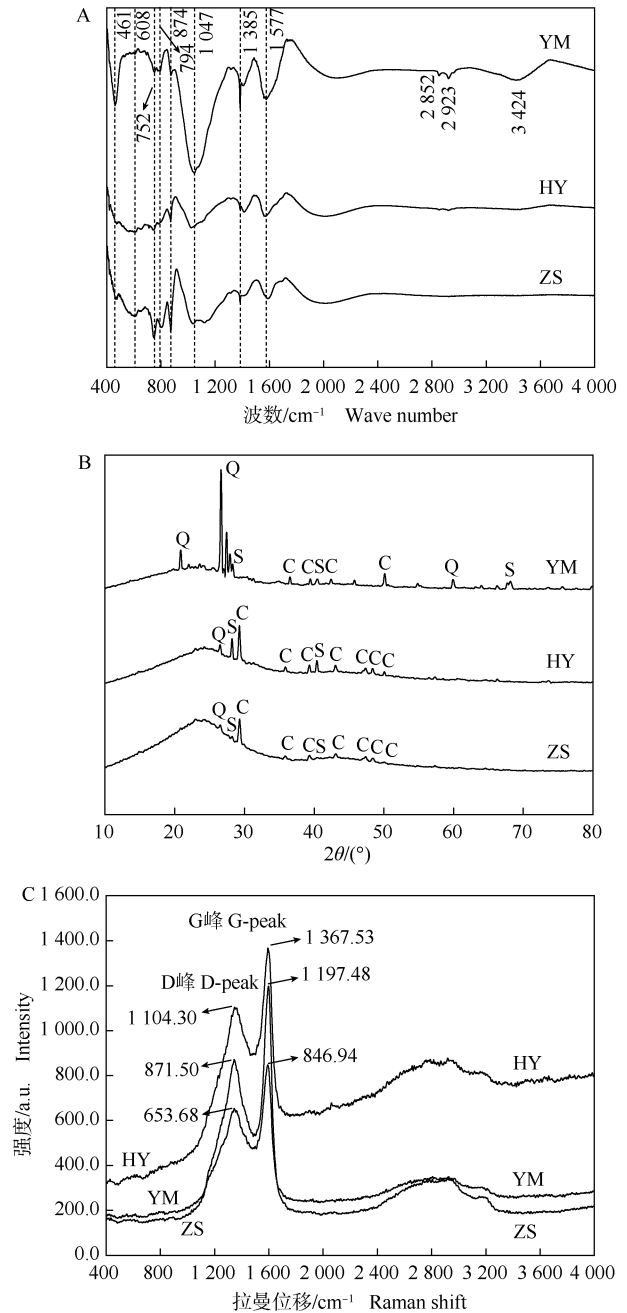
的总磷含量最高,显著高于玉米秸秆炭和‘中山杉’枝条炭;而小叶黄杨枝条炭和‘中山杉’枝条炭中的全钾含量显著低于玉米秸秆炭。

**2.1.4 光谱分析** 傅里叶变换红外光谱分析结果(图1-A)显示:3种生物炭在461、608、752、794、874、1 047、1 385和1 577  $\text{cm}^{-1}$ 附近均出现特征吸收峰。根据波峰信息可知,461  $\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰表示有机卤化物和无机卤化物中M-X的伸缩振动(M为金属元素,X为卤素),600~800  $\text{cm}^{-1}$ 范围的吸收峰为芳香族和杂环芳香族化合物C-H的弯曲振动区,而874和1 047  $\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰由 $\text{CO}_3^{2-}$ 的面外弯曲振动引起,1 385和1 577  $\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰则分别对应木质素中O-H伸缩振动及氨基酸-COO的反对称伸缩振动。3种生物炭虽在表面官能团组成上较为相似,但在461、1 047、1 385和1 577  $\text{cm}^{-1}$ 附近,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭吸收峰的强度明显低于玉米秸秆炭,说明2种生物炭在官能团含量上与玉米秸秆炭存在明显差别。此外,玉米秸秆炭在2 852、2 923、3 424  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现独有的吸收峰,说明在玉米秸秆炭中存在脂肪烃或环烷烃- $\text{CH}_2$ 的反对称和对称伸缩振动(2 852和2 923  $\text{cm}^{-1}$ ),以及醇羟基或酚羟基(-OH)的伸缩振动(3 424  $\text{cm}^{-1}$ )。

