北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅰ：静态与动态吸湿性

周梦佳 万晨琪 马尔妮

Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* : static and dynamic hygroscopicity

Zhou Mengjia, Wan Chenqi, Ma Erni

引用本文:
周梦佳, 万晨琪, 马尔妮. 毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅰ：静态与动态吸湿性[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):159–166. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250203
Zhou Mengjia, Wan Chenqi, Ma Erni. Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅰ: static and dynamic hygroscopicity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):159–166. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250203

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250203

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

毛竹材径向篾抗拉和抗弯性能研究
Tensile and bending properties of radial slivers of Moso bamboo
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 140–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210333

古代与现代柏木的水分吸附热力学比较研究
A comparative study on moisture sorption thermodynamics of ancient and recent cypress
北京林业大学学报, 2023, 45(4): 126–135. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220355

毛竹不同构造中细胞化学成分及热稳定性研究
Chemical composition and thermal stability of cells in different structures of *Phyllostachys edulis*
北京林业大学学报, 2023, 45(8): 156–162. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230104

带状采伐毛竹林养分动态特征
Dynamic characteristics of nutrients in striped cutting Moso bamboo forests
北京林业大学学报, 2023, 45(4): 78–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220353

深共晶溶剂（DES）预处理协同聚乙烯醇（PVA）浸渍处理增强增韧竹材
Deep eutectic solvent (DES) pretreatment combined with polyvinyl alcohol (PVA) impregnation to enhance and toughen bamboo
北京林业大学学报, 2025, 47(8): 162–172. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250146

顺纹拉伸载荷下杨木多尺度结构的失效破坏特征
Fracture characteristics of poplar wood multiscale structures under longitudinal tensile loading
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 143–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250136

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250203

毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅰ:静态与动态吸湿性

周梦佳 万晨琪 马尔妮
(北京林业大学材料科学与技术学院,木材科学与工程北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:【目的】竹材是一种具有天然吸湿性的材料,细胞壁中“孔隙−吸着位点”共同作用是影响其吸湿性的关键因素,但这种共同作用是否影响青−黄两侧的静态容量与动态响应差异等方面研究仍显不足。本研究通过比较竹青侧、竹黄侧的“细胞壁孔隙−吸着位点−吸湿性能”,旨在探索具有径向梯度结构的竹材在静态、动态湿度条件下的吸湿−解吸行为。**【方法】**毛竹去青去黄,内侧 2 mm 为竹黄侧试样,外侧 2 mm 为竹青侧试样。研究由宏观的维管束体积分数至微观的“细胞壁孔隙−吸着位点”逐级深入,最终聚焦静态、动态吸湿性,并依据动态测试结果量化分析单位面积吸湿量(M_{ac})、单位面积放湿量(M_{dc})、湿缓冲值(MBV)等参数,比较竹青侧、竹黄侧“细胞壁孔隙−吸着位点”共同作用对静态、动态吸湿性的影响。**【结果】**竹青侧维管束体积分数(32.72 ± 2.10)% 高于竹黄侧(20.36 ± 1.60)%,这种梯度结构导致径向细胞壁孔隙结构参数和羟基可及度的差异。绝干状态下,竹青侧比表面积和孔体积均小于竹黄侧,羟基可及度(22.76 ± 0.43)% 也低于竹黄侧(24.77 ± 0.21)%。微观层面上“细胞壁孔隙−吸着位点”的共同作用导致宏观层面竹青侧静态容量与动态响应均小于竹黄侧。对于静态测试,70%RH 以上二者平衡含水率(EMC)差距增大;95%RH 时,竹青侧、竹黄侧 EMC 分别达到 19.48%、22.04%。对于湿度周期循环的动态条件,竹青侧和竹黄侧的含水率表现出与环境湿度相似的正弦变化趋势,但在相位上存在一定的滞后,竹黄侧对湿度响应更为敏感,其 M_{ac}、M_{dc}、MBV 均高于竹青侧。**【结论】**本研究由微观结构−宏观性能,揭示了竹青侧、竹黄侧“细胞壁孔隙−吸着位点”的梯度结构与静态容量、动态响应之间的内在联系机制,为竹材的加工应用从“经验控制”迈向基于“孔隙−位点协同”调控的尺寸稳定化提供科学依据。

关键词: 毛竹;径向梯度结构;动态吸湿;湿缓冲值;羟基可及度;孔隙−位点协同;尺寸稳定化;多尺度结构
中图分类号: S781.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000−1522(2025)11−0159−08
引文格式: 周梦佳,万晨琪,马尔妮. 毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅰ:静态与动态吸湿性[J]. 北京林业大学学报,2025,47(11):159−166. Zhou Mengjia, Wan Chenqi, Ma Erni. Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅰ: static and dynamic hygroscopicity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 159−166.

Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅰ: static and dynamic hygroscopicity

Zhou Mengjia Wan Chenqi Ma Erni
(Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering, School of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] Bamboo is a natural hygroscopic material. The synergistic effect of “pore-sorption sites” of cell wall is a key factor influencing its hygroscopicity. However, whether this synergistic effect influences the differences in static capacity and dynamic moisture sorption between the outer and inner layers remains unclear. By comparing the “cell wall pore-sorption sites-hygroscopicity” between the bamboo outer and inner layers, this study examined the moisture adsorption-desorption behavior of bamboo with a radial gradient structure under both static and dynamic humidity conditions. [**Method**] After removing the

