

مروری بر نقش RNAهای غیر کدکننده اگزوزومها در سرطان ریه

A Review of the Role of Exosomal Non-Coding RNAs in Lung Cancer

پرهام مقتدر منصوری^۱، نادر فرساد اختر^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زیست شناسی سلولی و مولکولی، گروه زیست شناسی گیاهی، سلولی و مولکولی،

دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

۲- دانشیار، گروه زیست شناسی گیاهی، سلولی و مولکولی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

Moghtader Mansouri P¹, Farsad Akhtar N^{*2}

1- MSC student, Department of Plant, Cell and Molecular Biology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Department of Plant, Cell and Molecular Biology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran

* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Naderfarsad@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹)

چکیده

سرطان ریه یکی از شایع‌ترین سرطان‌ها در جهان است و با چالش‌های عمده‌ای در تشخیص زودهنگام، درمان مؤثر و پیش‌آگهی مناسب روبرو است. اگزوزومها، وزیکول‌های خارج‌سلولی ترشح‌شده توسط سلول‌ها، نقش کلیدی در انتقال اطلاعات بین سلولی ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، اگزوزومها و RNAهای غیرکدکننده (ncRNA) مشتق از آن‌ها، به‌عنوان عوامل مؤثر در پیشرفت سرطان و نشانگرهای زیستی نوین توجه زیادی جلب کرده‌اند. این مقاله مروری بر نقش miRNAها، lncRNAها و circRNAهای اگزوزومی در فرآیندهای سرطان‌زایی سرطان ریه، از جمله رگ‌زایی، گذار اپیتلیال-مزانشیمی (EMT)، مقاومت دارویی، تعدیل سیستم ایمنی و متاستاز می‌پردازد. همچنین، پتانسیل بالینی ncRNAهای اگزوزومی در بهبود مدیریت سرطان ریه و افق‌های نوین در پزشکی شخصی‌سازی شده بررسی می‌شود. نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که پروفایل بیان این ncRNAها در اگزوزومهای خون، پلاسما، بافت یا مایعات دیگر بیماران می‌تواند به‌عنوان نشانگرهای زیستی حساس و اختصاصی برای تشخیص زودهنگام، پیش‌بینی پاسخ به درمان (مانند شیمی‌درمانی یا ایمونوتراپی) و تعیین پیش‌آگهی بیماری استفاده شود. برای مثال، miRNAهایی مانند miR-21 و miR-96 در مقاومت دارویی نقش دارند، در حالی که lncRNAهایی مانند HOTAIR و circRNAهایی مانند circVMP1 و متاستاز را تقویت می‌کنند. ریزمحیط تومور (TME) نیز تحت تأثیر اگزوزومها قرار می‌گیرد، جایی که ncRNAها تعاملات بین سلول‌های توموری، ایمنی و استرومایی را تنظیم می‌کنند. با این حال، چالش‌هایی مانند خلوص جداسازی اگزوزومها، ناهمگونی نمونه‌ها، محدودیت‌های روش‌شناختی (مانند اولتراسانتریفیوژ) و کاربرد بالینی محدود، نیازمند تحقیقات بیشتر است. در نهایت، ncRNAهای اگزوزومی می‌توانند به‌عنوان اهداف درمانی نوین، مانند حامل‌های دارو یا نشانگرهای پیش‌آگهی، در درمان شخصی‌سازی شده سرطان ریه نقش ایفا کنند.

واژه‌های کلیدی

سرطان ریه

اگزوزوم

RNAهای غیر کدکننده

نشانگرهای زیستی

مقدمه

سرطان ریه یکی از شایع‌ترین سرطان‌ها در جهان است که با میزان بالای بروز و مرگ‌ومیر همراه می‌باشد. بر اساس ویژگی‌های بافت‌شناسی سلول‌های سرطانی، سرطان ریه به‌طور کلی به دو نوع اصلی تقسیم می‌شود: سرطان سلول کوچک^۱ (SCLC) و سرطان سلول غیر کوچک^۲ (NSCLC). نوع NSCLC شایع‌ترین زیرگونه سرطان ریه است و حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد از کل موارد را شامل می‌شود. NSCLC خود شامل چندین زیرگونه بافت‌شناسی اصلی است، از جمله آدنوکارسینوم ریه^۳ (LUAD)، کارسینوم سلول سنگفرشی^۴ ریه و سرطان سلول بزرگ ریه^۵. درمان مراحل اولیه سرطان ریه (مرحله I یا II) معمولاً شامل برداشت تومور از طریق جراحی همراه با درمان کمکی است. در مقابل، زمانی که بیماری به مراحل پیشرفته‌تر (مرحله III یا IV) می‌رسد، درمان به سمت شیمی‌درمانی یا پرتودرمانی سوق پیدا می‌کند. با این حال، تقریباً تمام داروهای شیمی‌درمانی سنتی با محدودیت‌های مشابهی از جمله هدف‌گیری غیر اختصاصی، فراهمی زیستی^۶ پایین، و بروز مقاومت دارویی مواجه هستند که اثربخشی داروها را کاهش می‌دهند (Y. Li, Yan, & He, 2023). در گذشته تومورها عمدتاً به‌صورت تجمعی ساده از سلول‌های سرطانی توصیف می‌شدند. با این حال در واقعیت، این تومورها مجموعه‌ای ناهمگن از سلول‌های توموری، ایمنی، استرومایی، مولکول‌های سیگنالینگ متنوع و ماتریکس خارج سلولی^۷ (ECM) هستند که به‌طور کلی ریزمحیط تومور^۸ (TME) نامیده می‌شوند. TME به محیط چندسلولی پیچیده و گسترده‌ای اشاره دارد که توسط سلول‌های توموری شکل می‌گیرد و بقا و رشد آن‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. در مراحل اولیه نئوپلازی، تعاملی پویا بین سلول‌های توموری و اجزای TME ایجاد می‌شود که منجر به نفوذ موضعی و متاستاز تومور می‌شود. برای مقابله با هیپوکسی که یکی از ویژگی‌های بارز TME در مقایسه با محیط طبیعی است،

تومورها با تسریع رگ‌زایی، تأمین اکسیژن و مواد مغذی و دفع مواد زائد متابولیک را تضمین می‌کنند. امروزه، الگوی تحقیقات و درمان سرطان از مدل تومور-محور^۹ به مدل TME-محور^{۱۰} تغییر یافته است (Anderson & Simon 2020). اگزوزوم‌ها، به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از وزیکول‌های خارج سلولی^{۱۱} (EVs) ساختاری با غشای دولایه لیپیدی و منشأ اندوزومی دارند (R. Xu et al. 2018). علاوه بر پروتئین‌ها و DNA، اگزوزوم‌ها عموماً حاوی لیپیدها، mRNAها، RNAهای غیرکدکننده^{۱۲} (ncRNA)، DNA و پروتئین‌ها هستند (Z. Sun, Yang, et al. 2018). اگرچه اگزوزوم‌ها ویژگی‌ها و ساختارهای مشترکی دارند، ترکیبات مولکولی اگزوزوم‌های ترشح‌شده توسط انواع مختلف سلول‌ها به‌طور چشمگیری متفاوت است. اگزوزوم‌ها به‌عنوان پیام‌رسان‌های قدرتمند ارتباط بین سلولی، نقش محوری در پیشرفت سرطان ایفا می‌کنند. اگزوزوم‌های آزادشده از سلول‌های توموری در انتقال مواد و تبادل اطلاعات درون‌بدنی مشارکت داشته و به‌عنوان معیاری برای ارزیابی رشد و پیشرفت سرطان عمل می‌کنند (Fan et al. 2018).

اگزوزوم‌ها

وزیکول‌های خارج سلولی^{۱۳} (EVs) ساختارهای غشایی کوچکی هستند که حاوی پروتئین‌ها، لیپیدها و مواد ژنتیکی می‌باشند و نخستین بار در سال ۱۹۸۳ در رتیکولوسیت‌های گوسفند شناسایی شدند. جانستون در سال ۱۹۸۷ آن‌ها را «اگزوزوم» نامید. در ابتدا ترشح EVs صرفاً مکانیزمی برای دفع ترکیبات غیرضروری سلول تصور می‌شد، اما بعدها مشخص شد که این وزیکول‌ها نقش مهمی در ارتباطات سلولی، تنظیم ایمنی و پیشرفت سرطان دارند. بر اساس بیوژنز و اندازه، EVs به دو دسته اگزوزوم‌ها و میکرووزیکول‌ها تقسیم می‌شوند (شکل ۱)؛ اگزوزوم‌ها (۳۰-۱۰۰ نانومتر) از مسیر اندوزومی و از ادغام اجسام چندوزیکولی^{۱۴} (MVBs) و میکرووزیکول‌ها (۱۰۰-۱۰۰۰ نانومتر) از جوانه‌زنی غشای پلاسمایی منشأ می‌گیرند (Y. Xie et al. 2019) (Kalluri)

¹ Small cell cancer

² Non-small cell cancer

³ Lung adenocarcinoma

⁴ Lung squamous carcinoma

⁵ Large-cell lung cancer

⁶ Bioavailability

⁷ Extracellular matrix

⁸ Tumor microenvironment

⁹ Tumor-centered model

¹⁰ TME-centered model

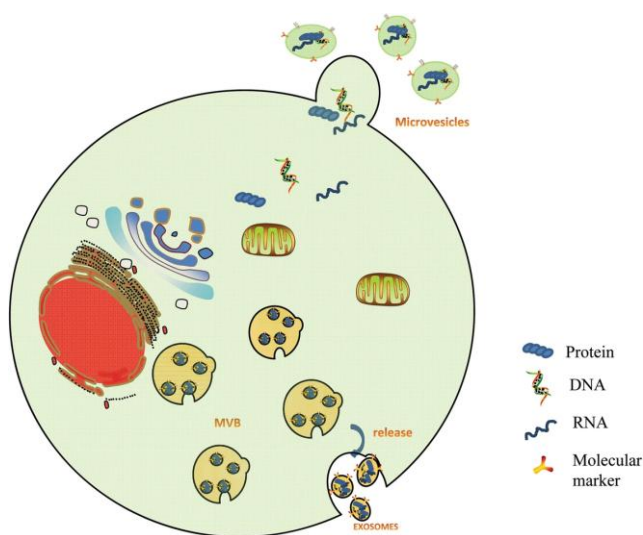
¹¹ Extracellular vesicles

¹² Non-coding RNA

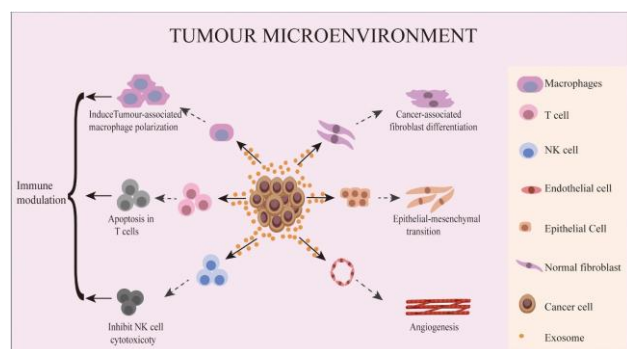
¹³ extracellular vesicles

¹⁴ Multivesiculer bodies

میزان نفوذ سلول‌های ایمنی وابسته به مرحله بیماری گزارش شده و نقش TME را در سرطان‌زایی و ارزش احتمالی آن به عنوان نشانگر پیش‌آگهی برجسته می‌سازد (Banat et al. 2015; Kargl et al. 2017).