X射线衍射光谱分析结果(图1-B)显示:3种生物炭在26.5°、28.2°、35.9°、39.3°、40.4°、43.1°和50.1°附近均有较明显的衍射峰,其中35.9°、39.3°、43.1°和50.1°附近的峰代表方解石的存在,28.2°和40.4°附近的峰代表钾盐的形成,26.5°附近的峰则表示生物炭含有石英结构。‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭在26.5°附近的衍射峰强度明显低于玉米秸秆炭,说明其石英含量较低。此外,3种生物炭也表现出特有的峰。例如:‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭在29.3°、47.4°和48.4°附近均呈现代表方解石的特有衍射峰;而玉米秸秆炭在20.9°和59.9°附近的衍射峰代表石英的形成,在68.2°附近的衍射峰代表钾盐的形成。

拉曼光谱分析结果(图1-C)显示:3种生物炭均具有明显的D峰和G峰,分别位于1 343~1 347和1 592~1 599  $\text{cm}^{-1}$ 拉曼位移范围内。小叶黄杨枝条炭的D峰和G峰强度最高,‘中山杉’枝条炭和玉米秸秆炭的D峰和G峰强度较低,说明小叶黄杨枝条炭中无序或非晶态碳结构以及有序石墨晶体结构的含量较高。此外,‘中山杉’枝条炭、玉米秸秆炭、小叶黄杨枝条炭的

$I_D/I_G$  比分别为0.73、0.77、0.81,说明‘中山杉’枝条炭的有序石墨化程度最高,玉米秸秆炭次之,小叶黄杨枝条炭的有序石墨化程度最低。



YM: 玉米秸秆炭 Straw biochar of *Zea mays* Linn.; ZS: ‘中山杉’枝条炭 Branch biochar of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’; HY: 小叶黄杨枝条炭 Branch biochar of *Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng. Q: 石英 Quartz; S: 钾盐 Sylvite; C: 方解石 Calcite.

图1 不同生物炭傅里叶变换红外光谱(A)、X射线衍射光谱(B)和拉曼光谱(C)  
 Fig. 1 Fourier transform infrared spectroscopy (A), X-ray diffraction spectroscopy (B), and Raman spectroscopy (C) of different biochars

## 2.2 不同生物炭对铵态氮和磷的吸附特性

2.2.1 不同质量浓度铵态氮和磷下各生物炭的吸附特性 结果(表2)显示:随着铵态氮质量浓度的增加,3种生物炭对于铵态氮的吸附量呈逐渐升高的趋势,且各质量浓度处理组间差异显著( $P < 0.05$ )。5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铵态氮处理组中,玉米秸秆炭和小叶黄杨枝条炭对铵态氮的吸附量相同,略高于‘中山杉’枝条炭,三者间差异不显著;10、40、80  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铵态氮处理组中,小叶黄杨枝条炭对铵态氮的吸附量最大,玉米秸秆炭次之,‘中山杉’枝条炭对铵态氮吸附量最小,其中10和40  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铵态氮处理组中,小叶黄杨枝条炭对铵态氮的吸附量显著高于玉米秸秆炭,80  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铵态氮处理组中,三者间差异不显著;而160  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铵态氮处理组中,‘中山杉’枝条炭对铵态氮的吸附量略高于玉米秸秆炭和小叶黄杨枝条炭,三者间差异不显著。

