

边材木质部液流-氧复合传感器设计及应用

周海洋^{1,2,3}, 马和龙^{1,2}, 孙卿峰^{1,2}, 赵燕东^{1,2,3}, 林剑辉^{1,2,3}, 郑一力^{1,2,3}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083;
3. 林业装备与自动化国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 树木根区土壤氧气含量是影响树木长势的重要环境因子。由于氧气空间分布复杂, 直接测量具有较大的局限性。该研究基于荧光猝灭原理和热扩散液流测量原理研制了树干木质部氧含量和液流速率复合参数检测传感器, 并对传感器进行了标定、温度校正和性能测试, 以水分转移为关键突破线索, 探究转移路径上氧含量与根区土壤氧含量关系。标定试验表明, 氧气含量低于30%时, 检测相对误差低于1.4%, 液流速率相对误差低于5%。户外对照试验表明, 复合传感器与商业光纤氧传感器、液流速率传感器检测结果相关系数分别为0.947和0.958。复合传感器集成度高、对树木伤害小、稳定性突出的优势为同步监测树干氧含量和液流速率提供了更好地解决方案。结合复合传感器监测数据和微气象参数, 应用树木宏观吸水模型和根系土壤氧扩散模型进行深入分析, 推导出不同深度根部氧环境含量的分布特征, 实现树木根部氧环境含量的有效监测。研究可为树木根部氧环境动态监测提供技术支持, 也为优化树木生长环境、提升树木水氧管理提供科学依据。

关键词: 土壤; 氧气; 传感器; 木质部水运输

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405071

中图分类号: S15; TP73

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-05-0079-08

周海洋, 马和龙, 孙卿峰, 等. 边材木质部液流-氧复合传感器设计及应用[J]. 农业工程学报, 2025, 41(5): 79-86. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405071 <http://www.tcsae.org>

ZHOU Haiyang, MA Helong, SUN Qingfeng, et al. Design and application of edge wood xylem liquid flow oxygen composite sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(5): 79-86. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405071 <http://www.tcsae.org>

0 引言

树干近地边材木质部氧含量和液流速率是重要的监测参数。树木根区土壤的氧气含量是影响植物生长发育的关键因素, 尤其在滞涝和城市硬化区域, 根区氧气缺乏对树木生长的负面影响更加显著。土壤氧气含量直接影响根系的呼吸作用、营养吸收以及植物的整体健康状况, 而根区氧胁迫常常导致植物生长缓慢、抗逆性差, 甚至死亡^[1-2]。因此, 实时、精确地监测土壤氧气含量对于理解植物根系环境、优化土壤管理以及提升植被健康至关重要。水分转移是联系根区和树干边材木质部的纽带。伴随水分转移, 其中的溶解氧和纳米气泡以水分为载体通过木质部导管运输到树干中。通过实时观测木质部氧含量及木质部液流, 可以间接分析植物根区氧含量。

树木根区土壤氧气含量的检测方法主要包括传感器点位检测法、土壤氧扩散模型法和荧光成像法等^[3]。传感器点位检测法中常选用氧化锆氧传感器^[4-5]、电化学氧传感器^[6-7]。氧化锆氧传感器检测过程加热出现高温条件会因影响土壤的氧环境导致测量结果的偏差。电化学氧传感器存在氧气消耗、电极腐蚀等问题。土壤氧扩散模

型法中, 菲克定律的扩散模型容易受到含量梯度、土壤孔隙度、含水量等因素影响^[8]; 生物扩散模型因参数难以测量, 在实际应用中效果不佳^[9-10]。荧光成像法设备成本高且无法获取较深土壤中的氧含量数据^[11]。

树干液流检测方法包括热平衡法^[12]、电阻法^[13]和热扩散法^[14]等。热平衡法通过计算输入输出热量实现液流速率的直接测量, 但设备体积较大。电阻法利用液流改变木质部电阻的特性推测液流速率, 但测量结果易受外界电磁干扰影响。热扩散法装置简单、成本低, 适合大范围 and 长期连续监测的, 是树干液流检测中应用最广泛的方法之一。

综上, 传统树木根区土壤氧气含量和树干液流速率检测方法存在检测精度、便携性等方面的不足, 并且使用单一传感器需放置多个传感器探头, 会对树干造成更大损伤。为更精确地实现树木根部氧环境动态监测, 该研究以水分转移为关键突破线索, 以地上部分氧气监测评估根区土壤氧环境, 基于荧光猝灭原理的氧含量检测方法和基于热扩散原理的液流检测方法相结合, 开发了一种树干木质部氧含量和液流速率复合参数检测传感器, 可以同时获取树干木质部氧含量和液流速率数据, 以期为树木根区氧环境监测提供一种高效的检测方法。

1 复合传感器检测原理和设计

1.1 树干氧含量检测原理

光纤氧传感器的原理是光致发光和荧光猝灭机理

收稿日期: 2024-05-12 修订日期: 2024-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901238)

作者简介: 周海洋, 博士, 讲师, 研究方向为植物生理信息检测。

Email: zhouhy@bjfu.edu.cn

(如图1所示)。将特定的荧光物质制成氧敏感膜,通过特定波段的激发光激发氧敏感膜上的荧光物质分子。激发后的荧光物质分子因不稳定而产生荧光,而氧气分子能够与荧光物质分子发生荧光猝灭反应抑制荧光的产生,即产生的荧光与环境中的氧气含量相关^[15]。氧气含量对产生荧光的影响主要表现在荧光光强和荧光寿命方面,二者与氧气含量的关系符合 Stern-Volmer 方程^[16]:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + K_{ST}[Q] \quad (1)$$

式中 I 为氧气含量为 $[Q]$ 时的荧光强度; I_0 为氧气含量为初始时的荧光强度; τ 为氧气含量为 $[Q]$ 时的荧光寿命, s; τ_0 为氧气含量为初始时的荧光寿命, s; K_{ST} 为 Stern-Volmer 常数; $[Q]$ 为氧气含量 (体积分数, 下同), %。