شکل ۱- بیورنز اگزوزوم‌ها و میکرووزیکول‌ها. اجسام چندوزیکولی (MVBs) از اندوزوم‌های دیررس مشتق می‌شوند که خود از طریق اندوسیتوز از اندوزوم‌های اولیه توسعه یافته‌اند. اگزوزوم‌ها پس از ادغام MVBs با غشای سلولی آزاد می‌شوند. میکرووزیکول‌ها (با قطر ۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) از طریق جوانه‌زنی از غشای پلاسمایی ایجاد می‌شوند (Y. Xie et al. 2019).



شکل ۲- اگزوزوم‌ها در TME سرطان ریه ضروری هستند. اگزوزوم‌ها به عنوان تنظیم‌کننده کلیدی ارتباطات بین سلولی در TME، از طریق برهمکنش با سلول‌های گیرنده، نقش تنظیمی بیولوژیکی چندوجهی در رگ‌زایی سرطان ریه، EMT و اختلال در تنظیم ایمنی ایفا می‌کنند (K. Xu et al. 2021).

سلول‌های بدخیم ریه می‌توانند سلول‌های استرومایی نظیر ماکروفاژها و فیبروبلاست‌ها را بازبرنامه‌ریزی کرده و فنوتیپ‌های

اگزوزوم‌ها دارای غشای دولایه فسفولیپیدی همراه با پروتئین‌های غشایی بوده و حاوی پروتئین‌ها، mRNA، miRNAهای غیرکدکننده و لیپیدها هستند (Jeppesen et al. 2019). این ساختارها توسط اغلب سلول‌ها به‌ویژه سلول‌های توموری ترشح شده و در تعامل با ریزمحیط تومور به پیشرفت سرطان کمک می‌کنند (Kahlert & Kalluri 2013). اگزوزوم‌ها در اغلب مایعات زیستی از جمله خون، بزاق، ادرار، مایع مغزی‌نخاعی و شیر مادر یافت می‌شوند (Colombo, Raposo, & Théry 2014). آن‌ها همچنین RNAهای کوچک را در برابر تخریب محافظت کرده و به عنوان منبعی مناسب برای بیوپسی مایع مطرح هستند. از نظر بالینی، اگزوزوم‌ها در فاز I و II کارآزمایی‌های بالینی در سرطان ریه به کار رفته و نمایه‌ای ایمن نشان داده‌اند، اگرچه مطالعات بیشتری لازم است. علاوه بر این، ظرفیت بالایی به عنوان حامل داروهای شیمی‌درمانی و ترکیبات زیستی برای درمان سرطان ریه دارند (R. Chen et al. 2019). روش‌های جداسازی اگزوزوم شامل اولتراسانتریفیوژ، اولترافیلتراسیون، ایمونوافینیتی و کیت‌های تجاری مانند exoEasy Maxi kit (Qiagen) است. اگزوزوم‌های مشتق از سرطان ریه را می‌توان از سرم، پلاسما، مایع پلورال و لافاز برونکئوآلوئولار به دست آورد. مطالعات نشان داده‌اند که سلول‌های سرطانی ریه نسبت به سلول‌های طبیعی، اگزوزوم‌های بیشتری آزاد می‌کنند که آن‌ها را به نشانگرهای زیستی بالقوه برای تشخیص سرطان ریه تبدیل می‌کند (R. Wang, Xu, Tong, Zhang, & Zhang 2024).

نقش TME در سرطان ریه

ریه سالم با ویژگی‌های آناتومیک و سلولی خود به عنوان یک سد دفاعی در برابر عوامل بیماری‌زا و ذرات عمل می‌کند. اما در شرایط التهابی مانند بیماری مزمن انسدادی ریه، ریزمحیط ریوی می‌تواند شرایطی فراهم کند که به تومورزایی کمک کند (Houghton, 2013). سرطان ریه شامل زیرگونه‌های متنوع با ناهمگنی سلولی و جهشی است که نه تنها سلول‌های اپیتلیالی تومور، بلکه TME را نیز در بر می‌گیرد. TME شامل رگ‌های خونی، فیبروبلاست‌های مرتبط با سرطان¹ (CAFs)، ماتریکس خارج سلولی و سلول‌های ایمنی نفوذکننده است. در NSCLC،

¹ Cancer-associated fibroblasts

تومورزایی می‌شوند، و ncRNAهای سرکوبگر تومور⁴ که از پیشرفت سرطان جلوگیری می‌کنند (Sonea et al. 2018). پژوهش‌های نوظهور همچنین به نقش ncRNAها در فرآیندهای کلیدی زیست‌شناسی سرطان ریه، از جمله تنظیم انتقال اپی‌تلیال به مزانشیمی⁵ (EMT) که در متاستاز نقش دارد، اشاره کرده‌اند (Ying Chen et al. 2017). این مولکول‌ها از طریق تنظیم مسیرهای پیام‌رسانی و تعامل با پروتئین‌ها، بر رفتار سلولی اثر می‌گذارند و بدین‌وسیله به درک بهتر از مکانیسم‌های مولکولی پیشرفت سرطان ریه کمک می‌کنند (Kielbowski, Ptasiński, & Wojcik, & Wojtyś 2023). در ادامه، نقش انواع مختلف ncRNAها در سرطان ریه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

amiRNA

amiRNA نوعی RNA غیرکدکننده کوتاه و درون‌زا هستند که عمدتاً از DNA به‌صورت RNAهای اولیه⁶ (pri-miRNA) رونویسی و پس از پردازش به فرم بالغ تبدیل می‌شوند. این مولکول‌ها اغلب با ناحیه 3'-UTR در mRNAهای هدف برهم‌کنش کرده و باعث تخریب یا مهار ترجمه می‌گردند، هرچند تعامل با نواحی دیگر مانند 5'-UTR⁷ و پروموتورها نیز گزارش شده است (Broughton, Lovci, Huang, Yeo, & Pasquinelli, 2016; Ha & Kim, 2014). amiRNAها می‌توانند به مایعات خارج‌سلولی ترشح شده و از طریق اتصال به پروتئین‌ها یا درون اگزوزوم‌ها به سلول‌های هدف منتقل شوند. به‌دلیل نقش محوری در تنظیم بیان ژن و عملکرد سلولی، amiRNAها یکی از اجزای کلیدی و پر مطالعه محتوای اگزوزوم‌ها هستند (Durenz-Saez et al., 2021). در بیماران مبتلا به سرطان ریه، غلظت اگزوزوم‌ها و amiRNAهای آنها در مقایسه با افراد سالم به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. به‌ویژه، سطوح amiRNAهای اگزوزومی در پلاسما و برونکوالوئولار⁹ (BAL) بیماران NSCLC بالاتر از افراد بدون تومور گزارش شده است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که amiRNAهای اگزوزومی در فرآیندهای زیستی مختلف مرتبط با

پیش‌سرطانی در آنها ایجاد کنند. این سلول‌ها با ترشح فاکتورهای مختلف به پیشرفت تومور کمک می‌کنند. در نتیجه، TME هدفی برای توسعه درمان‌های ضدسرطان شده است (Altorki et al. 2019). از سویی دیگر اگزوزوم‌های مشتق شده از سلول‌های تومور¹ (TEX) به‌عنوان اجزای کلیدی TME عمل کرده و تکثیر، مهاجرت، و پاسخ سلول‌های سرطانی به شیمی‌درمانی و رادیوتراپی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. سلول‌های توموری نیز با تنظیم بیوژنز و ترکیب TEX، رشد و پیشرفت تومور را تقویت می‌کنند. این تعامل دوسویه اهمیت TEX و TME را در سرطان‌زایی ریه برجسته می‌کند (شکل ۲) (X. Li, Wu, & Jin 2024).

عملکردهای زیستی ncRNAs در سرطان ریه

ncRNA که پیش‌تر به‌عنوان محصولات زائد رونویسی شده در نظر گرفته می‌شدند، اکنون به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های حیاتی بیان ژن و حفظ هموستاز سلولی شناخته شده‌اند (Hadjicharalambous & Lindsay 2019). از میان آنها، microRNAها (miRNAs)، RNAهای بلند غیرکدکننده² (lncRNAs) و RNAهای حلقوی³ (circRNAs) در بروز انواع مختلفی از سرطان‌ها، از جمله سرطان ریه، نقش دارند (Verma, Ratre, Mazzone, Laurino, & Bhaskar 2020). این مولکول‌ها دارای الگوهای بیانی خاص بافتی هستند و پایداری بالایی در مایعات بدن دارند، که آنها را به گزینه‌هایی جذاب برای نشانگرهای زیستی غیرتهاجمی تبدیل می‌کند (Drula et al. 2020). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که سطح بالای برخی ncRNAها در خون بیماران مبتلا به سرطان ریه، با مراحل پیشرفته بیماری و متاستاز مرتبط است (S. Xie, Wu, Qi, & Wu, & Zhu 2021). این ارتباط نشان می‌دهد که ncRNAها می‌توانند نه‌تنها برای تشخیص اولیه، بلکه برای پایش پیشرفت بیماری و ارزیابی پاسخ به درمان نیز مورد استفاده قرار گیرند (Rapisuwon, Vietsch, & Wellstein 2016). نقش‌های متنوع ncRNAها در سرطان ریه را می‌توان در قالب دو دسته عملکردی اصلی تقسیم‌بندی کرد: ncRNAهای انکوژنیک که باعث

⁴ Tumor-suppressive

⁵ Epithelial-mesenchymal transition

⁶ Primary miRNAs

⁷ 3'-UTR

⁸ 5'-UTR

⁹ Bronchoalveolar lavage

¹ Tumor cell-derived exosomes

² Long non-coding RNAs

³ Circular RNAs

عمل می‌کنند (L. Zhang et al. 2015). در همین راستا، مطالعه Zhuang و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که miR-9 موجود در اگزوزوم‌ها با فعال‌سازی مسیر سیگنال‌دهی JAK/STAT، فرآیند رگ‌زایی را تحریک می‌کند (Zhuang et al. 2012). همچنین، مهارکننده بافتی متالوپروتئینازها-1 (TIMP-1) باعث افزایش سطح miR-210 در اگزوزوم‌های مشتق‌شده از نمونه‌های LUAD و در نهایت منجر به تحریک رگ‌زایی در سلول‌های استرومایی می‌شود (Cui et al. 2015). افزون بر این، Liu و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که miR-21 موجود در اگزوزوم‌ها موجب فعال‌سازی فاکتور انتقال پیام و فعال‌ساز رونویسی STAT3 شده، بیان VEGF³ را افزایش می‌دهد و فرآیند رگ‌زایی و دگرگونی بدخیم سلول‌های اپی‌تلیالی نایژه‌ای انسان⁴ (HBECs) را القاء می‌کند (Y. Liu et al. 2016).