结果(表2)还显示:与铵态氮的吸附特性相似,

随着磷质量浓度的增加,3种生物炭对磷的吸附量呈逐渐升高的趋势,且各质量浓度处理组间差异显著,在160  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷处理组中玉米秸秆炭、‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭对磷的吸附量分别达到13.98、13.99和14.05  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同一质量浓度下,除40  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷处理组,其他质量浓度处理组中小叶黄杨枝条炭对磷的吸附量均最大,‘中山杉’枝条炭次之,玉米秸秆炭对磷的吸附量最小。5、10、40、80  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷处理组中,小叶黄杨枝条炭对磷的吸附量总体显著高于玉米秸秆炭和‘中山杉’枝条炭;160  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 铵态氮处理组中,3种生物炭对磷的吸附量差异不显著。

2.2.2 不同吸附时间下各生物炭的吸附特性 结果(表3)显示:随着吸附时间的延长,3种生物炭对铵态氮的吸附量呈现先降低后升高的趋势。玉米秸秆炭和‘中山杉’枝条炭在吸附时间300 min时对铵态氮的吸附量最大,显著高于其余吸附时间;小叶黄杨

表2 不同质量浓度铵态氮和磷下各生物炭对铵态氮和磷的吸附量( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Adsorption amounts for ammonium nitrogen and phosphorus by each biochar under different mass concentrations of ammonium nitrogen and phosphorus ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ Mass concentration	对铵态氮的吸附量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Adsorption amount for ammonium nitrogen			对磷的吸附量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Adsorption amount for phosphorus		
	YM	ZS	HY	YM	ZS	HY
	5	0.44±0.02Ae	0.41±0.03Ae	0.44±0.01Ae	0.26±0.01Ce	0.30±0.00Be
10	0.93±0.01Bd	0.86±0.03ABd	0.96±0.01Ad	0.64±0.01Cd	0.70±0.01Bd	0.74±0.02Ad
40	3.60±0.03Be	3.34±0.13Be	3.79±0.03Ac	2.97±0.03ABc	2.94±0.01Bc	3.05±0.06Ac
80	5.50±0.33Ab	5.01±0.01Ab	5.68±0.26Ab	6.39±0.03Bb	6.41±0.01Bb	6.52±0.05Ab
160	12.73±1.20Aa	13.45±0.26Aa	12.76±0.87Aa	13.98±0.03Aa	13.99±0.02Aa	14.05±0.05Aa

<sup>1)</sup>YM: 玉米秸秆炭 Straw biochar of *Zea mays* Linn.; ZS: ‘中山杉’枝条炭 Branch biochar of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’; HY: 小叶黄杨枝条炭 Branch biochar of *Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng. 同行中不同大写字母表示同一处理下不同生物炭间差异显著( $P < 0.05$ ) Different uppercase letters in the same row indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different biochars in the same treatment; 同列中不同小写字母表示同一生物炭在不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different treatments by the same biochar.

表3 不同吸附时间下各生物炭对铵态氮和磷的吸附量( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Adsorption amounts for ammonium nitrogen and phosphorus by each biochar under different adsorption times ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

吸附时间/min Adsorption time	对铵态氮的吸附量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Adsorption amount for ammonium nitrogen			对磷的吸附量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Adsorption amount for phosphorus		
	YM	ZS	HY	YM	ZS	HY
	10	2.27±0.01Ab	2.25±0.07Ab	2.35±0.07Aa	1.31±0.01Bd	1.34±0.01Ac
30	1.96±0.13Abd	2.22±0.05Abe	2.23±0.16Aa	1.40±0.02Bc	1.40±0.02Bb	1.56±0.03Aa
180	2.12±0.02Acd	2.13±0.03Ac	2.15±0.01Aa	1.81±0.08Aa	1.52±0.01Ba	1.58±0.06Ba
300	2.81±0.02Aa	2.74±0.08Aa	2.68±0.49Aa	1.53±0.04Ab	1.58±0.08Aabc	1.62±0.06Aa

<sup>1)</sup>YM: 玉米秸秆炭 Straw biochar of *Zea mays* Linn.; ZS: ‘中山杉’枝条炭 Branch biochar of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’; HY: 小叶黄杨枝条炭 Branch biochar of *Buxus sinica* var. *parvifolia* M. Cheng. 同行中不同大写字母表示同一处理下不同生物炭间差异显著( $P < 0.05$ ) Different uppercase letters in the same row indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different biochars in the same treatment; 同列中不同小写字母表示同一生物炭在不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different treatments by the same biochar.