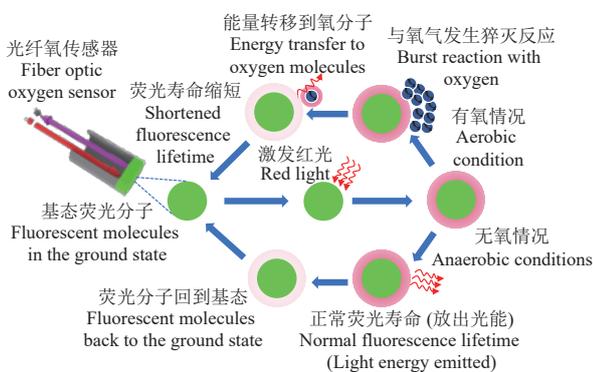


图1 荧光猝灭原理

Fig.1 Fluorescence burst principle

环境中的氧气含量发生变化时,氧气分子的猝灭作用使得荧光强度以及荧光寿命发生改变,基于此可通过荧光强度或荧光寿命的改变来检测氧气含量。但荧光强度在传输过程中易受外界因素影响,导致测量结果不准确^[17],而荧光寿命不受外界因素影响,具有很好的抗干扰能力^[18]。因此,通过荧光寿命检测氧气含量更准确。

直接测量荧光寿命较为困难,但当激发光频率固定时,荧光寿命与荧光滞后于激发光相移的正切成正比:

$$\tan \theta = \omega \tau \quad (2)$$

式中 θ 为荧光滞后于激发光的相移, rad; ω 为激发光的频率, Hz。可以通过检测荧光相对于激发光的滞后相移间接检测氧气含量^[19]。

1.2 树干液流检测原理

热扩散式液流速率传感器基于 Granier 原理^[20],即建立温差与液流速率之间的关系,以确定液流速率。将内置有热电偶的一对探针插入待测树干木质部,测量探针之间的温差。在液流速率为 0 或接近 0 时,2 个探针之间的温差达到最大值;而随着液流速率的增加,温差逐渐减小。通过研究温差与液流速率之间的关系,可以计算出液流速率^[21]。结合被测部位的边材横断面积,可以推导出单株整体的液流量。计算式如下:

$$u = 119 \times 10^{-6} K^{1.231} \quad (3)$$

式中 u 为树干平均液流速率, kg/h; K 为系数,由式 (4) 计算:

$$K = (T_M - T) / (T - T_0) \quad (4)$$

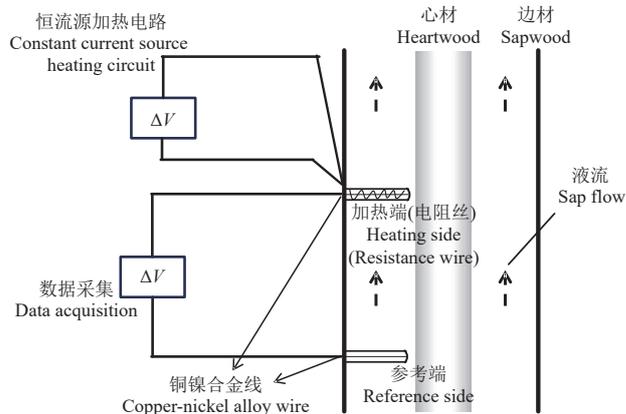
式中 T_0 为参比探针的温度, °C; T_M 为液流速率为 0 时加热探针的温度, °C; T 为液流速率不为 0 时加热探针的温度, °C。 K 也可以用式 (5) 来计算:

$$K = (\Delta T_M - \Delta T) / \Delta T \quad (5)$$

式中 ΔT_M 和 ΔT 分别是指液流速率为 0 和不为 0 时探针之间的温度差, °C。树干总的液流量通过式 (6) 计算:

$$F = uA_{\text{sapwood}} \quad (6)$$

式中 F 为总液流量, kg/h; A_{sapwood} 为加热探针高度处的边材横截面积, m²。热扩散探针结构如图 2 所示。上部为加热探针,下部为参比探针,通过上下探针的温差与液流速率之间的关系计算液流速率。



注: ΔV 为电压信号。
Note: ΔV is voltage signal.

图2 热扩散法原理

Fig.2 Principle of thermal diffusion

1.3 复合传感器探头设计

光纤氧传感器的敏感膜采用溶胶-凝胶工艺制备。使用 TEOS (四乙氧基硅烷) 和 Octyl-triEOS (辛基三乙氧基硅烷) 作为硅源,发生水解缩合反应之后在室温下形成致密的凝胶膜^[22]。该凝胶膜能够有效固定 $\text{Ru}(\text{dpp})_2^{+3}$ 和 AFC (氨基酸荧光分子) 分子,后者具有较强的荧光响应,能够在不同氧含量下产生可测量的信号。

光纤氧传感器顶端带有敏感膜的光纤探针,热扩散式液流传感器具有加热探针和参比探针,将 2 种传感器探针进行复合设计,同时测量树干木质部中的氧气含量和液流速率,实现多参数测量。复合传感器的氧气检测单元和液流检测单元复用一套两针式探头,其中一个为热扩散液流传感器加热探针,另一个将光纤氧探针与热扩散液流传感器的参比探针进行复合。光纤氧传感器易受温度影响,导致测量误差较大,复合传感器可利用参比探针得到的温度数据对氧含量数据进行校正。相比于分别使用 2 种传感器进行测量,复合传感器可以弥补了单一传感器的局限性,同时设计更加简化,减少了系统的复杂度和成本。

复合传感器探头结构如图 3 所示。复合传感器探针长和内径分别为 80、1.965 mm,上、下探针之间的距离为 3 cm。探针主体为 2 个空心圆柱体钢针头,钢针内部使用铬合金-铜镍合金 (E 型) 热电偶作为温度探头获取

温度数据。E 型热电偶增加电压输出的同时，在液流检测条件下的预期温度范围内具有近乎线性的响应曲线，测量结果更加准确。复合传感器的温度探头使用直径 0.127 mm 的铬合金和铜镍合金热电偶线，通过焊接形成热电偶接头，并与探针内壁进行绝缘。上部加热探针在不锈钢针头外层紧密缠绕一圈加热电阻丝，电阻丝外部装有铝管。探针顶端用焊料密封，以防止水进入探针影响测量数据。下部参比探针无加热电阻丝，在空心圆柱体钢针内部安装光纤，探针顶端涂有一层氧敏感膜。