نقش miRNAهای اگزوزومی در EMT و متاستاز در سرطان ریه

متاستاز یک فرآیند چندمرحله‌ای است که شامل تهاجم سلول‌های سرطانی به رگ‌های خونی یا لنفاوی، مهاجرت به محل‌های دوردست و تشکیل کلونی‌های ثانویه می‌باشد (Santos, Peixoto & Medeiros 2018). نقش کلیدی در این مسیر دارد؛ طی EMT، چسبندگی بین سلولی کاهش یافته و سلول‌ها ویژگی‌های تهاجمی و مهاجرتی کسب می‌کنند (Greening, Gopal, Mathias, et al. 2015). شواهد نشان می‌دهد که اگزوزوم‌ها و محموله‌های آن‌ها، به‌ویژه miRNA، در مراحل مختلف متاستاز مؤثرند. به‌عنوان نمونه، miR-23a اگزوزومی پس از تحریک با TGF- β 1 در سلول‌های A549 افزایش یافته و EMT را القا می‌کند (Kim et al. 2016). همچنین تغییرات پروفایل miRNAهای اگزوزومی در سلول‌های NSCLC پس از EMT گزارش شده است (Y.-T. Tang et al. 2018). هرچند مکانیسم‌های دقیق این پدیده هنوز کاملاً روشن نیست (Salido-Guadarrama, Romero-Cordoba, Peralta-Zaragoza, & Rodriguez-Dorantes 2014). به‌نظر

سرطان ریه از جمله تکثیر سلولی، رگ‌زایی، متاستاز و تنظیم متابولیسم نقش دارند. همچنین این miRNAها می‌توانند بر ریزمحیط تومور اثر گذاشته و به سیستم ایمنی سیگنال دهند. هرچند عملکرد آن‌ها مشابه miRNAهای سلول‌های طبیعی است، اما مسیرهای اثرگذاری در سرطان متفاوت بوده و اهمیت آن‌ها را در تومورزایی برجسته می‌کند (Hu, Meiners, Lukas, & Stathopoulos, & Chen 2020).

نقش miRNAهای اگزوزومی در تکثیر سلولی در سرطان ریه

تکثیر سلولی، که با تغییر در بیان یا فعالیت پروتئین‌های مرتبط با چرخه‌ی سلولی مشخص می‌شود، نقش حیاتی در شکل‌گیری و پیشرفت سرطان ایفا می‌کند (Z. Sun, Shi, et al. 2018). اگزوزوم‌ها از طریق انتقال اطلاعات ژنتیکی به‌وسیله‌ی miRNAهای درون خود، ارتباط بین سلول‌ها در TME را برقرار می‌کند و به این طریق، موجب افزایش تکثیر سلول‌های سرطان ریه می‌شوند. برای مثال، Harel و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که miR-512 موجود در اگزوزوم‌ها با هدف قرار دادن پروتئین TEAD4 (عضو خانواده دامنه TEA¹)، تکثیر سلول‌های تومور ریه را متوقف می‌کند که این یافته نشان‌دهنده‌ی اثرات سرکوب‌گر تومور miR-512 است (Adi Harel et al. 2015). از سوی دیگر، مشخص شد که miR-208a که در اگزوزوم‌های مشتق‌شده از سلول‌های NSCLC وجود دارد، به‌عنوان یک پیام‌رسان انتقالی عمل کرده و با هدف قرار دادن p21، مسیر سیگنال‌دهی AKT/mTOR را فعال می‌سازد. این مکانیسم منجر به افزایش تکثیر سلول‌های NSCLC و القای مقاومت به پرتودرمانی می‌شود. (Y. Tang et al. 2016). علاوه بر این، اگزوزوم‌های حاوی miR-96 که از سلول‌های H1299 منشأ گرفته‌اند، با هدف قرار دادن مستقیم و مهار بیان پروتئین LMO7 (پروتئین تنها دارای یک دامنه LIM⁷ منفرد)، باعث افزایش تکثیر سلولی شده و نقش تومورزایی خود را نشان می‌دهند (H. Wu et al. 2017).

نقش miRNAهای اگزوزومی در رگ‌زایی در سرطان ریه

رگ‌زایی تومور، که برای رشد و متاستاز تومور ضروری است، تحت تأثیر اگزوزوم‌هایی قرار دارد که توسط انواع مختلفی از سلول‌ها ترشح شده و به‌عنوان واسطه‌هایی برای ارتباط بین سلولی

¹ Transcriptional Enhancer Activator

² Tissue inhibitor of metalloproteinases-1

³ Vascular Endothelial Growth Factor

⁴ Human bronchial epithelial cells

سرکوب LMO7، حساسیت به شیمی‌درمانی را کاهش می‌دهد (H. Wu et al. 2017). در مقابل، کاهش miR-146a-5p در بیماران NSCLC پیشرفته با عود بالاتر همراه بوده و نشان داده شده که این miRNA با مهار اتوفاژی و هدف‌گیری Atg2 پاسخ به سیس‌پلاتین نقش دارد (Yuwen, Sheng, Liu, Wenyu, & Shu 2017). همچنین miR-512 و miR-373 با افزایش حساسیت به سیس‌پلاتین و مهار پیشرفت تومور ارتباط دارند (Adi Harel et al. 2015). آگروزوم‌ها در مقاومت به EGFR-TKIs نیز مؤثرند. miR-21 آگروزومی می‌تواند از سلول‌های مقاوم به Gefitinib به سلول‌های حساس منتقل شده و از طریق فعال‌سازی مسیر AKT مقاومت ایجاد کند (Jing et al. 2018). علاوه بر این، افزایش miR-214 در آگروزوم‌های سلول‌های مقاوم PC9GR با انتقال به سلول‌های حساس، مقاومت به Gefitinib را القا می‌کند. مهار miR-214 در این آگروزوم‌ها توانست این مقاومت را معکوس نماید (B. Zhang, Fang, Deng, & Xia, 2018).

نقش miRNAهای آگروزومی در ایمنی سرطان ریه

مولکول‌های نقطه واریسی ایمنی^۱ نقش کلیدی در تنظیم سیستم ایمنی برای حفظ خود-تحمیلی^۲ و جلوگیری از خودایمنی ایفا می‌کنند (Smolle, Prinz, Calin, & Pichler 2019). هدف‌گیری این مولکول‌ها، مانند PD-1 و PD-L1، بقای بیماران مبتلا به NSCLC پیشرفته را بهبود می‌بخشد (Arbour & Riely 2019). شبکه‌ای از miRNAها، از جمله miR-34 و miR-200، بیان PD-L1 را در سلول‌های سرطانی ریه تنظیم می‌کنند و بر پاسخ ایمنی اثر می‌گذارند (Cortez et al. 2016). همچنین مشخص شد که miR-200 بیان PD-L1 را کنترل می‌کند (L. Chen et al. 2014). تحقیقات فزاینده‌ای نشان می‌دهد که آگروزوم‌ها با انتقال مولکول‌ها و عوامل سرکوب‌کننده ایمنی در پیشرفت تومور نقش دارند (Greening, Gopal, Xu, Simpson, & Chen 2015). miRNAهای آگروزومی حامل‌های مهمی هستند که می‌توانند عملکرد سلول‌های ایمنی، از جمله سلول‌های دندریتیک^۳ (DCs) و لنفوسیت‌های T، را در سرطان تحت تأثیر قرار دهند (Z. Sun, et al. 2017).

می‌رسد سه مکانیسم برای انتقال miRNA آگروزومی در طی متاستاز سرطان ریه وجود دارد (S. Yu, Cao, Shen, & Feng 2015). نخست، آگروزوم‌های سلول‌های تهاجمی می‌توانند miRNAهایی مانند miR-494 و miR-542-3p را به سلول‌های استرومایی یا فیبروبلاست‌ها منتقل کرده و سلول‌های پیش‌متاستاتیک ایجاد کنند (Rana, Malinowska, & Zöller 2013). همچنین miR-21 آگروزومی در LUAD با هدف‌گیری PDCD4، استئوکلاستوزن را افزایش می‌دهد (Z. Xu et al. 2018). دوم، سلول‌های سرطانی ریه با miR-21 و miR-29a آگروزومی گیرنده‌های TLR7/8 را در سلول‌های ایمنی فعال کرده و رشد تومور را تقویت می‌کنند (Fabbri et al. 2012). در مقابل، miR-192 ترشح‌شده از سلول‌های سرطانی می‌تواند آنژیوژنز را مهار و کلونیزاسیون استخوانی را کاهش دهد (Valencia et al. 2014). سوم، گروزوم‌های مشتق از سلول‌های بنیادی مزانشیمی استخوانی در شرایط هیپوکسیک، miRNAهایی از جمله miR-193a-3p را منتقل کرده و از طریق فعال‌سازی EMT، STAT3 و متاستاز را افزایش می‌دهند (Qin, Yu, Xu, Shen, & Feng 2017).

نقش miRNAهای آگروزومی در مقاومت دارویی در سرطان ریه

مقاومت دارویی یکی از چالش‌های اصلی در درمان سرطان ریه است، زیرا بیماران به سرعت در برابر شیمی‌درمانی و داروهای هدفمند، مانند مهارکننده‌های EGFR-TKI، مقاوم می‌شوند (Rotow & Bivona 2017). آگروزوم‌ها از طریق انتقال افقی پروتئین‌ها و به‌ویژه miRNAها، در ایجاد و انتشار مقاومت دارویی نقش مهمی دارند. مطالعات نشان داده‌اند که الگوی بیان miRNAهای آگروزومی بین سلول‌های مقاوم و حساس تفاوت دارد. برای مثال، در سلول‌های A549 مقاوم به سیس‌پلاتین، miR-100-5p توسط آگروزوم‌ها منتقل می‌شود و با هدف‌گیری mTOR، حساسیت سلول‌ها به دارو را تغییر می‌دهد (Qin, Yu, et al. 2017). همچنین، miR-222-3p آگروزومی در سلول‌های مقاوم به جم‌سیتابین با سرکوب SOCS3، باعث افزایش تهاجم و مقاومت به دارو می‌شود (F. Wei et al. 2017). miR-96 نیز در آگروزوم‌های بیماران سرطانی افزایش یافته و از طریق

¹ - Immune checkpoints

² - Self-tolerance

³ - Dendritic cells

lncRNAها مانند mRNAها، رونویسی، پیرایش، کلاهک‌گذاری و پلی‌آدنیل می‌شوند (Tian et al. 2024). circRNAها کلاس خاصی از ncRNAها هستند که ساختار حلقوی بسته کووالانسی دارند. تحقیقات نقش کلیدی آن‌ها را در فرآیندهای بیولوژیکی مانند تنظیم بیان ژن، اسپلایسینگ³ RNA و پاسخ ایمنی نشان داده است. در سرطان، circRNAها به عنوان اسفنج مولکولی، قالب ترجمه و داربست پروتئینی، در تومورزایی، پیشرفت تومور و تنظیم TME نقش مهمی ایفا می‌کنند. شواهد نوظهور، پتانسیل آن‌ها را به عنوان بیومارکر توموری و هدف درمانی، به ویژه در ایمونوتراپی سرطان برجسته کرده است (Yan Wang et al. 2025). lncRNAها و circRNAها از طریق مکانیسم‌هایی مانند ادغام، اندوسیتوز و اتصال اختصاصی با واسطه گیرنده، عملکردهای تنظیمی کلیدی در ارتباط سلول-سلول در TME را تسهیل می‌کنند (Lu et al. 2021). در سرطان ریه، lncRNAهای اگزوزومی و circRNAها با واسطه‌گری تعاملات سلول به سلول و کنترل مسیرهای انتقال سیگنال، به طور قابل توجهی بر رشد، تهاجم، متاستاز و رگ‌زایی تأثیر می‌گذارند (جدول ۱) (Z. Sun, Shi, et al. 2018).