收稿日期: 2025−06−06 **修回日期:** 2025−11−07
基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFD2200501)。
第一作者: 周梦佳。主要研究方向:木材物理学。Email: zhoumengjia23@bjfu.edu.cn 地址:100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。
责任作者: 马尔妮,教授。主要研究方向:木材物理、木材保护与改性。Email: maerni@bjfu.edu.cn 地址:同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

pith ring and bark of *Phyllostachys edulis*, samples from the outer 2 mm and inner 2 mm along the radial direction were defined as the bamboo outer layer and bamboo inner layer, respectively. The investigation progressed from the macroscopic vascular bundle volume fraction to the microscopic "cell wall pore-sorption sites", ultimately focusing on static and dynamic hygroscopicity. Parameters including moisture adsorption (M_{ac}), moisture desorption (M_{dc}), and moisture buffer value (MBV) of the outer and inner layers were analyzed based on dynamic test results. Thus, the influence of "cell wall pore-sorption sites" on the static and dynamic hygroscopicity was compared between the outer and inner layers. [**Result**] The vascular bundle volume fraction of the outer layer ((32.72 ± 2.10)%) was higher than that of the inner layer ((20.36 ± 1.60)%). Thereby, this gradient structure led to differences in radial pore structural parameters and hydroxyl of the cell walls. At the oven-dry state, the specific surface area and pore volume of the outer layer were smaller than those of the inner layer, and its hydroxyl accessibility ((22.76 ± 0.43)%) was also lower than that of the inner layer ((24.77 ± 0.21)%). The microscopic interplay between cell wall pore and sorption sites led to the observed macroscopic result: static capacity and dynamic response of the outer layer were both lower than those of the inner layer. For static tests, there were significant differences in equilibrium moisture content (EMC) between the two sides when the RH exceeded 70%. When the RH reached 95%, the EMC of bamboo outer and inner layers were 19.48% and 22.04%, respectively. Under dynamic conditions of humidity cycle, compared with RH, the moisture content of both the bamboo outer and inner layers showed a similar trend, but lagged in phase. The inner layer was more sensitive to humidity with higher M_{ac}, M_{dc}, and MBV. [**Conclusion**] By testing from microscopic structure to macroscopic performance, this study elucidated the mechanism connecting the gradient structure of "cell wall pore-sorption sites" to the static capacity and dynamic moisture sorption of the outer and inner layer, providing a scientific basis for advancing bamboo processing from "empirical control" to dimension stabilization regulated by "pore-site synergy".

Key words: *Phyllostachys edulis*; radial gradient structure; dynamic vapor sorption (DVS); moisture buffer value (MBV); hydroxyl accessibility; pore-site synergy; dimensional stabilization; hierarchical structure

竹材是一种生长快、强度高的可再生生物质材料，近年来在地板、家具及建筑等领域应用广泛[1]。与其他生物质材料一样，竹材因富含亲水性羟基而易吸湿，进而导致产生尺寸变形、腐朽霉变等问题，成为制约其高效利用的瓶颈。细胞壁内的吸湿行为由“物理空间”与“化学位点”共同决定[2]：前者指细胞壁孔隙对水分的容纳能力与毛细凝结[3]；后者指细胞壁实质上可及羟基对水分子吸附的氢键作用[4]。对这两种因素的深入挖掘，是提升竹材尺寸稳定性的理论基础。

竹材在宏观–微观尺度均呈现“结构梯度”特征：在径向上，外层竹青侧维管束分布密集，纤维体积分数大；内层竹黄侧维管束分布稀疏，薄壁细胞更具优势[5]。细胞水平上，学者或分离细胞研究，发现竹纤维的孔隙率、比表面积、介孔孔容等细胞壁孔隙参数均低于薄壁细胞[6]；或将竹材分层研究，结果表明细胞壁孔隙参数由竹黄侧到竹青侧逐渐减小[7]。化学组分方面，江甜[8]与 Wei 等[9]分别报道纤维素、半纤维素、木质素在径向上的含量分布，但结果互有出入，且均未将“组分–吸着位点”纳入同一逻辑链。因此，竹青侧与竹黄侧的细胞壁孔隙、吸着位点及实际吸湿行为是否存在异同，仍有待进一步研究。

另一方面，已有工作几乎集中在竹材静态吸湿层面[10−13]，而实际使用过程中，温、湿度通常只在小范围内动态循环变化[14−15]，使得竹材含水率在小幅湿度区间内周期波动，因此已有研究的静态数据并不能指导动态应用。Panshin 等[16]早就指出，椴木从生材到绝干跨度下的干缩预测值远高于实际变形值，提示动态湿度循环才是实际使用的核心场景。随着动态吸湿研究逐渐受到关注[17]，Yang 等[18]证实木材含水率会与环境湿度一样，呈现正弦规律且具有一定的滞后性，而竹材在动态条件下的吸湿–解吸行为及其影响因素尚缺系统报道。

在竹材的径向梯度上，细胞壁孔隙结构与吸着位点如何共同决定静态吸湿容量与动态吸湿响应？围绕该问题，本文以毛竹的竹青侧、竹黄侧为研究对象，系统解析细胞壁孔隙参数、羟基可及度与静态、动态吸湿行为的关系，对比青–黄两侧在“静态容量–动态响应”上的差异，明确结构–性能的构效机制，为竹材尺寸稳定性及室内湿度缓冲应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材　料

毛竹（*Phyllostachys edulis*），采集自江西宜春，去青去黄后加工成 20 mm（纵向，*L*）× 20 mm（弦向，*T*）× 7 mm（径向，*R*）的竹块试样，使用线切机在径向上取外层 2 mm 作为竹青侧试样，外层 2 mm 作为竹黄侧试样（图 1），其余根据送样要求制备。

1.2　研究方法

1.2.1　维管束体积分数

为实现竹材径向梯度结构的可视化，本研究选取完整竹壁，采用光学显微镜进行观测，并结合 Image J 软件对图像进行分析，量化竹青侧、竹黄侧的维管束分布。将尺寸为 10 mm（*L*）× 10 mm（*T*）× 7 mm（*R*）的竹块泡水软化 5 d，擦干表面水分后进行切片处理，试样厚度为 20 μm，随后使用光学显微镜进行观察。维管束体积分数即维管束总面积与试样总面积的比值，其测量计算使用放大倍数为 40 倍图像，维管束选定区域如图 2 所示，重复样数量为 10。