枝条炭在吸附时间 300 min 时对铵态氮的吸附量也最大,但与其他吸附时间下的铵态氮吸附量差异不显著。在同一吸附时间下,3 种生物炭对铵态氮的吸附量均无显著差异。

结果(表 3)还显示:随着吸附时间的延长,玉米秸秆炭对磷的吸附量在吸附时间 10~180 min 内呈升高的趋势,在吸附时间 300 min 时降低,而‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭对磷的吸附量呈逐渐升高的趋势。在吸附时间 10、30、300 min 时,小叶黄杨枝条炭对磷的吸附量均高于玉米秸秆炭和‘中山杉’枝条炭,但仅吸附时间 30 min 时前者与后二者间存在显著差异;而在吸附时间 180 min 时,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭对的磷吸附量显著低于玉米秸秆炭。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 不同材料对生物炭理化性质的影响

生物炭的比表面积和孔隙度是决定其吸附特性的重要指标,其孔隙特征通常受到生物炭制备材料、热解条件等的影响<sup>[19]</sup>。Zhao 等<sup>[20]</sup>通过对多种材料来源生物炭(热解温度 500 °C)的研究发现,木屑、废纸和骨渣生物炭的比表面积超过 100 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,牛、猪等动物粪便及小麦秸秆、花生壳等生物炭的比表面积为 20~50 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,而草、小球藻属植物(*Chlorella* spp.)等生物炭的比表面积较小(2~4 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>)。本研究中,小叶黄杨枝条炭和玉米秸秆炭的比表面积分别为 76.83 和 51.53 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,优于前述研究中多数生物炭的比表面积,‘中山杉’枝条炭的比表面积虽然较小(11.07 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>),但仍大于草和小球藻属植物等制备的生物炭。3 种生物炭中,玉米秸秆炭的比表面积等理化性质已有较多报道,但是由于玉米原材料来源、生物炭制备条件(热解温度、升温速率、滞留时间等)等方面的不同,通常会引起生物炭理化性质的差异。例如:Das 等<sup>[21]</sup>制备的玉米秸秆炭比表面积为 12.90~43.90 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>(热解温度 400~600 °C、升温速率 10 °C·min<sup>-1</sup>,滞留时间 4 h),而 Sarfaraz 等<sup>[22]</sup>测定的玉米秸秆炭比表面积为 4.24 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>(热解温度 450 °C,升温速率 10 °C·min<sup>-1</sup>,滞留时间 1 h)。

生物质原料中的木质素、纤维素和半纤维素等主要组分,经高温热解后,发生脱水、脱羧和缩聚等复杂的反应,其表面官能团和晶体结构也会发生变化<sup>[23]</sup>。

目前,傅里叶变换红外光谱(FTIR)以及 X 射线衍射(XRD)和拉曼(Raman)光谱等已作为主要手段,被应用于生物炭表观特征和结构的解析。通过对 3 种生物炭 FTIR、XRD 光谱的分析发现,与玉米秸秆炭不同,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭在 2 852、2 923、3 424 cm<sup>-1</sup>附近没有吸收峰,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭在 29.3°、47.4°和 48.4°附近均呈现代表方解石的衍射峰。已有研究揭示,与水稻、小麦、御谷(*Pennisetum glaucum* Linn.) 秸秆生物炭相比,500 和 600 °C 玉米秸秆炭在 2 923 cm<sup>-1</sup>附近表现出特有的吸收峰<sup>[24]</sup>,而与大豆[*Glycine max* (Linn.) Merr.] 秸秆炭的 XRD 光谱不同,500 °C 玉米秸秆炭在 1.92 Å(47.4°)未呈现衍射峰<sup>[25]</sup>,这与本研究中玉米秸秆炭的结果一致。在 Raman 光谱上,‘中山杉’枝条炭和玉米秸秆炭较为相似( $I_D/I_G$  比分别为 0.73 和 0.77),其有序石墨化程度均大于小叶黄杨枝条炭( $I_D/I_G$  比为 0.81)。与小麦秸秆、花生壳、木屑、动物粪便、虾壳等材料来源的生物炭(热解温度 500 °C)相比( $I_D/I_G$  比为 1.09~1.51)<sup>[20]</sup>,本研究中 3 种生物炭具有较低的  $I_D/I_G$  比,表明其有序石墨化程度处于较高的水平。