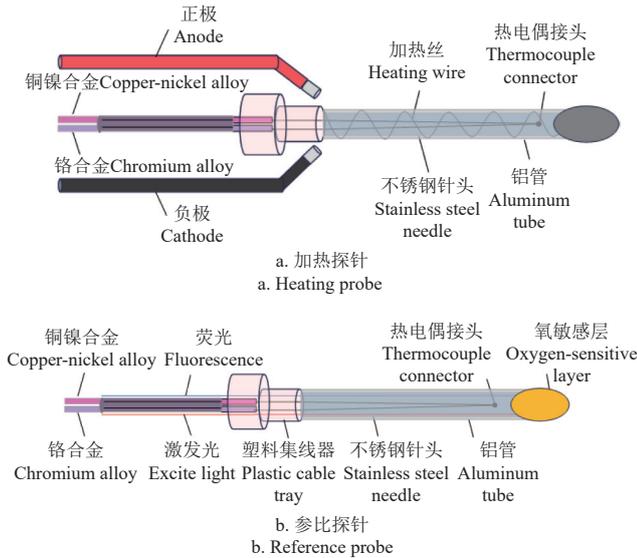


图 3 复合传感器探头结构示意图

Fig.3 Schematic of composite sensor probe structure

为了减少外界（重金属离子、硝基化合物）因素对氧气含量测量的干扰，在复合传感器的光路返回端加入窄带通滤光片（760~790 nm）。激发红光经光纤传导至光纤末端的氧敏感层。在氧敏感层处，荧光物质基态分子吸收激发光达到激发态后失活返回基态，并释放能量产生荧光。在一定氧气环境下，荧光物质的激发态分子与氧气分子之间发生荧光猝灭，导致荧光强度降低、荧光寿命缩短。产生的荧光沿光纤传回，进行光电转换，获取氧含量数据。

2 复合传感器标定与测试

2.1 标定试验方法

2.1.1 氧气检测单元标定试验

复合传感器氧气检测单元的标定试验采用吹气法，选用标定气源（标准气，北京启飞科技，±0.01%）中的氧气含量（氧气与氮气混合体积分数）分别为 5%、15%、21% 和 50%。试验过程中，通过压力调节器控制气瓶出口压力，经由硅胶管和流量调节阀连接至气体质量流量计（MF5700，广州迪川仪器仪表，±2.5%）显示出气体流量，确保气体流量稳定且可控。最终，标定气体通过气量调节阀导入带有出气口的气体采样袋，待传感器输出稳定时记录数据。传感器标定气路连接如图 4 所示。

在标定时，每次更换标定气源后需吹气 5 min 以确保采样袋内气体含量稳定，记录传感器荧光相较于激发

光的滞后相移数据进行拟合分析。根据式（2），可通过检测荧光相对于激发光的滞后相移来间接反映氧气含量。

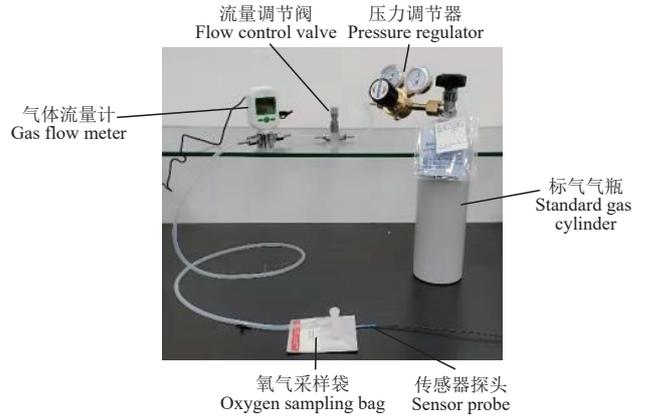


图 4 传感器测试时的气路连接图

Fig.4 Diagram of air circuit connection during sensor test

为提高测量的精度，进一步分析了温度对检测结果的影响。根据前人研究成果，温度每升高 20 °C，荧光寿命减少约 0.1 ms，从而对相移数据产生偏差^[23]。通过建立荧光寿命与温度的拟合曲线，对测量结果进行温度补偿，以降低温度变化对测量结果的干扰。经温度补偿后，将相移数据转换为氧气含量数据，再次使用吹气法进行误差分析。分别向气体采样袋中吹入氧气含量为 5%、15%、21%、30%、40% 和 50% 的混合气体，使用复合传感器连续 10 次采集氧气数据。

2.1.2 液流检测单元测试试验

采用树干液流模拟系统，对复合传感器液流检测单元进行测试。模拟系统的结构如图 5 所示：在一根长度为 1 m、直径为 10 cm 的透明管内，均匀填充 800 kg/m³ 的细木屑，以模拟树干内部的液流特性。透明管的一端连接一根带有刻度的直立透明导管（导管长度为 50 cm），另一端连接集液瓶，用于收集通过模拟树干部分流出的液体。

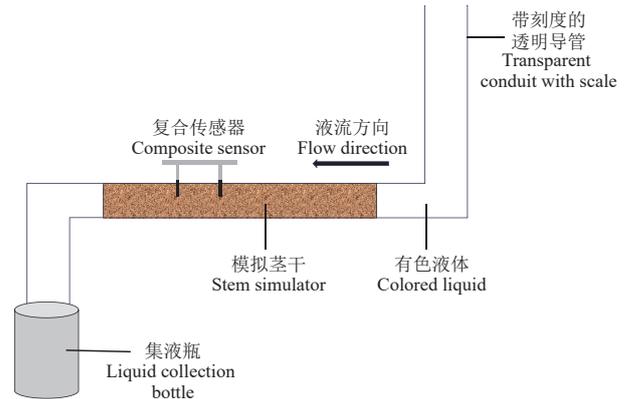


图 5 树干液流检测模拟系统

Fig.5 Sap flow detection simulation system

测试试验过程中，保持模拟树干部分水平放置，并将复合传感器探头插入细木屑内部。垂直放置的刻度导管用于注入有色液体，记录液体通过模拟树干部分的流动情况。试验开始时，缓慢加压注入有色液体，直至液体流经模拟树干并进入集液瓶。记录透明导管中液体液位随时间的变化，液位变化和导管横截面积的乘积与时间的比值为标准液流速率值。