1.2.2　氮气吸附–脱附

为表征竹材细胞壁的孔隙结构，采用美国康塔公司生产的 Autosorb-iQ2-MP 型全自动比表面积与孔径分析仪，计算比表面积、介孔孔径分布及累计孔体积等特征参数。

通过植物粉碎机分别将竹青侧、竹黄侧试样制成 40 ~ 60 目的粉末，将质量约为 0.5 g 的竹粉试样放入样品仓，在 80 ℃ 下脱气 11 h，目的是去除以物理形式依附在竹材孔隙表面上的气体及其他吸附杂质分子。脱气处理完成后使试样自然冷却至室温，称量样品管与试样的质量，并计算试样净质量。

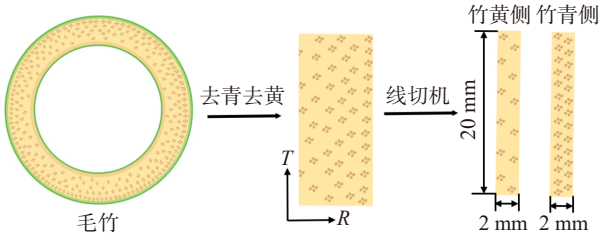


图 1　试验试样制备示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental specimen preparation

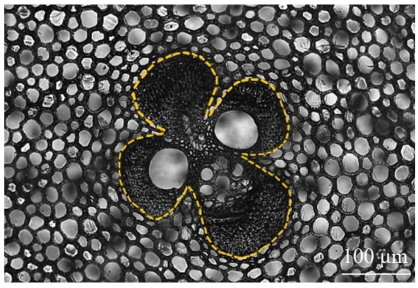


图 2　测量维管束体积分数示意图

Fig. 2　Schematic diagram for measuring volume fraction of vascular bundles

测得不同相对压力下的平衡氮气吸附量后，采用 Brunauer-Emmett-Teller（BET）方法对竹粉试样的比表面积进行评估，计算如式（1）。

$$S_g = \frac{V_0 N_A A_m}{V_m W} \times 10^{-18} \tag{1}$$

式中：S_g 为被测样品比表面积（m^2/g），V_0 为标准状态下气体分子单层饱和吸附量（mL），N_A 为阿伏伽德罗常数，A_m 为气体分子等效最大横截面积（m^2），V_m 为气体摩尔体积，取 22 400 mL/mol，W 为被测样品质量（g）。

氮气吸附法孔径分布采用 Barrett-Joyner-Halenda（BJH）法。BJH 分析方法的基础是 Kelvin 毛细管凝聚理论，通过对 Kelvin 方程推理转化即可得到孔隙半径。

$$R_k = -\frac{2\gamma V_m}{RT\ln(p/p_0)} \tag{2}$$

式中：R_k 为毛细管半径（nm），γ 为氮气沸点时表面张力（N/m），V_m 为氮气的摩尔体积（cm^3），R 为普适气体常数，T 为分析温度，取值 77.35 K，p/p_0 为氮气的相对压力。

1.2.3　羟基可及度

本研究将羟基可及度作为表征吸着位点的量化参数。采用 ATR-FTIR（衰减全反射–傅里叶变换红外光谱法）联合重水置换法，根据 OH 和 OD 伸缩振动峰的积分面积变化，对绝干竹材细胞壁的羟基可及度进行表征。将 40 ~ 60 目竹青、竹黄粉末分别浸于重水，H 和 D 互为同位素，利用重水中的 D 与竹材细胞壁中的羟基 H 进行置换；将试样放入真空干燥罐，并抽真空至−0.1 MPa，保持 48 h，确保试样中的 H 被完全置换成 D。保持负压，连同真空罐置于烘箱中 80 ℃ 烘至绝干。ATR-FTIR 扫描波长范围 500 ~ 4 000 cm^{-1}，扫描次数 32 次，得到 OH 和 OD 的特征峰后，使用 Origin 9.0 进行基线校准、归一化处理、峰面积计算等，利用式（3）计算试样羟基可及度。

$$OH_{acci} = \frac{S_{OD}}{S_{OD} + S_{OH}} \tag{3}$$

式中：OH_{acci} 为绝干试样羟基可及度，S_{OD} 为 OD 峰面积，S_{OH} 为 OH 峰面积。

1.2.4　静态吸湿性

为表征竹材的静态吸湿性（恒定温湿度条件下静态容量与吸着速率），采用水蒸气动态吸附（dynamic vapor sorption，DVS）测试法。取 40 ~ 60

目绝干粉末 50 mg 置于 DVS 仪器内部的微量天平内，设定 DVS 仪器温度为 25 ℃，相对湿度从 0 逐步提升至 95%，然后再降至 0，吸湿、解吸阶段的湿度变化步长一致，均为 5% 或 10%，具体参数设置如表 1 所示。仪器监测样品质量的间隔为 15 min。在所设的各个湿度下，样品在 45 min 内质量变化在 0.05%/min 以下时，便视为已经到达平衡含水率（equilibrium moisture content，EMC）。

表 1　DVS 测试中相对湿度变化与步长

Tab. 1　Relative humidity variation and step size in DVS tests

阶段	相对湿度
吸湿过程	0,10%,20%,30%,40%,50%,60%,70%,80%,90%,95%
解吸过程	95%,90%,80%,70%,60%,50%,40%,30%,20%,10%,0