本研究中玉米秸秆炭、‘中山杉’枝条炭、小叶黄杨枝条炭均呈碱性,这符合生物炭的一般性质。与玉米秸秆炭相比,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭的 pH 值较低(分别为 pH 7.44 和 pH 7.52)。生物炭 pH 值的变化通常会受到酸性官能团(-COOH 和 -OH),以及碱性阴离子(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)含量的影响<sup>[21]</sup>。结合 FTIR 光谱可知,玉米秸秆炭虽在 1 577 和 3 424 cm<sup>-1</sup>附近存在较高强度氨基酸-COO 及醇羟基或酚羟基(-OH)的振动,但可能主要受到其较高 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量的影响(1 047 cm<sup>-1</sup>),导致玉米秸秆炭的碱性强于其他 2 种生物炭。在酸性土壤中施入碱性生物炭,可显著( $P<0.05$ )提高土壤的 pH 值,而且其中和效果随着生物炭碱性的升高而增强<sup>[26]</sup>。因此,玉米秸秆炭可能在调节土壤(特别是酸性土壤)pH 值方面具有潜在优势。电导率表示生物炭中所有水溶性离子的含量,而电导率较高的生物炭不利于植物生长<sup>[21]</sup>。本研究中的 3 种生物炭的电导率为 780.33~1 988.50 μS·cm<sup>-1</sup>,均低于盐土的界定电导率(4 000 μS·cm<sup>-1</sup>),说明施用 3 种生物炭对于土壤的盐度不会产生明显的负面效应;此外,由于‘中山杉’枝条炭的电导率最低,因此,在土壤中施用‘中山杉’枝条炭

可能安全性更高。阳离子交换量表示土壤胶体或其他材料能吸附可交换阳离子的总量<sup>[27]</sup>。3种生物炭中,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭的阳离子交换量显著低于玉米秸秆炭( $12.12 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),说明相对于木本植物原料,利用农作物秸秆进行生物炭制备可能更有利于提高生物炭的阳离子交换量。有研究指出,施用具有较高阳离子交换量的生物炭,可促进土壤阳离子交换量的显著提升<sup>[28]</sup>。因此,在土壤中施用玉米秸秆炭,可能在减少养分流失及提升养分有效性方面具有较突出的作用。

作为富碳有机材料,生物炭中的碳含量通常在41.6%~70.5%之间(基于对多种生物炭的Meta分析结果)<sup>[29]</sup>,施用生物炭可有效增加土壤中的有机碳<sup>[30]</sup>。本研究中‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭的碳含量分别为81.75%和69.89%,高于多数生物炭的碳含量。此外,氢碳比是反映生物炭芳香度的重要指标,生物炭氢碳比越小,表示其含有较多的芳香环结构和较高的稳定性<sup>[21]</sup>。本研究结果显示:3种生物炭的氢碳比为0.32~0.50(‘中山杉’枝条炭氢碳比最小),小于稻壳、松木屑、鸡粪、餐厨垃圾、造纸污泥等材料生物炭的氢碳比(0.56~1.36)<sup>[31]</sup>。综合以上结果,整体上‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭在增加土壤有机碳及土壤碳封存方面具有较明显的优势,其中‘中山杉’枝条炭的施用效果可能最好。除了碳含量,不同原料来源还对生物炭中氮、磷、钾的含量产生重要影响。例如:在农作物秸秆(小麦、水稻、玉米等)、榆(*Ulmus pumila* Linn.)木、竹木、稻壳、椰壳等原料制备的生物炭中,玉米秸秆炭中氮和磷含量最高,榆木炭中氮、磷含量最低<sup>[32-33]</sup>;而小麦秸秆炭和椰壳炭具有较高的钾含量,稻壳炭中钾含量最低,其中玉米秸秆炭中钾含量高于水稻秸秆炭、稻壳炭和榆木炭<sup>[33]</sup>。元素分析结果显示:小叶黄杨枝条炭中氮(2.67%)和总磷( $3.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )含量最高,而玉米秸秆炭中的全钾含量最高( $16.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),‘中山杉’枝条炭的氮、总磷、全钾含量整体上最低。基于此,在改良特定缺素土壤中,可选择相应元素丰富的生物炭施用。