2.2 结果与分析

2.2.1 氧气含量标定结果

复合传感器标定氧气含量的试验结果表明(图6),在氧气含量范围0~50%内,滞后相移的变化量约为30°,随着氧气含量的增加,相移增量逐渐减小。

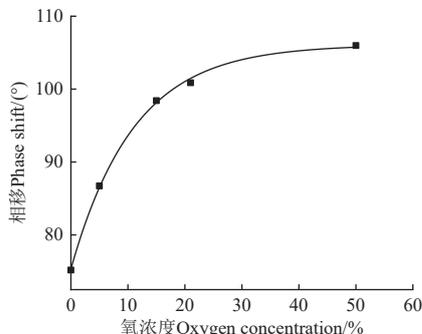


图6 氧气含量与荧光相移滞后相移拟合曲线

Fig.6 Fitted curve of oxygen content and delayed phase shift of fluorescence relative to excitation light

经过温度补偿后,氧气含量的检测结果如表1所示。复合传感器在氧气含量低于30%的环境下测量相对误差低于1.4%,在较高氧含量(30%~50%)时,测量相对误差相对增大。在低氧环境中,复合传感器检测精度较高,而在高氧环境中,检测精度明显下降。在实际应用中,待测空间氧含量通常低于空气中氧含量(21%),位于复合传感器检测精度较高的测量区间,因此推断测量相对误差不超过2%。

表1 复合传感器氧气含量检测结果

Table 1 Results of oxygen detected by composite sensor

标准氧气含量 Standard oxygen content/%	检测值 Detected value /%	相对误差 Relative error/%
5	5.006	0.12
15	15.057	0.38
21	21.281	1.34
30	31.537	5.13
40	43.544	8.86
50	56.315	12.63

2.2.2 液流速率标定结果

将计算得到的液流速率与复合传感器测量的液流速率进行对比分析,如表2所示,液流检测时间均为600 s。复合传感器测量值与标准参考值之间的相对误差均低于5%。

表2 树干液流检测模拟系统测量结果

Table 2 Measured results of sap flow detection simulation system

液位 Liquid level/mm		计算值 Calculated value/ (g·h ⁻¹)	传感器 测量值 Sensor measured value/(g·h ⁻¹)	相对误差 Relative error/ %
起始位置 Starting position	到达位置 Final position			
20	101	3 814.9	3 908.5	2.45
40	95	2 579.8	2 496.3	3.23
60	105	2 119.5	2 065.0	2.57
80	149	3 249.9	3 312.7	1.93
100	160	2 826.0	2 790.5	1.25

3 边材木质部水-氧监测户外试验

3.1 户外试验

3.1.1 研究区域和样地概况

研究区在北京市,位于华北平原北部,三面环山。

夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春秋较短,呈现出典型的北温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温13.1℃,年平均降水量约为580 mm,主要集中在8—9月^[24]。采样点位于北京市海淀区的北京林业大学(40°01'N, 116°20'E)。

试验地植株品种为“构树”,桑科落叶乔木,喜光,适应性强^[25]。树高280~300 cm,树干直径23~25 cm。试验地土壤为黄壤土,pH值为8,有机质质量为12.5 g/kg,土壤体积质量为1.27~1.35 g/cm³,田间体积持水率为33.70%,凋萎系数为9.00%,灌溉方式为浇灌,灌水均匀。于2023年10月底在试验地内根据样地植株生长情况条件挑选2棵长势良好的构树进行试验。

3.1.2 试验仪器

使用设计的双探针氧含量和液流速率复合传感器,实时监测试验构树同一位置的树干木质部氧含量和液流速率。利用液流检测单元获取的温度数据对氧传感单元进行校正,提高检测的精确性。使用商业光纤氧传感器(OXR50-UHS,德国Pyro Science,±2%)和液流传感器(TDP-20,北京雨根)开展对照试验,验证复合传感器的户外检测精度。

在监测构树木质部氧含量和液流速率期间,统计同时期微气候环境数据:太阳总辐射(GSR, W/m²)、空气温度(Ta, °C)和空气相对湿度(RH, %)等。太阳总辐射值的监测选用光电式太阳总辐射传感器(PR-300AL-RA-N01,普锐森社,±1.0%)。环境空气温湿度监测选用温湿度传感器(PR-3005,普锐森社,±1.0%)。

利用原电池式氧传感器(KE-25,日本费加罗,±1%)监测试验构树根区附近的氧含量。原电池式氧传感器探头末端贴有防水透气膜,该膜是一种胶黏材料,0.1~1.0 μm的微孔,孔径小于水珠的10⁴倍,大于水蒸气的700倍,微孔通道在膜内结成网状立体结构,均匀密集的分布,使灰尘遇到阻隔,最小可以捕捉到0.1 μm的颗粒。它使水分等液体无法通过的同时,允许空气顺利通过,既可以有效保护敏感部件,避免液体侵蚀,又可以有效散热,防止产品内壁结雾,平衡内外空气间气压。氧分子穿过防水透气膜进入氧传感器,在内部发生还原反应,通过测量传感器的输出电压信号可换算出被测环境中的氧气含量。

3.1.3 试验方法

对构树木质部氧含量和液流速率的监测采用复合传感器和单一的光纤氧和液流传感器。监测时间为2023年10—12月,传感器以10 min为间隔自动记录液流速率和氧含量的平均值,并通过数据采集器采集和存储所有数据。

使用光电式太阳总辐射传感器,连续测量太阳光辐射。离地5 m,传感器无遮挡,以10 min的间隔记录太阳光辐射数据。使用温湿度传感器,连续测量试验构树近地面处空气温湿度,并避免阳光直射。以1 min的间隔记录温湿度数据,并通过数据记录仪在10 min的间隔内取平均值。