(Shi, et al. 2018). به عنوان نمونه، miR-214 اگزوزومی از سلول‌های سرطانی ریه به سلول‌های CD4+ T منتقل شده و با کاهش PTEN، گسترش سلول‌های T تنظیم‌کننده (Treg) را افزایش داده و رشد تومور را تقویت می‌کند (Yin et al. 2014).

lncRNAها و circRNAها

شواهد روزافزون، نقش‌های محوری lncRNAهای اگزوزومی و circRNAها را در پیشرفت تومور، چه به عنوان انکوژن و چه به عنوان سرکوبگر، برجسته می‌کنند (Gilyazova et al. 2023). lncRNAها طبق تعریف، به RNAهایی با رونوشت‌های طولانی‌تر از ۲۰۰ نوکلئوتید اشاره دارند که هیچ چارچوب خواندن باز طولانی^۱ (ORF، بیش از ۱۰۰ اسید آمینه) ندارند و توانایی کدگذاری پروتئین‌ها را ندارند. ثابت شده است که lncRNAها با تعامل با سایر ماکرومولکول‌های سلولی، از جمله DNA، RNA و پروتئین، بسیاری از فنوتیپ‌های مهم سرطان را هدایت می‌کنند. آن‌ها می‌توانند فرآیندهای سرطان را از طریق بازسازی کروماتین، رونویسی یا تنظیم ترجمه، ویرایش RNA، تخریب RNA، پیرایش RNA و اسفنج miRNA^۲ تنظیم کنند.

^۱ Open reading frame

^۲ miRNA sponge

^۳ splicing

جدول ۱- نقش lncRNAهای اگزوزومی و circRNAها در بروز و پیشرفت سرطان ریه

منبع	میزان بیان	محتوای اگزوزوم	نقش در سرطان ریه
(Mao et al., 2021)	افزایش بیان	LncRNA FOXD3-AS1	تکثیر، مهاجرت و تهاجم
(X. Lv et al., 2021)	افزایش بیان	LINC00662	
(Zang et al., 2020)	افزایش بیان	LncRNA UFC1	
(C. Zhang et al., 2023)	افزایش بیان	LncRNA HOTAIR	
(C. Zhang et al., 2020)	افزایش بیان	LncRNA HOTAIR	
(Z. Chen et al., 2022)	افزایش بیان	HOTAIRM1	
(Song et al., 2021)	افزایش بیان	Lnc-MZT2A-5:1	
(H. Xie et al., 2022)	افزایش بیان	CircVMP1	
(W. Chen et al., 2022)	افزایش بیان	CircSHKBP1	
(Geng, Tu, Bai, & Geng, 2022)	افزایش بیان	LINC01356	
(J. Chen et al., 2021)	افزایش بیان	LINC00273	
(D. Wu et al., 2021)	افزایش بیان	Lnc-MMP2-2	
(N. Zhang et al., 2020)	افزایش بیان	CircSATB2	
(Ni et al., 2021)	افزایش بیان	LncRNA-SOX2OT	
(J. Xu et al., 2023)	افزایش بیان	MFI2-AS1	رگ‌زایی
(H. Wang et al., 2022)	افزایش بیان	Circ_0008717	
(C. Li et al., 2019)	کاهش بیان	LncRNA GAS5	
(Castellano et al., 2020)	افزایش بیان	LincRNA-p21	

(Mao et al., 2021)	افزایش بیان	lncRNA FOXD3-AS	مقاومت دارویی
(H. Xie et al., 2022)	افزایش بیان	CircVMP1	
(S.-L. Wei et al., 2023)	کاهش بیان	CircKIF20B	
(Z. Yu et al., 2023)	افزایش بیان	LOC85009	
(Ma et al., 2020)	افزایش بیان	Hsa_circ_0002130	
(Shao et al., 2021)	افزایش بیان	Circ_PIP5K1A	
(Deng et al., 2020)	افزایش بیان	LncRNA MSTRG.292666.16	
(Pan & Zhou, 2020)	افزایش بیان	LncRNA H19	
(K. Zhang et al., 2022)	افزایش بیان	LncRNA SNHG7	
(X. Chen et al., 2020)	افزایش بیان	LncRNA UCA1	
(Y. Sun et al., 2022)	افزایش بیان	LncRNA MEG3	
(J. Li et al., 2022)	افزایش بیان	CircDNER	
(S.-W. Chen et al., 2021)	افزایش بیان	CircUSP7	تنظیم ایمنی
(Hong et al., 2020)	افزایش بیان	CircCPA4	
(Yue Wang et al., 2023)	افزایش بیان	Lnc-ZFP3-3-TAF1- CCNB1	
(T. Chen et al., 2021)	افزایش بیان	CircFARSA	
(J. Lv et al., 2021)	افزایش بیان	LncRNA FGD5-AS1	

اگزوزومی مانند circVMP1 و circKIF20B نیز نقش مهمی دارند. circVMP1 در سلول‌های مقاوم به سیس‌پلاتین افزایش یافته و از طریق محور miR-524-5p-METTL3/SOX2 پیشرفت NSCLC و مقاومت دارویی را تقویت می‌کند (H. Xie, Yao, & Ni 2022). circKIF20B در بیماران مقاوم به gefitinib کاهش یافته و با اتصال به miR-615-3p MEF2A را تنظیم کرده و چرخه سلولی، آپوپتوز و فسفوریلاسیون اکسیداتیو میتوکندریایی¹ (OXPHOS) را تحت تأثیر قرار می‌دهد (S.-L. Wei et al. 2023). circSHKBP1 نیز با عملکرد اسفنجی miR-1294 و افزایش PKM2، تکثیر، متاستاز، گلیکولیز و جذب ماکروفاژها را در NSCLC تقویت می‌کند (W. Chen et al. 2022).

نقش lncRNA ها و circRNA ها در رگ‌زایی

تحقیقات متعددی، نقش lncRNA های اگزوزومی و circRNA ها را در رگ‌زایی تومور با تنظیم عوامل ترشح‌شده گزارش کرده‌اند و در نتیجه بر توسعه سرطان ریه تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، اگزوزوم‌های آزاد شده توسط سلول‌های NSCLC حاوی سطوح بالایی از lncRNA MFI2-AS1 هستند. این lncRNA با اتصال به miR-107، بیان NFAT5، (یک پروتئین کلیدی مرتبط با رگ‌زایی

نقش lncRNA ها و circRNA ها در تکثیر، مهاجرت و تهاجم مطالعات نشان می‌دهند که lncRNA ها و circRNA های اگزوزومی در سرطان ریه نقش حیاتی دارند و با تغییر فنوتیپ و عملکرد سلول‌های گیرنده، تکثیر، مهاجرت و تهاجم را تنظیم می‌کنند (He et al. 2023). نمونه‌هایی از lncRNA های کلیدی شامل FOXD3-AS1 است که با افزایش ELAVL1 و فعال‌سازی مسیر PI3K/Akt، تکثیر، تهاجم و مقاومت به ۵-فلوروئوراسیل را تقویت می‌کند (Mao, Mu, & Wu 2021). به طور مشابه، LINC00662 و UFC1 نیز با مهار PTEN از طریق مسیر miR-320d/E2F1 یا اتصال به EZH2، رشد و مهاجرت سلول‌ها را در NSCLC افزایش می‌دهند (X. Lv et al. 2021; Zang et al. 2020). علاوه بر این، LINC00662 و UFC1 نیز با مهار PTEN از طریق مسیر miR-320d/E2F1 یا اتصال به EZH2، رشد و مهاجرت سلول‌ها را در NSCLC افزایش می‌دهند (C. Zhang et al. 2023). lncRNA اگزوزومی HOTAIRM1 که توسط تومور آزاد می‌شود، می‌تواند به سلول‌های CAF منتقل شده و با تنظیم بیان SPON2، پیشرفت LUAD را تقویت کند (Z. Chen et al. 2022). lncRNA اگزوزومی lnc-MZT2A-5:1 که در سلول‌های NSCLC مقاوم به AZD9291 بیان بالایی دارد، همچنان فعال‌سازی و مهاجرت سلول‌های MRC-5 را تسهیل می‌کند (Song, Qian, Huang, Chen, & Yang 2021).

¹ Oxidative phosphorylation

سرطانی را تنظیم می‌کند (Guo, Gao, Yang, & Li, 2023; T. Wu, Dong, Yang, Mo, & You 2024). به‌عنوان نمونه، lncRNA FOXD3-AS1 با افزایش ELAVL1 و فعال‌سازی مسیر PI3K/Akt، تکثیر، تهاجم و مقاومت به ۵-فلورواوراسیل را تقویت می‌کند (Mao et al. 2021). LOC85009 از طریق اگزوزوم‌ها به سلول‌های مقاوم به دوکتاکسل منتقل شده و با جداسازی USP5 و بی‌ثباتی USF1، رونویسی ATG5 را غیرفعال کرده و مقاومت به دارو را کاهش می‌دهد (Z. Yu et al. 2023). circRNA hsa_circ_0002130 در سلول‌های مقاوم به اوزیمرتینیب افزایش یافته و با هدف‌گیری miR-498 ژن‌های *GLUT1*، *HK2* و *LDHA* را تنظیم می‌کند؛ و حذف آن مقاومت به دارو را کاهش می‌دهد (Ma, Qi, & Li 2020). circ_PIP5K1A با اسفنج کردن miR-101، ABCC1 را تنظیم کرده و حذف آن تکثیر، مهاجرت و تهاجم سلول‌ها را مهار و حساسیت به سیس‌پلاتین را افزایش می‌دهد (Shao, Song, & Sun 2021). circVMP1 از طریق محور miR-524-5p-METTLL3/SOX2 پیشرفت و مقاومت به سیس‌پلاتین را تقویت می‌کند و قابلیت انتقال مقاومت به سلول‌های حساس را دارد (H. Xie et al. 2022). circKIF20B نیز با محور -615-miR-615/circKIF20B 3p/MEF2A چرخه سلولی و فسفوریلاسیون اکسیداتیو را مهار کرده و حساسیت به Gefitinib را بازایی می‌کند (S.-L. Wei et al. 2023).