1.2.5　动态吸湿性

为了评估竹青侧、竹黄侧的动态湿度响应，通过电子式恒温恒湿箱模拟大气湿度环境，获得竹青侧、竹黄侧试样含水率随湿度正弦变化的图像，并依据测试数据计算单位面积吸湿量（M_{ac}）、单位面积放湿量（M_{dc}）、湿缓冲值（MBV）等动态吸湿性参数。将电子式恒温恒湿箱设置温度 25 ℃，相对湿度在（50.0 ± 3.0）% ~（80.0 ± 3.0）% 之间正弦变化。20 mm（L）× 20 mm（T）× 2 mm（R）的竹青侧、竹黄侧试样先在 50%RH 下达到平衡状态，随后移入电子式恒温恒湿箱中进行湿度循环试验，循环周期为 24 h，循环次数为 7 次，最后将试样放入烘箱中 103 ℃ 下烘至绝干，记录质量 m_0。

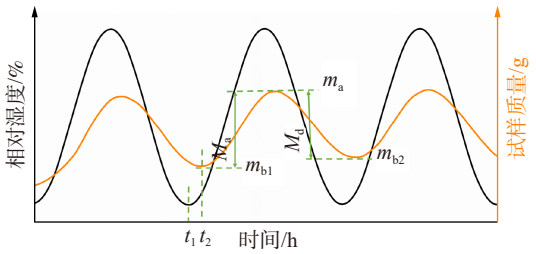
温、湿度由预设定的程序进行控制，并由放置在试样旁边的温湿度记录仪进行实时监测。在此过程中，利用箱内的电子分析天平（精确至 0.1 mg）实时测定试样质量，每隔 15 min 记录一次试样的质量 m_1 和箱内环境中的相对湿度，竹青侧、竹黄侧分别重复 3 个试样，取环境相对湿度和试样含水率（最后 4 个循环的稳定数据）的平均值使用 Origin 9.0 绘制二者的关系图，计算 M_{ac}、M_{dc}、MBV 等参数，参数计算示意图如图 3 所示。

$$M_{ac}=\frac{M_a}{A}=\frac{m_a-m_{b1}}{A} \tag{4}$$

式中：M_{ac} 是单位面积的吸湿量（g/m²），M_a 是试样吸湿量（g），m_a 是试样质量峰值（g），m_{b1} 是同一周期第一个低谷值（g），A 为试样的暴露面积（m²）。

$$M_{dc}=\frac{M_d}{A}=\frac{m_a-m_{b2}}{A} \tag{5}$$

式中：M_{dc} 是单位面积的放湿量（g/m²），M_d 是试样放湿量（g/m²），m_{b2} 是同一周期第二个低谷值（g）。



M_a 为试样的吸湿量（g），m_a 是试样质量峰值（g），M_d 为试样的放湿量（g），m_{b1} 是同一周期第一个低谷值（g），m_{b2} 是同一周期第二个低谷值（g），t_1 为环境相对湿度峰/谷值对应的时间，t_2 为试样质量峰/谷值对应的时间。

图 3　动态吸湿性相关参数的计算示意图

Fig. 3　Diagram illustrating calculation of dynamic hygroscopicity-related parameters

$$\mathrm{MBV}_{practice}=\frac{\max\left(M_a,M_d\right)}{A\left(\varphi_{high}-\varphi_{low}\right)} \tag{6}$$

式中：$\mathrm{MBV}_{practice}$ 为湿缓冲值（g/(m²·%RH)），M_a 为试样的吸湿量（g），M_d 为试样的放湿量（g），A 为试样的暴露面积（m²），φ 为试验设定的高低相对湿度（%）。

M_{ac}、M_{dc}、MBV 均是反映对动态条件响应大小的参量，而响应快慢用滞后率表征。滞后率（δ_h）表示在一个周期内，试样质量峰/谷值相对于环境相对湿度峰/谷值的时间位差，计算如式（7）所示。

$$\delta_h=\frac{t_2-t_1}{T} \tag{7}$$

式中：t_1 为环境相对湿度峰/谷值对应的时间（h），t_2 为试样质量峰/谷值对应的时间（h），T 为周期，本研究取 24 h。

2　结果与讨论

2.1　维管束分布

竹壁主要由维管束和薄壁细胞组成，通过图 4 可以观察到维管束分布由竹青侧到竹黄侧逐渐减少，且其形状由“半开放式”逐渐变为“开放式”[19]。进一步计算，竹青侧维管束体积分数为（32.72 ± 2.10）%，竹黄侧为（20.36 ± 1.60）%。而在竹材中，维管束主要由竹纤维组成，竹纤维具有腔小壁厚的特点，导致水分难以扩散与渗透；而包围维管束的薄壁细胞腔大壁薄，可能对于湿度的响应更为明显，为竹材对水分的敏感性奠定了结构基础。

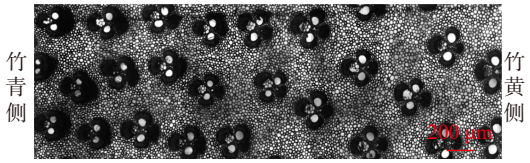


图 4　竹材径向维管束分布

Fig. 4　Distribution of radial vascular bundles in bamboo

2.2　细胞壁孔隙结构

根据国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）分类[20]，竹青侧、竹黄侧的吸附–脱附曲线均属于Ⅳ型等温线（图 5a），表明试样具有微孔和介孔孔隙结构，二者吸附滞后环表现为 H3 型滞后环，即细胞壁孔隙呈狭缝形[21]，与单独分离竹纤维、薄壁组织以及木材所测得的孔隙形状一致。就氮气吸附量而言，竹黄侧各段压力范围所对应的吸脱附氮气量高于竹青侧，表明竹黄侧细胞壁孔隙较多或孔径较大。