使用原电池式氧传感器连续监测构树根区土壤氧含量。如图7所示,选取内径为23 mm的PVC管,分别截成0.5、1.0、1.5和2.0 m长的4段。将氧传感器装入PVC管中,两端接口处使用密封圈密封,防止空气沿

PVC 管道中进入土壤，影响试验结果。传感器安装完成后，在距离树干 1 m 处，利用特制土铲分别挖出直径为 23 mm，深度为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 m 的 4 个孔。将装有氧传感器的 PVC 管插入土壤，用于测量根区附近不同深度梯度的氧气含量变化。每个氧气传感器以 1 min 的间隔记录根区土壤氧含量，并通过数据记录仪在 10 min 的间隔内取平均值。

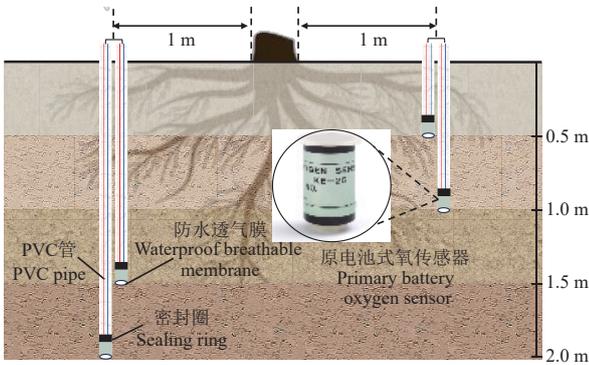


图 7 KE-25 原电池式氧传感器检测示意图

Fig.7 Schematic diagram of KE-25 original battery oxygen sensor detection

结合监测数据，根据宏观吸水模型和根系土壤氧扩散模型将植物根部假设为圆柱体。利用根系吸水模型可得到圆柱体根系吸水速率沿土壤垂向梯度分布函数 $S(z)$ 。同时，利用近地面氧含量-液流速率复合传感器得到的木质部液流速率为 S_i , g/h; 氧含量为 C_i , %。可得出在土壤深度 z 处，根系吸水速率 $S(z)$ 与植物根部氧含量 $C_r(z)$ 的关系^[26] 为

$$C_r(z) = \frac{C_i S(z)}{S_i} \quad (7)$$

由土壤-根系氧扩散模型^[27] 可推出土壤气相氧含量 $C(z)$:

$$C(z) = \frac{C_r(z) \ln\left(\frac{R}{a}\right)}{2\pi D_1 \alpha} + \frac{C_w(z)}{\alpha} \quad (8)$$

式中 α 为本生吸收系数，相当于常压 (101.3 kPa) 下单位体积水的气体溶解度，本研究取值 0.333; R 为根部周围液相边界层的半径加上根部半径, cm; D_1 为土壤液相中氧的扩散系数; C_w 为土壤深度为 z 时根部表面液相中的氧含量, %。

3.2 结果与分析

3.2.1 对照试验数据分析

复合传感器对照 OXR50-UHS 光纤氧传感器和 TDP-20 液流传感器试验数据如图 8a 和图 8b 所示。对照试验结果表明，复合传感器在氧含量和液流速率测量中表现出较高的一致性和相关性。在氧含量测量方面，复合传感器与光纤氧传感器的均差为 0.161，标准差为 0.765，相关系数为 0.947，表明复合传感器能够较好地反映氧含量变化趋势。在液流速率测量方面，复合传感器与液流速率传感器的均差为 -94.50，标准差为 152，相关系数为 0.958，复合传感器能够可靠地反映液流动态变化。在木质部液流和氧含量数据快速变化的过程中，由于复合

传感器和对照组传感器位置存在差异，会引入一定的测量误差。复合传感器在长时间运行中表现出极低的漂移特性，能够在不同条件下保持稳定的测量性能，确保数据的可靠性和一致性。总体来看，复合传感器集成度高、对树木伤害小、稳定性突出，在氧含量和液流速率的测量中具备较高的应用潜力。

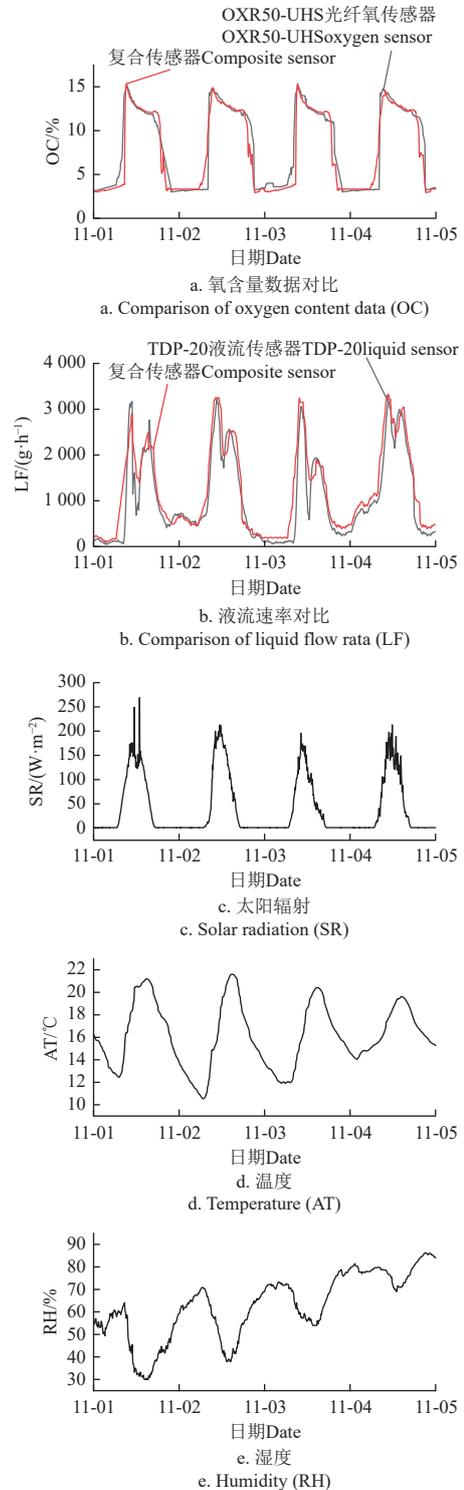


图 8 2023 年 11 月 1—5 日木质部氧含量、液流速率、太阳辐射与空气温湿度动态

Fig.8 Dynamics of xylem oxygen concentration, liquid flow rate, solar radiation, and air temperature and humidity from November 1st to 5 th, 2023