نقش lncRNAها و circRNAها در تنظیم ایمنی

تحقیقات نشان می‌دهند که اگزوزوم‌ها با تنظیم عملکرد سلول‌های ایمنی، از جمله DCs، ماکروفاژها و سلول‌های T تنظیم‌کننده، نقش مهمی در پیشرفت سرطان ریه ایفا می‌کنند (Baig et al. 2020). اگزوزوم‌های مشتق‌شده از تومور به‌عنوان پیام‌رسان‌های پاراکرینی^۱، سیگنال‌های پیش‌التهابی یا سرکوب‌کننده ایمنی را منتقل کرده و پاسخ ضدتومور را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به‌عنوان نمونه، ترشح circUSP7 از سلول‌های NSCLC عملکرد سلول‌های CD8⁺ T را مختل کرده و مقاومت به ایمونوتراپی ضد PD-1 را ایجاد می‌کند (S.-W. Chen et al. 2021). همچنین، PD-1 L1 ترشح‌شده توسط سلول‌های NSCLC از طریق فعال‌سازی

در سرطان ریه) را افزایش می‌دهد (J. Xu et al. 2023). در همین حال، افزایش بیان circ0008717 در اگزوزوم‌های سرم و بافت‌های توموری بیماران سرطان ریه مشاهده شده است. سنجش‌های عملکردی که تشکیل میکروتوبول را ارزیابی می‌کنند، نشان می‌دهند که circ0008717 اگزوزومی باعث رگ‌زایی می‌شود. این یافته‌ها نقش‌های حیاتی lncRNAهای اگزوزومی و circRNAها را در رگ‌زایی روشن می‌کنند و اهداف بالقوه‌ای را برای درمان ضد رگ‌زایی در سرطان ریه آشکار می‌کنند (H. Wang et al. 2022).

نقش lncRNAها و circRNAها در EMT

lncRNAها و circRNAهای اگزوزومی به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های کلیدی بیان ژن، نقش مهمی در فرآیند EMT و متاستاز سرطان ریه دارند. به‌عنوان مثال، lncRNA MALAT-1 با تعامل با مسیرهای PI3K/Akt و Wnt/ β -catenin EMT را تقویت می‌کند و به‌عنوان miRNA sponge مانع تعامل miRNAها با ژن‌های هدف می‌شود (Hussein, Valinezhad, Adel, & Munirathinam 2024). همچنین، حذف PCAT6، تکثیر، مهاجرت، تهاجم و قطبش ماکروفاژهای M2 را در سلول‌های NSCLC کاهش می‌دهد و از طریق محور PCAT6/miR-326/KLF1 فرآیند EMT و تومورزایی را مهار می‌کند (Yun Chen, Hong, Qu, Chen, & Qin 2022). مشابه lncRNAها، circRNAهای اگزوزومی نیز عمدتاً از طریق تعدیل بیان میکروRNAها بر رشد سرطان و EMT تأثیر می‌گذارند (Z.-f. Zhou et al. 2020). برای مثال، افزایش سطح miR-5195-3p در سلول‌های NSCLC باعث افزایش نشانگرهای مزانشیمی مانند N-cadherin، Vimentin و β -catenin و القای EMT می‌شود، در حالی که circERBB2IP به‌عنوان اسفنجی برای miR-5195-3p عمل می‌کند و این اثر را کاهش می‌دهد (Peng et al. 2023). علاوه بر این، کاهش circZNF451 با تشکیل کمپلکس با TRIM56 و FXR1 به تحریک EMT کمک می‌کند (Gao et al. 2022).

نقش lncRNAها و circRNAها در مقاومت درمانی

lncRNAها و circRNAهای اگزوزومی به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های مهم مقاومت دارویی در سرطان ریه شناخته می‌شوند و با انتقال مولکول‌های زیستی، تکثیر، تهاجم، اتوفاژی و آپوپتوز سلول‌های

¹ Paracrine messengers

داده و با پیش‌آگهی ضعیف مرتبط است، و LOC85009 مقاومت به دوکناکسل را از طریق محور USP5/USF1 تعدیل می‌کند (T. Liu et al. 2022; Z. Yu et al. 2023). همچنین lnc-MLETA1 و circSATB2، hsa_circ_0069313 در بیماران با سرطان ریه متاستاتیک یا بقای کوتاه‌تر افزایش بیان نشان می‌دهند، که ارزش آن‌ها به‌عنوان شاخص‌های پیش‌آگهی را تأیید می‌کند (Yinfeng Chen et al. 2022; X.-R. Hsu et al. 2023; N. Zhang et al. 2020). علاوه بر این، circRNAهای hsa_circ_0001492، hsa_circ_0000896 و hsa_circ_0001439 حساسیت و ویژگی تشخیصی LUAD را بهبود می‌بخشند (Kang et al. 2022).

چالش‌ها و مسیرهای آینده برای استفاده بالینی از اگزوزوم‌ها

تشخیص غیرتهاجمی و دقیق سرطان ریه هنوز چالشی اساسی است و روش‌های فعلی مبتنی بر نمونه‌برداری تهاجمی می‌توانند به بیماران آسیب برسانند. توسعه روش‌های غیرتهاجمی و مؤثر برای کاهش مرگ‌ومیر ناشی از سرطان ریه ضروری است. اگزوزوم‌ها به‌عنوان وزیکول‌های کوچک غشایی، حامل miRNA و ncRNA، پتانسیل بالینی زیادی برای تشخیص و پیش‌آگهی بیماری دارند، اما استفاده از آن‌ها هنوز محدود به پژوهش‌های پیش‌بالینی است. ساتریفیوژ فوق‌سریع رایج‌ترین روش جداسازی اگزوزوم‌هاست، اما هزینه بالا، سنگینی دستگاه و طولانی بودن فرآیند از محدودیت‌های آن است. روش‌های جایگزین مانند اولترافیلتراسیون، رسوب‌گذاری ساده و فناوری‌های ایمونوفینیتری مزایا و معایب خود را دارند؛ ولی سریع است اما احتمال از دست رفتن اگزوزوم‌ها وجود دارد، دومی ساده است ولی آلاینده‌ها را نیز ته‌نشین می‌کند، سومی با خلوص بالا همراه است اما هزینه‌بر و با بازده کم است (Cheruvanky et al. 2007; Gardiner et al. 2016; Jakobsen et al. 2015; Lane, Korbie, Anderson, Vaidyanathan, & Trau 2015; Oksvold, Neurauter, & Au-Pedersen 2014). فناوری‌های نوظهور مانند نانوکوب‌های Au-NPFe₂O₃NC و نانوذرات سوپراپارامغناطیسی امکان جداسازی سریع، کم‌هزینه و حساس را فراهم می‌کنند، اما نیازمند بررسی پایداری و سازگاری زیستی هستند (Boriachek et al. 2019; Masud et al. 2019; Oeyen et al. 2018).

چالش دوم خلوص اگزوزوم‌هاست، زیرا جداسازی همواره با آلودگی پروتئینی همراه است. انتخاب روش به نوع نمونه،

مسیرهای مرگ سلولی، CD8⁺ T را غیرفعال کرده و به فرار ایمنی کمک می‌کند، در حالی که حذف circ-CPA4 از طریق محور let-7/PD-L1 رشد سلولی و مقاومت دارویی را کاهش می‌دهد (Hong, Xue, Jiang, Zhang, & Gao 2020). مطالعات دیگر ارتباط بیان بالای CCNB1 با lnc-CENPH-1/lnc-CENPH-2 و محور lnc-ZFP3-3/TAF1/CCNB1 را در مقاومت اولیه به ایمونوتراپی نشان داده‌اند و کاهش IL6R پس از درمان می‌تواند هدف بالقوه‌ای برای طراحی درمان‌های جدید باشد (Yue Wang et al. 2023). افزون بر این، اگزوزوم‌های حاوی lncRNAها و circRNAها مانند circFARSA و FGD5-AS1 با قطبش ماکروفاژها به فنوتیپ M2 و فعال‌سازی مسیرهای PI3K/AKT و EMT، microRNA-944/MACC1، مهاجرت و متاستاز سلول‌های NSCLC را تقویت می‌کنند (T. Chen et al. 2021; J. Lv et al. 2021).

نقش ncRNA به‌عنوان نشانگرهای زیستی تشخیصی در سرطان ریه

تشخیص زودهنگام سرطان ریه برای موفقیت درمان حیاتی است و ncRNAهای اگزوزومی به‌عنوان نشانگرهای زیستی بالقوه اهمیت دارند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که miRNAهای اگزوزومی می‌توانند LUAD و SCC را از افراد سالم یا بیماران با بیماری‌های غیرسرطانی تمایز دهند. برای نمونه، miR-378a، miR-379، miR-200b-5p و miR-139-5p برای تشخیص LUAD و miR-10b-5p، miR-15b-5p و miR-320b برای تشخیص SCC کاربرد دارند (Cazzoli et al. 2013; Jin et al. 2016; Shan et al. 2018; X. Zhou et al. 2017). همچنین miR-96، miR-126، miR-23a و miR-30b/30c پتانسیل تشخیصی در NSCLC نشان می‌دهند و miR-let-7e-5p، miR-let-7b-5p و miR-486-5p در مراحل اولیه NSCLC اهمیت دارند (Grimolizzi et al. 2017; Y. Hsu et al. 2017; Rolfo, Chacartegui, Giallombardo, Alessandro, & Peeters 2016; H. Wu et al. 2017). پروفایل‌های اگزوزومی lncRNA و circRNA نیز حساسیت و ویژگی بالایی دارند و می‌توانند نشانگرهای تشخیصی و پیش‌آگهی دو منظوره باشند. برای مثال، lncRNA LINC01614 جذب گلوتامین را در LUAD افزایش

است (Boriachek et al. 2018). با وجود این محدودیت‌ها، اگزوزوم‌ها نقش مهمی در ارتباطات بین سلولی، انتقال miRNA و پیشرفت بیماری‌های ریوی دارند. تحقیقات پایه نشان داده‌اند که ncRNAهای اگزوزومی، به‌ویژه miRNA و lncRNA در مسیرهای بیماری دخیل‌اند، اما کاربرد بالینی و درمانی آن‌ها هنوز در مراحل اولیه قرار دارد. توسعه روش‌های بهینه برای استخراج، افزایش خلوص و شناسایی مولکولی این وزیکول‌ها، می‌تواند استفاده از آن‌ها را در تشخیص غیرتهاجمی و درمان سرطان ریه تسهیل کند و پتانسیل بالینی آن‌ها را محقق سازد (J. Wu & Shen 2020).