竹青侧、竹黄侧细胞壁介孔孔径分布趋势基本一致，孔径峰值均在 2 nm 左右，孔径集中分布在 2 ~ 5 nm（图 5b）。曹梦丹[22]对竹材细胞壁孔隙的研究中发现，竹纤维、薄壁组织孔径分布主要集中在 2 ~ 10 nm，而本研究中 5 ~ 10 nm 孔隙分布较少，可能是由于竹材本身的变异性所致。对竹青侧、竹黄侧介孔孔径分布的差异进行分析，竹黄侧在 1.8 ~ 2.2 nm 和 10 nm 以上的范围内单位孔体积明显高于竹青侧。这种差异导致竹青侧、竹黄侧的细胞壁累计介孔体积在孔径小于 15 nm 时几乎无差别，孔径大于 15 nm 时二者的差距逐渐增大（图 5c）。

整体来看，竹青侧的比表面积、总孔体积、平均孔径均低于竹黄侧，这是因为纤维细胞的上述参数低于薄壁细胞[22]，导致维管束（纤维）体积分数高的竹青侧（图 4）细胞壁孔隙参数均低于竹黄侧（表 2）。竹材细胞壁孔隙发达程度低于木材，木材细胞壁比表面积、总孔体积约是竹材的 2 ~ 4 倍[23]。

2.3　羟基可及度

在 1 160 cm^{-1} 处进行红外归一化处理后，竹青侧、竹黄侧各峰的相对强度如图 6 所示。其中 3 350 cm^{-1} 为羟基伸缩振动峰（OH），2 500 cm^{-1} 处为氘代羟基（OD）。竹青侧由于具有较多的细胞壁实质，其 OH 峰、OD 峰的强度均高于竹黄侧。由 OH、OD 峰面积得到的竹青侧、竹黄侧羟基可及度分别为（22.76 ± 0.43）%、（24.77 ± 0.21）%。羟基可及度与纤维素的无定形区域和半纤维素含量呈正相关。已有研究表明，竹纤维细胞的纤维素含量、结晶度比薄壁细胞高，半纤维素含量低[24]，化学成分的复合性可能导致竹纤维体积分数较高的竹青侧羟基可及度略低于竹黄侧。

2.4　静态条件下竹材吸湿性

竹青侧、竹黄侧的等温吸附曲线（图 7a）均呈现“S”形，符合 II 型等温线分类规律[25]。吸湿过程具体表现为：在吸湿起始阶段（RH < 20%），等温线斜率由大变小；随着相对湿度逐渐升高（RH 20% ~ 70%），等温线斜率逐渐趋缓；当 RH > 70% 后，EMC 急剧攀升至最大值，解吸过程则呈现相反趋势。在 RH < 70% 范围，竹青侧、竹黄侧每个吸湿阶段 EMC 差值在 0.04% ~ 0.15% 之间；从 RH 70% ~ 95% 区间，竹青侧、竹黄侧 EMC 分别升高了 9.31%、11.66%，二者差距在 0.20% ~ 2.56% 区间。最终，在 RH 95% 时，竹黄侧的 EMC 达到最大值 22.04%，高于竹青侧（19.48%），这一结果与 Wei 等[9]、Chen 等[12]使用 DVS 技术测量竹材分层 EMC 的趋势相同。竹材径向上含水率差异与其梯度结构密切相关，竹薄壁细胞在高湿环境下具有更优的吸湿性[10]，导致薄壁体积分数高的竹黄侧（图 4）在 RH 大于 70% 时其 EMC 明

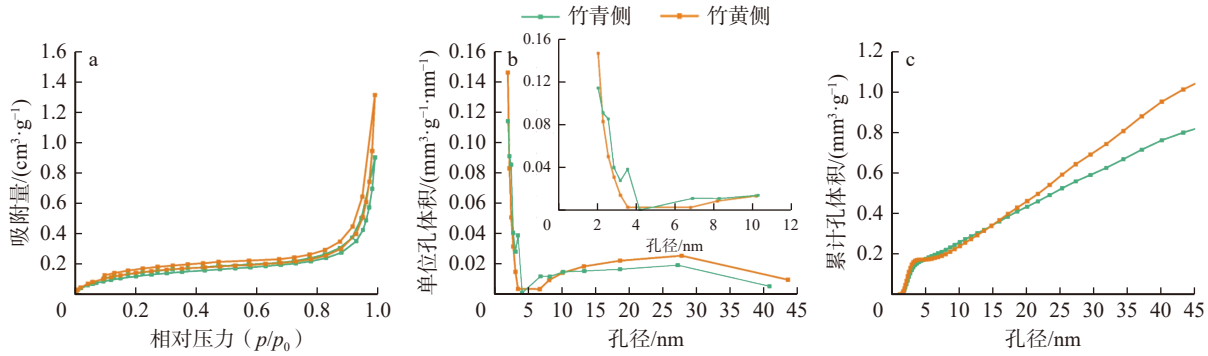


图 5　竹青侧、竹黄侧的氮气吸附测试结果

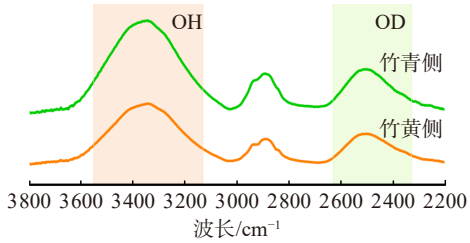
Fig. 5　Results of nitrogen adsorption tests on bamboo outer layer and bamboo inner layer

表 2　竹青侧、竹黄侧细胞壁介孔孔隙参数

Tab. 2　Mesoporous parameters of cell walls on bamboo outer layer and bamboo inner layer

位置	S_{BET}/(m²·g⁻¹)	V_{total}/(mm³·g⁻¹)	D_a/nm	D_d/nm
竹青侧	0.489 ± 0.040	1.235 ± 0.089	16.152 ± 1.903	2.033 ± 0.003
竹黄侧	0.564 ± 0.099	1.598 ± 0.244	16.564 ± 2.018	1.868 ± 0.127