### 3.2 不同生物炭对铵态氮的吸附特性

不同材料来源的生物炭由于理化性质的不同,在对水体铵态氮吸附能力上也存在差异。Gai等<sup>[34]</sup>的研究结果显示:各热解温度(400~700℃)下制备的玉米秸秆炭对铵态氮的吸附能力均强于小麦秸秆炭

和花生壳炭;而与稻壳、稻秆炭相比,玉米秸秆炭在各质量浓度铵态氮下( $0 \sim 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸铵)的吸附量较小<sup>[35]</sup>;也有研究指出,在不同滞留时间下制备的园林废弃树叶炭对铵态氮的吸附率均大于树枝炭<sup>[36]</sup>。供试的3种生物炭中,小叶黄杨枝条炭在5~80  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 铵态氮和吸附时间10~180 min下对铵态氮的吸附量最大。根据3种生物炭的理化性质可知,小叶黄杨枝条炭具有较大的比表面积和总孔容,发达的孔隙结构会提供更多的吸附位点,从而使小叶黄杨枝条炭表现出较强的铵态氮吸附能力。除了孔隙结构,生物炭表面官能团的种类和含量也决定着其表面的化学性质及其对铵态氮的吸附能力,如羟基等含氧官能团可促进铵态氮吸附反应的发生<sup>[37-38]</sup>。然而基于FTIR光谱信息,小叶黄杨枝条炭在表面官能团种类和含量上与‘中山杉’枝条炭并未有明显的区别,因此,推断小叶黄杨枝条炭对铵态氮较强的吸附能力与表面官能团无直接关联。此外,随着铵态氮质量浓度的增加,3种生物炭对铵态氮的吸附量也逐渐增大,其原因可能在于,溶液中铵态氮质量浓度增加,导致物质传输驱动力加大,进而有利于生物炭对铵态氮的吸附。本研究中,3种生物炭对铵态氮的吸附量随着吸附时间的增加呈现先降低后升高的趋势,表明3种生物炭在吸附时间300 min时尚未达到铵态氮吸附饱和状态。这与水稻秸秆、芦苇(*Phragmites communis* Trin.)、木屑和蛋壳炭对铵态氮吸附量随时间延长而逐渐增大(达到饱和前)的趋势不同<sup>[39]</sup>,而与玉米芯炭和棉花(*Gossypium hirsutum* Linn.)秸秆炭的铵态氮吸附量在吸附饱和前呈下降趋势的结果相似<sup>[40]</sup>,推测可能是由于短时间内生物炭未能稳定吸附铵态氮,其对铵态氮的解吸量大于吸附量所致。

### 3.3 不同生物炭对磷的吸附特性

生物炭对磷的吸附受物理和化学作用的影响。Zhao等<sup>[16]</sup>的研究结果表明:松木、稻壳、玉米秸秆炭对磷的最大吸附量依次减小,其比表面积也依次减小,推测3种生物炭的比表面积是影响其磷吸附能力的主要因子。而据彭启超等<sup>[35]</sup>报道,生物炭对磷的最大吸附量与比表面积无正相关关系,而与碱性官能团数量呈正相关关系,并认为生物炭对磷的吸附主要依赖化学作用。另有研究显示:生物炭表面金属氧化物和碱性官能团共同影响生物炭对磷的吸附能力<sup>[41]</sup>。本实验结果表明:小叶黄杨枝条炭在不同质量浓度磷和吸附时间下对磷的吸附量总体大于其他