سرعت، هزینه و روش‌های پایین‌دستی مانند توالی‌یابی بستگی دارد (P. Li, Kaslan, Lee, Yao, & Gao 2017). چالش سوم، منبع اگزوزوم‌هاست؛ اگزوزوم‌ها از سلول‌های مختلف ترشح می‌شوند و تعیین منشأ توموری دشوار است (Kuo, Tigges, 2014; Toxavidis, & Ghiran 2017; McDonald et al. 2014). همچنین، بی‌نظمی در بیان miRNAها، مانند miR-21 که در چندین نوع سرطان بیش‌ازحد بیان می‌شود، محدودیت‌هایی برای اختصاصی‌سازی نشانگرها ایجاد می‌کند (Cao et al. 2019; Q. Li et al. 2018). اکثر مطالعات ارزیابی miRNA و ncRNAهای اگزوزومی را با RT-qPCR انجام می‌دهند، اما چالش‌های فنی شامل جمع‌آوری، نگهداری نمونه و تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی

منابع

- Adi Harel S, Bossel Ben-Moshe N, Aylon Y, Bublik D, Moskovits N, Toperoff G, Wilder S (2015) Reactivation of epigenetically silenced miR-512 and miR-373 sensitizes lung cancer cells to cisplatin and restricts tumor growth. *Cell Death & Differentiation* 22:1328-1340.
- Altorki NK, Markowitz GJ, Gao D, Port JL, Saxena A, Stiles B, Mittal V (2019) The lung microenvironment: an important regulator of tumour growth and metastasis. *Nature Reviews Cancer* 19:9-31.
- Anderson NM, Simon MC (2020) The tumor microenvironment. *Current Biology* 30:R921-R925.
- Arbour KC, Riely GJ (2019) Systemic therapy for locally advanced and metastatic non-small cell lung cancer: a review. *JAMA* 322:764-774.
- Baig MS, Roy A, Rajpoot S, Liu D, Savai R, Banerjee S, Saqib U (2020) Tumor-derived exosomes in the regulation of macrophage polarization. *Inflammation Research* 69:435-451.
- Banat GA, Tretyn A, Pullamsetti SS, Wilhelm J, Weigert A, Olesch C, Seeger W (2015) Immune and inflammatory cell composition of human lung cancer stroma. *PLoS One* 10:e0139073.
- Boriachek K, Islam MN, Möller A, Salomon C, Nguyen NT, Hossain MSA, Shiddiky MJ (2018) Biological functions and current advances in isolation and detection strategies for exosome nanovesicles. *Small* 14:1702153.
- Boriachek K, Masud MK, Palma C, Phan HP, Yamauchi Y, Hossain MSA, Shiddiky MJ (2019) Avoiding preisolation step in exosome analysis: direct isolation and sensitive detection of exosomes using gold-loaded nanoporous ferric oxide nanozymes. *Analytical Chemistry* 91:3827-3834.
- Broughton JP, Lovci MT, Huang JL, Yeo GW, Pasquinelli AE (2016) Pairing beyond the seed

supports microRNA targeting specificity. *Molecular Cell* 64:320-333.

Cao LQ, Yang XW, Chen YB, Zhang DW, Jiang XF, Xue P (2019) Exosomal miR-21 regulates the TETs/PTENp1/PTEN pathway to promote hepatocellular carcinoma growth. *Molecular Cancer* 18:148.

Castellano JJ, Marrades RM, Molins L, Vinolas N, Moises J, Canals J, Monzo M (2020) Extracellular vesicle lincRNA-p21 expression in tumor-draining pulmonary vein defines prognosis in NSCLC and modulates endothelial cell behavior. *Cancers* 12:734.

Cazzoli R, Buttitta F, Di Nicola M, Malatesta S, Marchetti A, Rom WN, Pass HI (2013) microRNAs derived from circulating exosomes as noninvasive biomarkers for screening and diagnosing lung cancer. *Journal of Thoracic Oncology* 8:1156-1162.

Chen J, Zhang K, Zhi Y, Wu Y, Chen B, Bai J, Wang X (2021) Tumor-derived exosomal miR-19b-3p facilitates M2 macrophage polarization and exosomal LINC00273 secretion to promote lung adenocarcinoma metastasis via Hippo pathway. *Clinical and Translational Medicine* 11:e478.

Chen L, Gibbons DL, Goswami S, Cortez MA, Ahn YH, Byers LA, Lin W (2014) Metastasis is regulated via microRNA-200/ZEB1 axis control of tumour cell PD-L1 expression and intratumoral immunosuppression. *Nature Communications* 5:5241.

Chen R, Xu X, Qian Z, Zhang C, Niu Y, Wang Z, Yu Y (2019) The biological functions and clinical applications of exosomes in lung cancer. *Cellular and Molecular Life Sciences* 76:4613-4633.

Chen SW, Zhu SQ, Pei X, Qiu BQ, Xiong D, Long X, Wu YB (2021) Cancer cell-derived exosomal circUSP7 induces CD8⁺ T cell dysfunction and anti-PD1 resistance by regulating the miR-934/SHP2 axis in NSCLC. *Molecular Cancer* 20:144.

- Chen T, Liu Y, Li C, Xu C, Ding C, Chen J, Zhao J (2021) Tumor-derived exosomal circFARSA mediates M2 macrophage polarization via the PTEN/PI3K/AKT pathway to promote non-small cell lung cancer metastasis. *Cancer Treatment and Research Communications* 28:100412.
- Chen W, Tang D, Lin J, Huang X, Lin S, Shen G, Dai Y (2022) Exosomal circSHKBP1 participates in non-small cell lung cancer progression through PKM2-mediated glycolysis. *Molecular Therapy-Oncolytics* 24:470-485.
- Chen X, Wang Z, Tong F, Dong X, Wu G, Zhang R (2020) RETRACTED: lncRNA UCA1 promotes gefitinib resistance as a ceRNA to target FOSL2 by sponging miR-143 in non-small cell lung cancer. *Molecular Therapy-Nucleic Acids* 19:643-653.
- Chen Y, Hong C, Qu J, Chen J, Qin Z (2022) Knockdown of lncRNA PCAT6 suppresses the growth of non-small cell lung cancer cells by inhibiting macrophages M2 polarization via miR-326/KLF1 axis. *Bioengineered* 13:12834-12846.
- Chen Y, Lou C, Ma X, Zhou C, Zhao X, Li N, Meng X (2022) Serum exosomal hsa_circ_0069313 has a potential to diagnose more aggressive non-small cell lung cancer. *Clinical Biochemistry* 102:56-64.
- Chen Y, Lu L, Feng B, Han S, Cui S, Chu X, Wang R (2017) Non-coding RNAs as emerging regulators of epithelial to mesenchymal transition in nonsmall cell lung cancer. *Oncotarget* 8:36787.
- Chen Z, Bian C, Huang J, Li X, Chen L, Xie X, Wang J (2022) Tumor-derived exosomal HOTAIRM1 regulates SPON2 in CAFs to promote progression of lung adenocarcinoma. *Discover Oncology* 13:92.
- Cheruvanky A, Zhou H, Pisitkun T, Kopp JB, Knepper MA, Yuen PS, Star RA (2007) Rapid isolation of urinary exosomal biomarkers using a nanomembrane ultrafiltration concentrator. *American Journal of Physiology-Renal Physiology* 292:F1657-F1661.
- Colombo M, Raposo G, Théry C (2014) Biogenesis, secretion, and intercellular interactions of exosomes and other extracellular vesicles. *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 30:255-289.
- Cortez MA, Ivan C, Valdecanas D, Wang X, Peltier HJ, Ye Y, Giri DK (2016) PDL1 regulation by p53 via miR-34. *Journal of the National Cancer Institute* 108:djv303.
- Cui H, Seubert B, Stahl E, Dietz H, Reuning U, Moreno-Leon L, Mari B (2015) Tissue inhibitor of metalloproteinases-1 induces a pro-tumourigenic increase of miR-210 in lung adenocarcinoma cells and their exosomes. *Oncogene* 34:3640-3650.
- Deng Q, Fang Q, Xie B, Sun H, Bao Y, Zhou S (2020) Exosomal long non-coding RNA MSTRG.292666.16 is associated with osimertinib (AZD9291) resistance in non-small cell lung cancer. *Aging (Albany NY)* 12:8001.
- Drula R, Braicu C, Harangus A, Nabavi SM, Trif M, Slaby O, Berindan-Neagoe I (2020) Critical function of circular RNAs in lung cancer. *Wiley Interdisciplinary Reviews: RNA* 11:e1592.
- Durendez-Saez E, Torres-Martinez S, Calabuig-Farinas S, Meri-Abad M, Ferrero-Gimeno M, Camps C (2021) Exosomal microRNAs in non-small cell lung cancer. *Translational Cancer Research* 10:3128.
- Fabbri M, Paone A, Calore F, Galli R, Gaudio E, Santhanam R, Nuovo GJ (2012) MicroRNAs bind to Toll-like receptors to induce prometastatic inflammatory response. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109:E2110-E2116.
- Fan Q, Yang L, Zhang X, Peng X, Wei S, Su D, Li H (2018) The emerging role of exosome-derived non-coding RNAs in cancer biology. *Cancer Letters* 414:107-115.
- Gao J, Ao YQ, Zhang LX, Deng J, Wang S, Wang HK, Ding JY (2022) Exosomal circZNF451 restrains anti-PD1 treatment in lung adenocarcinoma via polarizing macrophages by complexing with TRIM56 and FXR1. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research* 41:295.
- Gardiner C, Vizio DD, Sahoo S, Théry C, Witwer KW, Wauben M, Hill AF (2016) Techniques used for the isolation and characterization of extracellular vesicles: results of a worldwide survey. *Journal of Extracellular Vesicles* 5:32945.
- Geng S, Tu S, Bai Z, Geng Y (2022) Exosomal lncRNA LINC01356 derived from brain metastatic nonsmall-cell lung cancer cells remodels the blood-brain barrier. *Frontiers in Oncology* 12:825899.
- Gilyazova I, Gimalova G, Nizamova A, Galimova E, Ishbulatova E, Pavlov V, Khusnutdinova E (2023) Non-coding RNAs as key regulators in lung cancer. *International Journal of Molecular Sciences* 25:560.
- Greening DW, Gopal SK, Mathias RA, Liu L, Sheng J, Zhu HJ, Simpson RJ (2015) Emerging roles of exosomes during epithelial-mesenchymal transition and cancer progression. *Seminars in Cell & Developmental Biology*.
- Greening DW, Gopal SK, Xu R, Simpson RJ, Chen W (2015) Exosomes and their roles in immune regulation and cancer. *Seminars in Cell & Developmental Biology*.
- Grimolizzi F, Monaco F, Leoni F, Bracci M, Staffolani S, Bersaglieri C, Rubini C (2017) Exosomal miR-126 as a circulating biomarker in nonsmall-cell lung cancer regulating cancer progression. *Scientific Reports* 7:15277.
- Guo X, Gao C, Yang DH, Li S (2023) Exosomal circular RNAs: a chief culprit in cancer chemotherapy resistance. *Drug Resistance Updates* 67:100937.
- Ha M, Kim VN (2014) Regulation of microRNA biogenesis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 15:509-524.
- Hadjicharalambous MR, Lindsay MA (2019) Long non-coding RNAs and the innate immune response. *Non-coding RNA* 5:34.
- He X, Huang Y, Liu Y, Zhang X, Wang Q, Liu Y, Lei H (2023) Astrocyte-derived exosomal lncRNA 4933431K23Rik modulates microglial phenotype and