注：表格数据均使用氮气脱附曲线计算，S_{BET}为BET法测得的孔隙比表面积，V_{total}为BJH法测得的总孔体积，D_a为BJH法测得的平均孔径，D_d为BJH法测得的最可几孔径，即介孔孔径曲线分布的峰值。



选取纤维素 C—O—C 伸缩振动吸收峰(1 160 cm^{-1})作为归一化基准，该峰位不受水分干扰。图中光谱仅展示了包含 OH 与 OD 特征峰的波段范围。

图 6 绝干状态下竹青侧、竹黄侧的红外谱图分析

Fig. 6 FTIR spectral analysis of bamboo outer layer and bamboo inner layer at oven-dry state

显高于竹青侧。

对于静态吸湿性，除了通过不同相对湿度条件下的平衡含水率表征其吸湿性大小外，还可以表征其吸着速率。竹青侧、竹黄侧的吸着速率如图 7b 所示，每个峰宽代表一个吸湿阶段，整体来看，二者吸着速率均呈现先下降后上升的趋势，其原因可能是低湿阶段以单分子层吸附为主，由于吸着位点数量的限制，吸着速率呈下降趋势[11]；在高湿阶段，水分具有扩孔的效果，孔隙的进一步扩大有利于水分子的容纳和扩散，促使吸着速率上升[26]。在吸湿过程的第一阶段(RH 0 ~ 10%)，竹黄侧吸着速率高于竹青侧，可能与其较多的吸着位点有关；RH 在 10% ~ 70% 区间，竹黄侧吸着速率与竹青侧基本持平；在 RH 70% ~ 95% 区间，竹黄侧吸着速率高于竹青侧，RH 大于 80% 时差距尤为明显，可能是因为竹黄侧具有较大的细胞壁介孔孔隙，为水分子提供容纳空间。以上结果表明在低湿和高湿阶段，细胞壁孔隙和吸着位点的差异致使二者的吸着速率差距更为明显。

2.5 动态条件下竹材吸湿性

2.5.1 含水率变化趋势

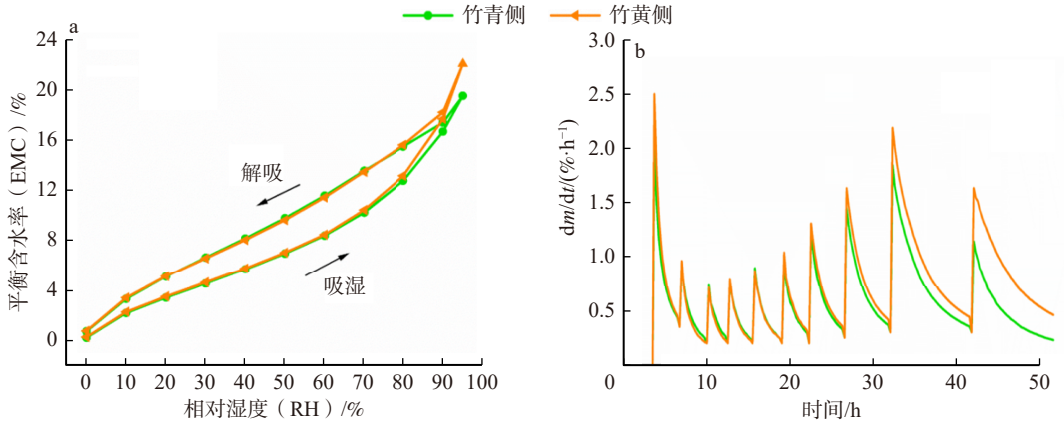
竹青侧、竹黄侧的含水率与相对湿度呈现相似的正弦变化趋势，且在相位上相对于湿度存在一定的滞后(图 8)。波峰波谷采用振幅强度表征响应大小，以相位滞后表征响应快慢。

在含水率维度上，试样峰值和谷值均随周期的循环而逐渐上升，至第 3 周期基本实现平衡。竹黄侧第 1、第 2、第 3 周期峰值分别增加了 1.10%、0.95%、0.32%，谷值分别增加了 6.17%、0.80%、−0.40%；竹青侧峰值分别上升了 2.36%、1.44%、0.74%，谷值分别上升了 5.2%、0.99%、0.74%，表明从第 3 周期开始，试样含水率正弦变化逐渐趋向稳定，对环境的响应逐渐充分。竹青侧、竹黄侧含水率振幅波动范围分别在 8.19% ~ 10.76% 和 9.17% ~ 12.58% 之间。相比较而言，无论是峰值还是谷值，竹青侧含水率均低于竹黄侧，且竹黄侧含水率变化范围更为明显。

在时间维度上，试样呈现一定的相位滞后现象，即试样含水率周期滞后于环境湿度周期。竹黄侧第 1 至第 7 周期峰值滞后率为 5.25% ~ 6.88%，谷值滞后率为 6.25% ~ 10.52%；竹青侧相应数值分别为 5.06% ~ 6.25% 和 6.85% ~ 10.12%。谷值滞后率比峰值高，表明低湿度条件下试样表现出更稳定的水分保持能力；相较于低湿度环境下，试样在高湿度环境下响应更加充分，可与环境湿度变化同步。就相位滞后而言，竹青侧与竹黄侧的实测数据并未表现出明显差异。

2.5.2 动态吸湿性参数

竹黄侧细胞壁孔隙为水分提供了更多容纳空间。表 3 显示：竹黄侧单位面积吸湿量、单位面积放湿量和湿缓冲值比竹青侧分别高出 2.898 g/m^2、3.569 g/m^2 和 0.125 $g/(m^2·\%)$，即竹黄侧对于水分的响应速度更快。木材湿缓冲值约为 0.83 $g/(m^2·\%)$[27]，竹材湿缓冲值约是木材的 1/2[28]，这可能与竹材本身



d*m*/d*t* 代表吸着水质量变化与时间的比值，反映吸着速率，纵坐标高表示吸着速率快，纵坐标低表示吸着速率慢。

图 7 竹青侧、竹黄侧的等温吸附曲线(a)和吸着速率(b)