3.2.2 监测数据规律分析

2023年11月1日0:00-2023年11月5日0:00, 最高温度 21.6 °C, 最低温度 10.5 °C, 相对湿度在 29.9%~86.2% 之间变化, 与温度变化趋势相反。夜间太阳总辐射为 0; 每日 07:00 左右开始上升, 在 11:30 左右达到最大值, 11:30—17:00 间呈下降趋势直至为 0。监测期间太阳辐射最大值 269 W/m²。木质部液流量与太阳总辐射变化趋势相似, 但有 2 h 滞后, 且液流量呈现双峰变化。在白天, 09:00 左右液流量从 0 开始迅速增加, 10:30 左右达到第 1 个峰值, 之后开始下降, 至 13:00 又逐渐增加, 14:30 左右到达第 2 个峰值。14:30—17:30 期间迅速减小至 0。在夜间, 液流速率基本为 0。树干氧含量在液流速率升高前缓慢增加, 到清晨 09:00 左右变化范围 3.0%~5.0%。在夜间, 树干氧含量基本稳定在 4% 左右, 且每天波动不大。清晨受太阳辐射影响, 液流开始后, 树干氧含量也迅速上升, 在 09:30 左右到达峰值, 监测期间木质部最大氧含量为 15.9%。到达峰值后, 氧含量先缓慢下降至 12% 左右。在 17:00—21:00 左右下降至每日最低点。变化曲线如图 8a 所示

3.2.3 根区土壤氧含量变化

2023年11月1日0:00—2023年11月5日0:00, 距离构树树干水平 1 m, 垂直深度为 0.5 m 处的土壤氧含量与空气中氧含量接近, 在 19.21%~19.46% 之间变化; 垂直深度为 1 m 处, 氧含量在 17.58%~18.12% 之间变化; 深度为 1.5 m 处, 氧含量在 16.28%~16.70% 之间变化; 深度为 2 m 处, 氧含量下降明显, 变化范围为 13.21%~13.65%。

由式 (7)、(8) 计算得出 0.5 m 根部土壤气相氧含量为 18.26%, 1.0 m 根部土壤气相氧含量为 16.26%, 1.5 m 根部土壤气相氧含量为 13.58%, 2.0 m 根部土壤气相氧含量为 11.95%。对比原电池式氧传感器测得的土壤气相平均氧含量, 0.5 m 深处土壤气相平均氧含量为 19.38%, 1 m 深处土壤气相平均氧含量为 17.92%, 1.5 m 处土壤气相平均氧含量为 15.01%、2.0 m 深处土壤气相平均氧含量为 13.41%。相对偏差低于 10%。

3.2.4 试验结果分析

如图 8d、图 8e 所示, 与温度变化相比, 空气相对湿度波动较小。此外, 图 8c 中太阳辐射值也呈现出明显的昼夜变化, 白天太阳辐射值上升并在 11:30 左右达到峰值, 夜间太阳值为 0。太阳辐射是植物蒸腾作用的主导因子, 蒸腾量随着清晨太阳辐射强度增大而增加。植物通过气孔开放以进行光合作用, 液流速率在蒸腾作用的影响下显著变化。

监测数据显示, 树干木质部氧含量在液流速率增大后迅速上升。试验期间, 木质部液流速率与太阳辐射变化趋势存在的滞后表明太阳辐射对树干液流速率的影响存在一定的延迟效应, 与植物体内生理过程的调节机制有关。液流速率 2 个峰值的出现表明树木在中午气温较高时, 会调节自身水分, 降低液流速率。随着太阳辐射下降, 树木气孔重新开放, 液流速率迅速回升, 形成双

峰特征。木质部氧含量在此期间也呈现出与液流速率类似的下降和回升趋势。午后太阳辐射明显减弱, 液流速率迅速下降, 木质部氧含量同步降至最低值。

对监测期间温度、太阳辐射、液流速率和树干氧含量数据的相关性分析如表 3 所示。结果表明木质部氧含量与液流速率相关系数为 0.82, 说明液流中的溶解氧对木质部氧的供给起主要作用。

表 3 微气象因子、树干液流-氧含量相关性

Table 3 Micro - meteorological factors and correlation between stem sap flow and oxygen content

指标 Index	温度 Temperature	太阳辐射 Solar radiation	液流速率 Sap flow velocity	树干氧含量 Tree trunk oxygen content
温度 Temperature	1	0.47*	0.62*	0.73*
太阳辐射 Solar radiation	0.47*	1	0.79*	0.70*
液流速率 Sap flow velocity	0.62*	0.79*	1	0.82*
树干氧含量 Tree trunk oxygen content	0.73*	0.70*	0.82*	1

注 (Note): * $P < 0.05$ 。

在监测构树木质部氧含量-液流速率变化期间, 树干水平距离 1 m 处土壤氧含量变化较为稳定。随着垂直深度的增加, 土壤变得更加密实, 通气性更差, 导致氧气含量下降。同时, 较深土层中的根系可能消耗部分氧气, 进一步降低了其含量。

在同一深度范围内, 根区土壤中的氧气含量存在一定的波动。这种波动受到气象条件、植物根系呼吸以及土壤微生物活动的共同影响。气象条件 (如温度、湿度和风速) 会影响土壤中氧气扩散速率和根系的呼吸强度, 从而引起氧气含量的变化。此外, 土壤中微生物活动也会消耗氧气, 对土壤氧气含量造成影响。