- improves post-traumatic recovery via SMAD7 regulation. *Molecular Therapy* 31:1313-1331.
- Hong W, Xue M, Jiang J, Zhang Y, Gao X (2020) Circular RNA circ-CPA4/let-7 miRNA/PD-L1 axis regulates cell growth, stemness, drug resistance and immune evasion in non-small cell lung cancer (NSCLC). *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research* 39:149.
- Houghton AM (2013) Mechanistic links between COPD and lung cancer. *Nature Reviews Cancer* 13:233-245.
- Hsu XR, Wu JE, Wu YY, Hsiao SY, Liang JL, Wu YJ, Yang PC (2023) Exosomal long noncoding RNA MLETA1 promotes tumor progression and metastasis by regulating the miR-186-5p/EGFR and miR-497-5p/IGF1R axes in non-small cell lung cancer. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research* 42:283.
- Hsu Y, Hung J, Chang W, Lin Y, Pan Y, Tsai P, Kuo P (2017) Hypoxic lung cancer-secreted exosomal miR-23a increased angiogenesis and vascular permeability by targeting prolyl hydroxylase and tight junction protein ZO-1. *Oncogene* 36:4929-4942.
- Hu C, Meiners S, Lukas C, Stathopoulos GT, Chen J (2020) Role of exosomal microRNAs in lung cancer biology and clinical applications. *Cell Proliferation* 53:e12828.
- Hussein MA, Valinezhad K, Adel E, Munirathinam G (2024) MALAT-1 is a key regulator of epithelial-mesenchymal transition in cancer: a potential therapeutic target for metastasis. *Cancers* 16:234.
- Jakobsen KR, Paulsen BS, Bæk R, Varming K, Sorensen BS, Jørgensen MM (2015) Exosomal proteins as potential diagnostic markers in advanced nonsmall cell lung carcinoma. *Journal of Extracellular Vesicles* 4:26659.
- Jeppesen DK, Fenix AM, Franklin JL, Higginbotham JN, Zhang Q, Zimmerman LJ, Evans R (2019) Reassessment of exosome composition. *Cell* 177:428-445.e418.
- Jin X, Chen Y, Chen H, Fei S, Chen D, Cai X, Zhao L (2017) Evaluation of tumor-derived exosomal miRNA as potential diagnostic biomarkers for early-stage non-small cell lung cancer using next-generation sequencing. *Clinical Cancer Research* 23:5311-5319.
- Jing C, Cao H, Qin X, Yu S, Wu J, Wang Z, Feng J (2018) Exosome mediated gefitinib resistance in lung cancer HCC827 cells via delivery of miR-21. *Oncology Letters* 15:9811-9817.
- Kahlert C, Kalluri R (2013) Exosomes in tumor microenvironment influence cancer progression and metastasis. *Journal of Molecular Medicine* 91:431-437.
- Kalluri R (2016) The biology and function of exosomes in cancer. *The Journal of Clinical Investigation* 126:1208-1215.
- Kang Y, You J, Gan Y, Chen Q, Huang C, Chen F, Chen L (2022) Serum and serum exosomal circRNAs hsa_circ_0001492, hsa_circ_0001439, and hsa_circ_0000896 as diagnostic biomarkers for lung adenocarcinoma. *Frontiers in Oncology* 12:912246.
- Kargl J, Busch SE, Yang GH, Kim KH, Hanke ML, Metz HE, McIntosh MW (2017) Neutrophils dominate the immune cell composition in non-small cell lung cancer. *Nature Communications* 8:14381.
- Kielbowski K, Ptaszyński K, Wojcik J, Wojtyś ME (2023) The role of selected non-coding RNAs in the biology of non-small cell lung cancer. *Advances in Medical Sciences* 68:121-137.
- Kim J, Kim TY, Lee MS, Mun JY, Ihm C, Kim SA (2016) Exosome cargo reflects TGF- β 1-mediated epithelial-to-mesenchymal transition (EMT) status in A549 human lung adenocarcinoma cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 478:643-648.
- Kuo WP, Tigges JC, Toxavidis V, Ghiran I (2017) Red blood cells: a source of extracellular vesicles. *Extracellular Vesicles: Methods and Protocols* 15-22.
- Lane RE, Korbie D, Anderson W, Vaidyanathan R, Trau M (2015) Analysis of exosome purification methods using a model liposome system and tunable-resistive pulse sensing. *Scientific Reports* 5:7639.
- Li C, Lv Y, Shao C, Chen C, Zhang T, Wei Y, Song Y (2019) Tumor-derived exosomal lncRNA GAS5 as a biomarker for early-stage non-small-cell lung cancer diagnosis. *Journal of Cellular Physiology* 234:20721-20727.
- Li J, Zhu T, Weng Y, Cheng F, Sun Q, Yang K, Ma H (2022) Exosomal circDNER enhances paclitaxel resistance and tumorigenicity of lung cancer via targeting miR-139-5p/ITGB8. *Thoracic Cancer* 13:1381-1390.
- Li P, Kaslan M, Lee SH, Yao J, Gao Z (2017) Progress in exosome isolation techniques. *Theranostics* 7:789.
- Li Q, Li B, Li Q, Wei S, He Z, Huang X, Li Z (2018) Exosomal miR-21-5p derived from gastric cancer promotes peritoneal metastasis via mesothelial-to-mesenchymal transition. *Cell Death & Disease* 9:854.
- Li X, Wu Y, Jin Y (2024) Exosomal lncRNAs and circRNAs in lung cancer: Emerging regulators and potential therapeutic targets. *Non-coding RNA Research* 9:1069-1079.
- Li Y, Yan B, He S (2023) Advances and challenges in the treatment of lung cancer. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 169:115891.
- Liu T, Han C, Fang P, Ma Z, Wang X, Chen H, Zhang E (2022) Cancer-associated fibroblast-specific lncRNA LINC01614 enhances glutamine uptake in lung adenocarcinoma. *Journal of Hematology & Oncology* 15:141.
- Liu Y, Luo F, Wang B, Li H, Xu Y, Liu X, Lu L (2016) STAT3-regulated exosomal miR-21 promotes angiogenesis and is involved in neoplastic processes of transformed human bronchial epithelial cells. *Cancer Letters* 370:125-135.
- Lu L, Fang S, Zhang Y, Jin L, Xu W, Liang Z (2021) Exosomes and exosomal circRNAs: the rising stars in the progression, diagnosis and prognosis of gastric cancer. *Cancer Management and Research* 13:8121-8129.

- Lv J, Li Q, Ma R, Wang Z, Yu Y, Liu H, Jiang S (2021) RETRACTED: Long noncoding RNA FGD5-AS1 knockdown decrease viability, migration, and invasion of non-small cell lung cancer (NSCLC) cells by regulating the microRNA-944/MACC1 axis. *Technology in Cancer Research & Treatment* 20:1533033821990090.
- Lv X, Lian Y, Liu Z, Xiao J, Zhang D, Yin X (2021) Exosomal long non-coding RNA LINC00662 promotes non-small cell lung cancer progression by miR-320d/E2F1 axis. *Aging (Albany NY)* 13:6010.
- Ma J, Qi G, Li L (2020) A novel serum exosomes-based biomarker hsa_circ_0002130 facilitates osimertinib resistance in non-small cell lung cancer by sponging miR-498. *OncoTargets and Therapy* 13:5293-5307.
- Mao G, Mu Z, Wu D (2021) Exosomal lncRNA FOXD3-AS1 upregulates ELAVL1 expression and activates PI3K/Akt pathway to enhance lung cancer cell proliferation, invasion, and 5-fluorouracil resistance. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica* 53:1484-1494.
- Masud MK, Na J, Younus M, Hossain MSA, Bando Y, Shiddiky MJA, Yamauchi Y (2019) Superparamagnetic nanoarchitectures for disease-specific biomarker detection. *Chemical Society Reviews* 48:5717-5751.
- McDonald MK, Tian Y, Qureshi RA, Gormley M, Ertel A, Gao R, Fortina P (2014) Functional significance of macrophage-derived exosomes in inflammation and pain. *Pain* 155:1527-1539.
- Ni J, Zhang X, Li J, Zheng Z, Zhang J, Zhao W, Liu L (2021) Tumour-derived exosomal lncRNA SOX2OT promotes bone metastasis of non-small cell lung cancer by targeting the miRNA-194-5p/RAC1 signalling axis in osteoclasts. *Cell Death & Disease* 12:662.
- Oeyen E, Van Mol K, Baggerman G, Willems H, Boonen K, Rolfo C, Cho WC (2018) Ultrafiltration and size exclusion chromatography combined with asymmetrical-flow field-flow fractionation for the isolation and characterisation of extracellular vesicles from urine. *Journal of Extracellular Vesicles* 7:1490143.
- Oksvold MP, Neurauter A, Pedersen KW (2014) Magnetic bead-based isolation of exosomes. In: *RNA Interference: Challenges and Therapeutic Opportunities*. Springer, pp 465-481.
- Pan R, Zhou H (2020) Exosomal transfer of lncRNA H19 promotes erlotinib resistance in non-small cell lung cancer via miR-615-3p/ATG7 axis. *Cancer Management and Research* 12:4283-4297.
- Peng X, Zhao L, Yao L, Dong J, Wu W, Luo T (2023) Exosomal ERBB2IP contributes to tumor growth via elevating PSAT1 expression in non-small cell lung carcinoma. *Thoracic Cancer* 14:1812-1823.
- Qin X, Yu S, Xu X, Shen B, Feng J (2017) Comparative analysis of microRNA expression profiles between A549, A549/DDP and their respective exosomes. *Oncotarget* 8:42125.
- Qin X, Yu S, Zhou L, Shi M, Hu Y, Xu X, Feng J (2017) Cisplatin-resistant lung cancer cell-derived exosomes increase cisplatin resistance of recipient cells in exosomal miR-100-5p-dependent manner. *International Journal of Nanomedicine* 12:3721-3733.
- Rana S, Malinowska K, Zöller M (2013) Exosomal tumor microRNA modulates premetastatic organ cells. *Neoplasia* 15:281-IN231.
- Rapisuwon S, Vietsch EE, Wellstein A (2016) Circulating biomarkers to monitor cancer progression and treatment. *Computational and Structural Biotechnology Journal* 14:211-222.
- Rolfo C, Chacartegui J, Giallombardo M, Alessandro R, Peeters M (2016) 71P Exosomes isolated in plasma of non-small cell lung cancer patients contain microRNA related to the EGFR pathway: Proof of concept. *Journal of Thoracic Oncology* 11:S85.
- Rotow J, Bivona TG (2017) Understanding and targeting resistance mechanisms in NSCLC. *Nature Reviews Cancer* 17:637-658.
- Salido-Guadarrama I, Romero-Cordoba S, Peralta-Zaragoza O, Hidalgo-Miranda A, Rodriguez-Dorantes M (2014) MicroRNAs transported by exosomes in body fluids as mediators of intercellular communication in cancer. *OncoTargets and Therapy* 7:1327-1338.
- Santos JM, Peixoto da Silva S, Costa NR, Gil da Costa RM, Medeiros R (2018) The role of microRNAs in the metastatic process of high-risk HPV-induced cancers. *Cancers* 10:493.
- Shan X, Zhang H, Zhang L, Zhou X, Wang T, Zhang J, Liu P (2018) Identification of four plasma microRNAs as potential biomarkers in the diagnosis of male lung squamous cell carcinoma patients in China. *Cancer Medicine* 7:2370-2381.
- Shao N, Song L, Sun X (2021) Exosomal circ_PIP5K1A regulates the progression of non-small cell lung cancer and cisplatin sensitivity by miR-101/ABCC1 axis. *Molecular and Cellular Biochemistry* 476:2253-2267.
- Smolle MA, Prinz F, Calin GA, Pichler M (2019) Current concepts of non-coding RNA regulation of immune checkpoints in cancer. *Molecular Aspects of Medicine* 70:117-126.
- Sonea L, Buse M, Gulei D, Onaciu A, Simon I, Braicu C, Berindan-Neagoe I (2018) Decoding the emerging patterns exhibited in non-coding RNAs characteristic of lung cancer with regard to their clinical significance. *Current Genomics* 19:258-278.
- Song L, Qian G, Huang J, Chen T, Yang Y (2021) AZD9291-resistant non-small cell lung cancer cell-derived exosomal lnc-MZT2A-5:1 induces the activation of fibroblasts. *Annals of Translational Medicine* 9:1593.
- Sun Y, Hao G, Zhuang M, Lv H, Liu C, Su K (2022) MEG3 lncRNA from exosomes released from cancer-associated fibroblasts enhances cisplatin chemoresistance in SCLC via a miR-15a-5p/CCNE1 axis. *Yonsei Medical Journal* 63:229.