Fig. 7 Sorption isotherm (a) and sorption rate (b) of bamboo outer layer and bamboo inner layer

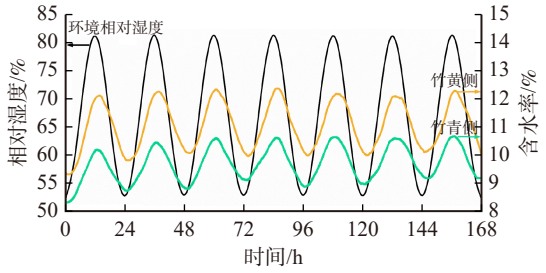


图 8　竹青侧、竹黄侧含水率随相对湿度正弦变化图

Fig. 8　Moisture content versus sinusoidal variation of relative humidity on the bamboo outer layer and bamboo inner layer

具有更少的孔隙和吸着位点有关。

动态吸湿与解吸过程中，竹材表层水分与外界环境不断交换，同时竹材内部也存在水分扩散，宏观上表现为含水率的正弦变化。水分扩散路径主要包括细胞腔、纹孔、细胞壁等[29]，对于本研究使用的竹青侧、竹黄侧试样，无论是竹材表层还是内部扩散，细胞腔都是水分的主要扩散路径[30]。竹材在径向上具有维管束和薄壁组织交替排列的特点，水分扩散会受到这种结构的影响，竹黄侧的薄壁细胞体积分数更多，薄壁细胞的胞腔显著大于纤维细胞，为水分提供更有利的扩散通路。因此在含水率的梯度作用下，当外界湿度动态变化时，竹黄侧水分扩散速率更快，对于水分的响应更为敏感，其单位面积吸湿量、单位面积放湿量和湿缓冲值均高于竹青侧。

表 3　竹青侧、竹黄侧动态吸湿性参数

Tab. 3　Dynamic moisture sorption parameters for the bamboo outer layer and bamboo inner layer

位置	单位面积吸湿量(M_{ac})/(g·m^{-2})	单位面积放湿量(M_{dc})/(g·m^{-2})	湿缓冲值(MBV)/(g·m^{-2}·%$^{-1}$)
竹青侧	9.761 ± 0.552	9.795 ± 0.218	0.347 ± 0.019
竹黄侧	12.659 ± 1.066	13.364 ± 1.249	0.472 ± 0.039

3　结　　论

本研究以毛竹竹青侧、竹黄侧为研究对象，揭示了二者“细胞壁孔隙–吸着位点”的共同作用与静态、动态吸湿行为之间的内在联系，为竹材在湿度响应领域的应用提供了科学依据。主要结论有以下 3 点。

(1)绝干状态下，竹青侧、竹黄侧细胞壁介孔孔径分布主要在 2 ~ 5 nm 范围内，相较于竹青侧，竹黄侧具有更多 1.8 ~ 2.2 nm 范围和 10 nm 以上的孔径分布。此外，竹黄侧比表面积、总孔体积、平均孔径等细胞壁孔隙参数均高于竹青侧；相较于竹青侧，竹黄侧具有更多的吸着位点，二者的羟基可及度分别为(22.76 ± 0.43)%、(24.77 ± 0.21)%。

(2)对于静态吸湿性，竹青侧、竹黄侧等温吸附曲线均呈现“S”形。当 RH > 70% 时，二者的平衡含水率(EMC)出现明显差异。当 RH = 95% 时，竹青侧的 EMC 达到最大值 19.48%，竹黄侧则升至 22.04%。对于吸着速率，二者均以 10% 和 70% RH 为界呈先降后升的趋势；在 RH < 10% 及 RH > 70% 区间，竹黄侧速率高于竹青侧，而在 10% ~ 70%RH 范围内，两者基本持平。

(3)对于动态吸湿性，竹青侧、竹黄侧含水率均随相对湿度呈正弦波动，但相位均滞后于湿度。竹黄侧细胞壁孔隙多、可及羟基量高，赋予其更大的水分容纳空间与更多吸着位点，因而含水率、单位面积吸湿/放湿量及湿缓冲值对湿度变化的响应幅度更明显。

综上所述，本研究从“细胞壁孔隙–吸着位点”的视角出发，明确了具有径向梯度结构的毛竹微观结构对其宏观静态与动态吸湿–解吸行为的影响，揭示了竹黄侧“细胞壁孔隙–吸着位点”的共同作用使得其对水分的静态容量和动态响应较竹青侧更为敏感，这一特性使得竹黄侧在湿度调节和开发湿度缓冲材料方面更具优势。

然而，竹材与水分的作用是双向的，本研究主要聚焦于结构与水分对于竹材吸湿性能的影响，而尚未明确竹材梯度结构赋予细胞壁水分状态的变化规律；此外，基于竹青侧富含维管束而具有力学支撑的优势和竹黄侧对水分响应灵敏的特点，立足特殊应用场景，开发新型竹制复合材料，仍需后续研究与实践。

展望未来，深入探究竹–水相互作用的深层机制，借助原位表征技术、分子动力学模拟等手段，为竹材实际应用提供更可靠的理论支撑；同时，利用竹青侧、竹黄侧的优势特点，探索功能化新材料设计思路与复合机制，以期拓展竹材应用领域，提升竹产品附加值。

参　考　文　献

[1] 程琳, 黄大勇, 陈仕昌, 等. 竹资源化综合利用进展研究 [J]. 安徽农学通报, 2023, 29(7): 94–99.
Cheng L, Huang D Y, Chen S C, et al. Research on the progress of comprehensive utilization of bamboo resources[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(7): 94–99.