生物炭。结合生物炭理化性质的分析可知,小叶黄杨枝条炭具有较高比表面积,而在碱性官能团等基团方面与其他生物炭无明显区别,由此推测小叶黄杨枝条炭可能主要通过其较多的吸附位点,在物理层面对磷进行吸附。当然,目前尚缺乏对3种生物炭中金属元素及金属氧化物含量的检测和分析,有关生物炭对磷吸附的其他潜在机制还有待探究。此外,3种生物炭对磷的吸附量随着磷质量浓度的增加而增大,这与水稻秸秆、松木、花生壳、稻壳等生物炭在相同磷质量浓度范围内的磷吸附特性相一致<sup>[16,42]</sup>。而随着吸附时间的增加,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭的磷吸附量同样呈递增趋势,而玉米秸秆炭对磷的吸附量则呈先增大(10~180 min)后减小(180~300 min)的趋势,说明玉米秸秆炭可能在180 min时对磷的吸附量达到饱和,并在之后发生了解吸反应。

### 3.4 结论

综上所述,‘中山杉’枝条炭和小叶黄杨枝条炭在表面官能团和晶体组成上较为相近,而‘中山杉’枝条炭的分子构型与玉米秸秆炭较为相似,其有序石墨化程度高于小叶黄杨枝条炭。3种生物炭中,小叶黄杨枝条炭的比表面积和孔容最大,导致其对铵态氮和磷的吸附效果整体最优。而‘中山杉’枝条炭中碳含量最高,且具有最小的氢碳比,在增加土壤有机碳及促进土壤碳封存方面具有较强的应用潜力,同时由于其电导率最低,可能具有较低的盐离子负面效应。相对其他2种木本植物炭,玉米秸秆炭具有最高的pH值和阳离子交换量,在酸性土壤酸碱度调节及土壤养分缓释和有效性提升方面具有潜在优势。在矿物质元素含量方面,小叶黄杨枝条炭含有最高水平的氮和总磷,而玉米秸秆炭中全钾含量最高,可选择特定的生物炭以改善相应缺素土壤的肥力。因此,可结合实际需求,选择合适的生物炭应用于土壤改良和污染物吸附等领域。

### 参考文献:

- [1] 刘婉,袁芳,曾慧聪,等. 农林废弃物生物炭的制备及其应用进展[J]. 生物化工, 2024, 10(3): 251-256.
- [2] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [3] ABBAS Z, ALI S, RIZWAN M, et al. A critical review of mechanisms involved in the adsorption of organic and inorganic contaminants through biochar [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(16): 448.
- [4] LIU C, XIA R, TANG M, et al. Improved ginseng production under continuous cropping through soil health reinforcement and rhizosphere microbial manipulation with biochar: a field study of *Panax ginseng* from Northeast China [J]. Horticulture Research, 2022, 9: uhac108.
- [5] LEHMANN J. Bio-energy in the black [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(7): 381-387.
- [6] ZHOU H, LI X, LI C, et al. Biochar pyrolyzed at low temperature enhanced acidophilous plant growth by promoting rhizospheric microbes in a slightly alkaline urban soil [J]. Biochar, 2021, 3: 603-614.
- [7] 王伟,隋秀玉,李晓晖,等. 农林废弃物生物炭制备及其在土壤中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(1): 1-9.
- [8] SINGH B P, COWIE A L, CHAN K Y. Soil Health and Climate Change [M]. Berlin: Springer, 2011: 345-368.
- [9] MUKOME F N D, ZHANG X M, SILVA L C R, et al. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(9): 2196-2204.
- [10] YIN Q, ZHANG B, WANG R, et al. Biochar as an adsorbent for inorganic nitrogen and phosphorus removal from water: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 26297-26309.
- [11] SENGUPTA S, NAWAZ T, BEAUDRY J. Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater [J]. Current Pollution Reports, 2015, 1(3): 155-166.
- [12] MA Z, LI Q, YUE Q, et al. Adsorption removal of ammonium and phosphate from water by fertilizer controlled release agent prepared from wheat straw [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171: 1209-1217.
- [13] KIZITO S, WU S, KIRUI W K, et al. Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 102-112.
- [14] WU X, QUAN W, CHEN Q, et al. Efficient adsorption of nitrogen and phosphorus in wastewater by biochar [J]. Molecules, 2024, 29: 1005.
- [15] 宋婷婷,赖欣,王知文,等. 不同原料生物炭对铵态氮的吸附性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 576-584.
- [16] ZHAO S, WANG B, GAO Q, et al. Adsorption of phosphorus by different biochars [J]. Spectroscopy Letters, 2017, 50: 73-80.
- [17] LIU Z, JIA M, LI Q, et al. Comparative analysis of the properties of biochars produced from different pecan feedstocks and pyrolysis temperatures [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 197: 116638.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] LENG L, XIONG Q, YANG L, et al. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar [J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 144204.
- [20] ZHAO L, CAO X, MAŠEK O, et al. Heterogeneity of biochar

- properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 256/257: 1-9.
- [21] DAS S K, GHOSH G K, AVASTHE R K, et al. Compositional heterogeneity of different biochar: effect of pyrolysis temperature and feedstocks[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: 111501.
- [22] SARFARAZ Q, DA SILVA L S, DRESCHER G L, et al. Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 8463.
- [23] 丁思惠, 方升佐, 田野, 等. 不同热解温度下杨树各组分生物质炭的理化特性分析与评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(6): 193-200.
- [24] BERA T, PURAKAYASTHA T J, PATRA A K, et al. Comparative analysis of physical and chemical, nutrient, and spectral properties of agricultural residue biochars as influenced by pyrolysis temperatures[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20: 1115-1127.
- [25] YUAN J H, XU R K, ZHANG H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 3488-3497.
- [26] CHINTALA R, MOLLINEDO J, SCHUMACHER T E, et al. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60: 393-404.
- [27] WEBER K, QUICKER P. Properties of biochar[J]. *Fuel*, 2018, 217: 240-261.
- [28] KARIMI A, MOEZZI A, CHOROM M, et al. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(2): 450-459.
- [29] IPPOLITO J A, CUI L, KAMMANN C, et al. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review[J]. *Biochar*, 2020, 2: 421-438.
- [30] LIU S, ZHANG Y, ZONG Y, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2016, 8: 392-406.
- [31] PARIYAR P, KUMARI K, JAIN M K, et al. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136433.
- [32] ZHANG X, ZHANG P, YUAN X, et al. Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physical and chemical properties of crop residue biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 296: 122318.
- [33] WANG Y, HU Y, ZHAO X, et al. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times[J]. *Energy and Fuels*, 2013, 27: 5890-5899.
- [34] GAI X, WANG H, LIU J, et al. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate [J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(12): e113888.
- [35] 彭启超, 刘小华, 罗培宇, 等. 不同原料生物炭对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1763-1772.
- [36] 田雪, 周文君, 郑卫国, 等. 不同碳化时间对园林废弃物生物炭氮磷吸附解吸研究[J]. *林业与环境科学*, 2020, 36(5): 41-47.
- [37] 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 等. 水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4980-4986.
- [38] JIANG Y H, LI A Y, DENG H, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus adsorption by Mg-loaded biochar from different feedstocks[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 276: 183-189.
- [39] XU D, CAO J, LI Y, et al. Effect of pyrolysis temperature on characteristics of biochars derived from different feedstocks: a case study on ammonium adsorption capacity [J]. *Waste Management*, 2019, 87: 652-660.
- [40] GAO F, XUE Y, DENG P, et al. Removal of aqueous ammonium by biochars derived from agricultural residuals at different pyrolysis temperatures[J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2015, 27(2): 92-97.
- [41] 王章鸿, 郭海艳, 沈飞, 等. 热解条件对生物炭性质和氮、磷吸附性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2805-2812.
- [42] 李振山, 黄瑞寅, 张猛, 等. 镁改性花生壳、水稻秸秆生物炭对磷素的吸附-解吸特征[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 42(2): 120-125.

(责任编辑: 郭严冬)