4 结论

本研究基于荧光猝灭原理的光纤氧传感器和基于热扩散法的液流传感器相结合, 设计了树干氧含量-液流速率复合传感器, 并利用复合传感器监测树木边材木质部氧含量和液流速率变化。通过检测木质部氧含量和液流速率, 分析树木根区土壤氧含量。本研究得出以下结论:

1) 通过模拟试验对复合传感器的氧气检测单元和液流检测单元进行标定, 其中氧气检测单元在氧气含量为 0~21% 的环境中时, 检测误差低于 2%, 表明复合传感器系统具有较高的精度和稳定性, 可以用于构树木质部氧含量和液流速率的实时监测中。

2) 户外对照试验中, 复合传感器与光纤氧传感器、液流速率传感器检测结果的相关系数分别为 0.947、0.958。表明复合传感器相较商业成熟传感器具有良好一致性。在氧含量和液流速率的测量中具备较高的应用潜力。

3) 木质部氧含量在日间呈现双峰变化, 从清晨上升至 15.9%, 午间短暂下降后迅速上升, 与液流速率变化趋势基本一致。木质部液流呈单峰变化趋势, 氧含量也有相同的昼夜变化趋势, 说明液流对木质部氧的供给起

主要作用, 证实了液流对边材供氧的重要性。

4) 利用实测数据推导出土壤深度 0.5、1.0、1.5 和 2.0 m 根部土壤气相氧含量分别为 18.26%、16.26%、13.58% 和 11.95%。为初步判断根区土壤气相氧含量提供了一种分析方法。

本研究初步实现了基于近地面边材木质部氧气测量评估根区氧环境的预想, 并且丰富了树木根区土壤氧环境的检测方法。

[参 考 文 献]

- [1] 王振华, 韩美琪, 宋利兵, 等. 加气对西北旱区膜下滴灌棉花生长与水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(14): 108-116.
WANG Zhenhua, HAN Meiqi, SONG Libin, et al. Effects of aeration on the growth and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation in the dry areas of Northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(14): 108-116. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 陈慧. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 163-172.
ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Oxygation improving soil aeration around tomato root zone in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(21): 163-172. (in Chinese with English abstract)
- [3] 周海洋, 孙卿峰, 夏鹏凯, 等. 根区土壤氧气检测技术与方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(3): 1-13.
ZHOU Haiyang, SUN Qingfeng, XIA Pengkai, et al. Advances in oxygen detection technologies and methods for the root zone soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(3): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [4] 毛敏霞. 基于环形多光程吸收池的氧气传感器研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2024.
MAO Minxia. Research On Oxygen Sensor Based On Toroidal Multi-Pass Absorption Cell[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [5] 叶龙伟, 何小刚. 一种氧化锆氧传感器测氧系统的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(3): 15-18, 22.
YE Longwei, HE Xiaogang. Design of oxygen-measuring system for zirconia oxygen sensor[J]. *Instrumentation Technology and Sensors*, 2019(3): 15-18, 22. (in Chinese with English abstract)
- [6] 余光丰, 李琳, 胡月新. 浅论氧电极法对水中低含量溶解氧的测定[J]. *信息记录材料*, 2022, 23(3): 237-240.
- [7] 乔权威, 郜建全, 宋希文, 等. 铈钛共掺杂氧化锆致密扩散层极限电流型氧传感器[J]. *当代化工研究*, 2024, 24(2): 24-26.
QIAO Quanwei, GAO Jianquan, SONG Xiwen, et al. Cerium-titanium co-doped zirconia dense diffusion layer limit current type oxygen sensor[J]. *Modern Chemical Research*, 2024, 24(2): 24-26. (in Chinese with English abstract)
- [8] NEIRA J, ORTIZ M, MORALES L, et al. Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2015, 75(Suppl 1): 35-44.
- [9] FRICK T, WOERMANN D, GROSSE W. How tree roots gather oxygen from soil for energy supply by respiration[J]. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 2015, 52(11): 824-827.
- [10] CRAWFORD JW, DEACON L, GRINEY D. Microbial diversity affects self-organization of the soil-microbe system with consequences for function[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012, 9(71): 1302-1310.
- [11] 张家齐. 基于双示踪激光诱导荧光的流场密度测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
ZHANG Jiaqi. Research on Flow Field Density Measurement Method of Two-tracer Planar Laser Induced Fluorescence[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [12] 白岩, 朱高峰, 张琨, 等. 敦煌葡萄液流特征及耗水分析[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 175-181.
BAI Yan, ZHU Gaofeng, ZHANG Kun, et al. Analysis of variation of sap flow velocity and water consumption of grapevine in the Nanhu oasis, Dunhuang, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 175-181. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴小亚. 木材含水率在线检测系统的优化设计[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
WU Xiaoya. Optimum Design of Online Inspection System of Wood Moisture Content[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [14] 宋博华, 高歌, 高珊, 等. 基于热技术的活立木液流测量方法综述[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(2): 456-464.
SONG Bohua, GAO Ge, GAO Shan, et al. Overview of the methods for sap flow measurement of standing tree based on thermal technology[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(2): 456-464. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李斌. 基于荧光猝灭的海水溶解氧传感器研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
LI Bing. Research on Sensor for Sensing Dissolved Oxygen in Seawater Based on Fluorescence Quenching[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [16] JORGE P, CALDAS P, ROSA C, et al. Optical fiber probes for fluorescence based oxygen sensing[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2004, 103(1/2): 290-299.
- [17] ZHANG B, WU PJ, ZHENG H, et al. Experimental research on fiber optic oxygen sensor based on fluorescence quenching principle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(4): 704-709.
- [18] 赵智. 基于频域荧光寿命的溶解氧检测技术的研究与应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
ZHAO Zhi. Research and Application of Dissolved Oxygen Detection Technology Based on Frequency Domain Fluorescence Lifetime[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [19] 邓辉, 柏云, 肖吉群, 等. 基于荧光猝灭的新型光纤氧传感方法及其测量精度评价[J]. *光学技术*, 2015, 41(2): 124-127.
DENG Hui, BAI Yun, XIAO Jiqun, et al. Precision estimate of fluorescence quenching based fiber optical oxygen sensor[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(2): 124-127. (in Chinese with English abstract)
- [20] 赵小宁, 田晓楠, 李新, 等. Granier 原始公式计算树干液流速率的适用性分析——以毛白杨为例[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(3): 404-417.
ZHAO Xiaoning, TIAN Xiaonan, LI Xin, et al. Analysis of applicability of Granier's original equation for calculating the stem sap flux density——Take populus tomentosa as an example[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(3): 404-417. (in Chinese with English abstract)
- [21] 马玉洁. 热扩散式探针法在散孔材树种树干液流测定中的适用性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
MA Yujie. Research on Applicability of Thermal Dissipation Probe Method in Sap Flow Measurement of Diffuse-porous Wood[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [22] 孟庆阳, 张红霞, 赵永昆, 等. 基于荧光猝灭原理的比率