[2] Li J, Ma E. Characterization of water in wood by time-domain nuclear magnetic resonance spectroscopy (TD-NMR): a review[J]. Forests, 2021, 12(7): 886.

[3] Cao M, Ren W, Zhu J, et al. Cell wall pore structures of bamboo evaluated using gas adsorption methods[J]. Holzforschung, 2022, 76(8): 754–764.

[4] Hou S, Wang J, Yin F, et al. Moisture sorption isotherms and hysteresis of cellulose, hemicelluloses and lignin isolated from birch wood and their effects on wood hygroscopicity[J]. Wood Science and Technology, 2022, 56(4): 1087−1102.

[5] Han S, Xu H, Chen F, et al. Construction relationship between a functionally graded structure of bamboo and its strength and toughness: underlying mechanisms[J]. Construction and Building Materials, 2023, 379: 131241.

[6] Zhang X, Guo F, Yu Z, et al. Why do bamboo parenchyma cells show higher nanofibrillation efficiency than fibers: an investigation on their hierarchical cell wall structure[J]. Biomacromolecules, 2022, 23(10): 4053−4062.

[7] Yang X, Pang X, Liu X, et al. Determining the pore structure and radial variability of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*)[J]. Wood Science and Technology, 2023, 57(2): 345−357.

[8] 江甜. 毛竹的梯度特性及相关性研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2025.
Jiang T. Research on gradient characteristics and correlation of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*)[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2025.

[9] Wei X, Wang G, Smith L M, et al. The hygroscopicity of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) with a gradient fiber structure[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4309−4316.

[10] Yuan J, Lei Y, Mi B, et al. Differences in the hygroscopic behavior of bamboo fiber and parenchyma[J]. Wood Science and Technology, 2024, 58(2): 575−587.

[11] Yuan J, Chen L, Chen Q, et al. Inherent characteristics of the hygroscopicity of fiber and parenchyma of bamboo[J]. Cellulose, 2022, 29(9): 4951−4959.

[12] Chen Q, Wang G, Ma X X, et al. The effect of graded fibrous structure of bamboo (*Phyllostachys edulis*) on its water vapor sorption isotherms[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 151: 112467.

[13] Yuan J, Chen Q, Fei B. Different characteristics in the hygroscopicity of the graded hierarchical bamboo structure[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176: 114333.

[14] Schniewind A P. Creep-rupture life of Douglas-fir under cyclic environmental conditions[J]. Wood Science and Technology, 1967, 1(4): 278−288.

[15] Schniewind A P, Lyon E D. Further experiment of creep-rupture life under cyclic environmental conditions[J]. Wood and Fiber Science, 1973, 4: 334−341.

[16] Panshin A J, de Zeeuw C. Textbook of wood technology[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[17] Ma E, Nakao T, Zhao G, et al. Dynamic sorption and hygroexpansion of wood subjected to cyclic relative humidity changes[J]. Wood and Fiber Science, 2010, 42(2): 229−236.

[18] Yang T, Ma E, Li J. Effects of cyclic patterns of relative humidity on moisture sorption of *Populus euramericana*[J]. BioResources, 2019, 14(3): 6397−6410.

[19] 尚莉莉, 孙正军, 江泽慧, 等. 毛竹维管束的截面形态及变异规律 [J]. 林业科学, 2012, 48(12): 16−21.
Shang L L, Sun Z J, Jiang Z H, et al. Variation and morphology of vascular bundle in moso bamboo[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(12): 16−21.

[20] Lykiema J, Sing K S W, Haber J, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984)[J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4): 603−619.

[21] 王凯清, 周子懿, 马尔妮. 基于糠醇改性的木材细胞壁孔隙变化对水分的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(9): 127−136.
Wang K Q, Zhou Z Y, Ma E N. Effects of cell wall pore changes on water of wood modified by furfuryl alcohol[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(9): 127−136.

[22] 曹梦丹. 竹材细胞壁的孔隙结构特征及其影响因子研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2023.
Cao M D. The porous structure and its influencing factors of bamboo cell wall [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2023.

[23] Yin J, Song K, Lu Y, et al. Comparison of changes in micropores and mesopores in the wood cell walls of sapwood and heartwood[J]. Wood Science and Technology, 2015, 49(5): 987−1001.

[24] 李欣, 钟土华, 陈红, 等. 毛竹不同构造中细胞化学成分及热稳定性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8): 156−162.
Li X, Zhong S H, Chen H, et al. Chemical composition and thermal stability of cells in different structures of *Phyllostachys edulis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8): 156−162.

[25] Popescu C M, Hill C A S. The water vapour adsorption-desorption behaviour of naturally aged *Tilia cordata* Mill. wood[J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(9): 1804−1813.

[26] Zhong X, Ma E. A novel approach for characterizing pore size distribution of wood cell wall using differential scanning calorimetry thermoporosimetry[J]. Thermochimica Acta, 2022, 718: 179380.

[27] Ran Y, Li J, Zhang S, et al. Super-stable modified wood for enhanced autonomous indoor humidity regulation[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 488: 150814.

[28] Ning L, Zhang L, Zhang S, et al. How does surfactant affect the hydrophobicity of wax-coated wood?[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 650: 129606.

[29] 刘纪建, 于建芳, 王喜明, 等. 木材内部水分扩散机理及多尺度模型研究概述 [J]. 材料导报, 2016, 30(9): 100−104.
Liu J J, Yu J F, Wang X M, et al. A review about internal moisture diffusion of wood: mechanisms and multiscale models[J]. Materials Reports, 2016, 30(9): 100−104.

[30] Zhan T, Sun F, Lyu C, et al. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: longitudinal and radial variations[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 119641.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 曹金珍）