- 式光纤溶解氧传感器研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(9): 2445-2449.
- MENG Qingyang, ZHANG Hongxia, ZHAO Yongkun, et al. Study on ratiometric optical fiber dissolved oxygen sensor based on fluorescence quenching principle[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(9): 2445-2449. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李顶顶. 基于光纤位移传感器的位移测量精度研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- LI Dingding. Research on Displacement Measurement Accuracy Based on Optical Fiber Displacement Sensor[D]. Shanghai: Donghua University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张潇, 武娟娟, 贾国栋, 等. 降水控制对侧柏液流变化特征及其水分来源的影响[J]. 植物生态学报, 2023, 47(11): 1585-1599.
- ZHANG Xiao, WU Juanjuan, JIA Guodong, et al. Effects of precipitation variations on characteristics of sap flow and water source of *Platycladus orientalis*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(11): 1585-1599. (in Chinese with English abstract)
- [25] 赵庆霞, 夏玉芳. 刈割模式对喀斯特地区构树生物量及粗蛋白和粗脂肪含量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(6): 62-68.
- ZHAO Qingxia, XIA Yufang. Effects of mowing modes on biomass, crude protein and crude fat contents of *Broussonetia papyrifera* in karst area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(6): 62-68. (in Chinese with English abstract)
- [26] FEDDES R, BRESLER E, NEUMAN S. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems[J]. *Water Resources Research*, 1974, 10: 1199-1206.
- [27] DE W, VAN N. Mathematical models on diffusion of oxygen to and within plant roots, with special emphasis on effects of soil-root contact[J]. *Plant and Soil*, 1984, 77(2): 233-241.

Design and application of edge wood xylem liquid flow oxygen composite sensor

ZHOU Haiyang^{1,2,3}, MA Helong^{1,2}, SUN Qingfeng^{1,2}, ZHAO Yandong^{1,2,3}, LIN Jianhui^{1,2,3}, ZHENG Yili^{1,2,3}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China)

Abstract: The oxygen content in the soil of tree root zones is a crucial environmental factor influencing the growth of trees. The study aimed to develop a novel sensor system for monitoring oxygen content in tree xylem and sap flow velocity, with the goal of investigating the relationship between oxygen levels in the root zone soil and those in the water transfer pathway. This research sought to address the limitations of direct soil oxygen measurements, which are often hindered by the complex spatial distribution of oxygen. By leveraging the dynamics of water movement within trees, the study provided a technical foundation for optimizing tree growth environments and enhancing water-oxygen management. A composite sensor was developed based on fluorescence quenching and thermal diffusion sap flow measurement principles to simultaneously detect oxygen content in tree xylem and sap flow velocity. Calibration experiments were conducted to ensure accuracy, with temperature correction applied to minimize environmental interference. The sensor's performance was evaluated through outdoor comparative tests against commercial fiber-optic oxygen sensors and sap flow sensors. Data from the sensor were integrated with micrometeorological parameters and analyzed using a tree water uptake model and a root-soil oxygen diffusion model to derive oxygen distribution patterns at different root depths. The calibration results demonstrated the sensor's high precision, with relative errors of less than 1.4% for oxygen content measurements below 30% and less than 5% for sap flow velocity. Outdoor comparative tests further validated the sensor's performance, showing strong correlations with commercial sensors. The correlation coefficients were 0.947 for oxygen content and 0.958 for sap flow velocity, confirming the sensor's reliability and accuracy. The integration of sensor data with micrometeorological parameters, such as temperature and humidity, enabled the derivation of oxygen distribution patterns at various root depths. The analysis revealed that oxygen content decreased with increasing root depth, reflecting the challenges of oxygen diffusion in denser soil layers. For example, oxygen levels in the upper root zone were significantly higher than those in deeper layers, highlighting the impact of soil structure on oxygen availability. The sensor system also captured temporal variations in oxygen content, showing fluctuations corresponding to changes in soil moisture and temperature. These findings provided detailed insights into the dynamic interplay between soil oxygen availability and tree physiological processes. By linking oxygen levels in the root zone to those in the water transfer pathway, the study demonstrated the sensor's ability to monitor root zone oxygen environments effectively. This capability is crucial for understanding how oxygen availability influences tree growth and health, particularly in environments where soil oxygen is a limiting factor. The results also underscored the potential of the sensor for large-scale applications, such as forest ecosystem monitoring and precision agriculture, where real-time data on water and oxygen dynamics can inform management decisions. Overall, the study highlighted the sensor's potential as a reliable tool for advancing research on tree physiology and optimizing growth environments. The study successfully developed and validated a composite sensor system for monitoring oxygen content and sap flow velocity in tree xylem, providing a reliable tool to investigate root zone oxygen dynamics. By linking oxygen levels in the root zone to those in the water transfer pathway, the research offers a scientific basis for optimizing tree growth environments and improving water-oxygen management. The findings highlight the sensor's potential for dynamic monitoring of root zone oxygen, enhancing tree health and productivity. This advancement addresses the limitations of traditional soil oxygen measurement methods and opens new research avenues into water-oxygen interactions in tree physiology. Future applications include forest ecosystem monitoring, precision agriculture, and urban tree management, supporting sustainable environmental practices.

Keywords: soils; oxygen; sensors; wood based water transportation