- Sun Z, Shi K, Yang S, Liu J, Zhou Q, Wang G, Yuan W (2018) Effect of exosomal miRNA on cancer biology and clinical applications. *Molecular Cancer* 17:147.
- Sun Z, Yang S, Zhou Q, Wang G, Song J, Li Z, Chang Y (2018) Emerging role of exosome-derived long non-coding RNAs in tumor microenvironment. *Molecular Cancer* 17:82.
- Tang YT, Huang YY, Li JH, Qin SH, Xu Y, An TX, Zheng L (2018) Alterations in exosomal miRNA profile upon epithelial-mesenchymal transition in human lung cancer cell lines. *BMC Genomics* 19:802.
- Tang Y, Cui Y, Li Z, Jiao Z, Zhang Y, He Y, Zhou X (2016) Radiation-induced miR-208a increases the proliferation and radioresistance by targeting p21 in human lung cancer cells. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research* 35:7.
- Tian H, Tang L, Yang Z, Xiang Y, Min Q, Yin M, Shen J (2024) Current understanding of functional peptides encoded by lncRNA in cancer. *Cancer Cell International* 24:252.
- Valencia K, Luis-Ravelo D, Bovy N, Antón I, Martínez-Canarias S, Zanduetta C, Rebmann V (2014) miRNA cargo within exosome-like vesicle transfer influences metastatic bone colonization. *Molecular Oncology* 8:689-703.
- Verma HK, Ratre YK, Mazzone P, Laurino S, Bhaskar L (2020) MicroRNA facilitated chemoresistance in gastric cancer: A novel biomarkers and potential therapeutics. *Alexandria Journal of Medicine* 56:81-92.
- Wang H, Tang Z, Duan J, Zhou C, Xu K, Mu H (2022) Cancer-released exosomal circular RNA circ_0008717 promotes cell tumorigenicity through microRNA-1287-5p/P21-activated kinase 2 (PAK2) axis in non-small cell lung cancer. *Bioengineered* 13:8937-8949.
- Wang R, Xu Y, Tong L, Zhang X, Zhang S (2024) Recent progress of exosomal lncRNA/circRNA-miRNA-mRNA axis in lung cancer: implication for clinical application. *Frontiers in Molecular Biosciences* 11:1417306.
- Wang Y, Cao S, Li J, Zhang Y, Ling X, Zhang L, Zhong H (2023) The predictive value of plasma exosomal lncRNAs/mRNAs in NSCLC patients receiving immunotherapy. *Advances in Medical Sciences* 68:86-93.
- Wang Y, Cui Y, Li X, Jin SH, Wang H, Gaip US, Zhou JG (2025) CircRNAs: functions and emerging roles in cancer and immunotherapy. *BMC Medicine* 23:477.
- Wei F, Ma C, Zhou T, Dong X, Luo Q, Geng L, Li N (2017) Exosomes derived from gemcitabine-resistant cells transfer malignant phenotypic traits via delivery of miRNA-222-3p. *Molecular Cancer* 16:132.
- Wei SL, Ye JJ, Sun L, Hu L, Wei YY, Zhang DW, Fei GH (2023) Exosome-derived circKIF20B suppresses gefitinib resistance and cell proliferation in non-small cell lung cancer. *Cancer Cell International* 23:129.
- Wu D, Deng S, Li L, Liu T, Zhang T, Li J, Xu Y (2021) TGF- β 1-mediated exosomal lnc-MMP2-2 increases blood-brain barrier permeability via the miRNA-1207-5p/EPB41L5 axis to promote non-small cell lung cancer brain metastasis. *Cell Death & Disease* 12:721.
- Wu H, Zhou J, Mei S, Wu D, Mu Z, Chen B, Liu J (2017) Circulating exosomal microRNA-96 promotes cell proliferation, migration and drug resistance by targeting LMO7. *Journal of Cellular and Molecular Medicine* 21:1228-1236.
- Wu J, Shen Z (2020) Exosomal miRNAs as biomarkers for diagnostic and prognostic in lung cancer. *Cancer Medicine* 9:6909-6922.
- Wu T, Dong Y, Yang X, Mo L, You Y (2024) Crosstalk between lncRNAs and Wnt/ β -catenin signaling pathways in lung cancers: from cancer progression to therapeutic response. *Non-Coding RNA Research* 9:667-677.
- Xie H, Yao J, Wang Y, Ni B (2022) Exosome-transmitted circVMP1 facilitates the progression and cisplatin resistance of non-small cell lung cancer by targeting miR-524-5p-METTL3/SOX2 axis. *Drug Delivery* 29:1257-1271.
- Xie S, Wu Z, Qi Y, Wu B, Zhu X (2021) The metastasizing mechanisms of lung cancer: Recent advances and therapeutic challenges. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 138:111450.
- Xie Y, Dang W, Zhang S, Yue W, Yang L, Zhai X, Lu J (2019) The role of exosomal noncoding RNAs in cancer. *Molecular Cancer* 18:37.
- Xu J, Wang H, Shi B, Li N, Xu G, Yan X, Xu L (2023) Exosomal MFI2-AS1 sponge miR-107 promotes non-small cell lung cancer progression through NFAT5. *Cancer Cell International* 23:51.
- Xu K, Zhang C, Du T, Gabriel ANA, Wang X, Li X, Zhang Y (2021) Progress of exosomes in the diagnosis and treatment of lung cancer. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 134:111111.
- Xu R, Rai A, Chen M, Suwakulsiri W, Greening DW, Simpson RJ (2018) Extracellular vesicles in cancer-implications for future improvements in cancer care. *Nature Reviews Clinical Oncology* 15:617-638.
- Xu Z, Liu X, Wang H, Li J, Dai L, Li J, Dong C (2018) Lung adenocarcinoma cell-derived exosomal miR-21 facilitates osteoclastogenesis. *Gene* 666:116-122.
- Yin Y, Cai X, Chen X, Liang H, Zhang Y, Li J, Yokoyama S (2014) Tumor-secreted miR-214 induces regulatory T cells: a major link between immune evasion and tumor growth. *Cell Research* 24:1164-1180.
- Yu S, Cao H, Shen B, Feng J (2015) Tumor-derived exosomes in cancer progression and treatment failure. *Oncotarget* 6:37151.
- Yu Z, Tang H, Chen S, Xie Y, Shi L, Xia S, Chen D (2023) Exosomal LOC85009 inhibits docetaxel resistance in lung adenocarcinoma through regulating

ATG5-induced autophagy. Drug Resistance Updates 67:100915.

Yuwen DL, Sheng BB, Liu J, Wenyu W, Shu YQ (2017) MiR-146a-5p level in serum exosomes predicts therapeutic effect of cisplatin in non-small cell lung cancer. European Review for Medical & Pharmacological Sciences 21.

Zang X, Gu J, Zhang J, Shi H, Hou S, Xu X, Qian H (2020) Exosome-transmitted lncRNA UFC1 promotes non-small-cell lung cancer progression by EZH2-mediated epigenetic silencing of PTEN expression. Cell Death & Disease 11:215.

Zhang B, Fang C, Deng D, Xia L (2018) Research progress on common adverse events caused by targeted therapy for colorectal cancer. Oncology Letters 16:27-33.

Zhang C, Xu L, Deng G, Ding Y, Bi K, Jin H, Wang Z (2020) Exosomal HOTAIR promotes proliferation, migration and invasion of lung cancer by sponging miR-203. Science China Life Sciences 63:1265-1268.

Zhang C, Yang J, Zhu Z, Qin J, Yang L, Zhao X, Wang F (2023) Exosomal lncRNA HOTAIR promotes osteoclast differentiation by targeting TGF- β /PTHrP/RANKL pathway. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology 132:242-252.

Zhang K, Chen J, Li C, Yuan Y, Fang S, Liu W, Chen F (2022) Exosome-mediated transfer of SNHG7 enhances docetaxel resistance in lung adenocarcinoma. Cancer Letters 526:142-154.

Zhang L, Zhang S, Yao J, Lowery FJ, Zhang Q, Huang WC, Zhang C (2015) Microenvironment-induced PTEN loss by exosomal microRNA primes brain metastasis outgrowth. Nature 527:100-104.

Zhang N, Nan A, Chen L, Li X, Jia Y, Qiu M, Zhang H (2020) Circular RNA circSATB2 promotes progression of non-small cell lung cancer cells. Molecular Cancer 19:101.

Zhou X, Wen W, Shan X, Zhu W, Xu J, Guo R, Chen Y (2016) A six-microRNA panel in plasma was identified as a potential biomarker for lung adenocarcinoma diagnosis. Oncotarget 8:6513.

Zhou ZF, Wei Z, Yao JC, Liu SY, Wang F, Wang Z, Zheng QF (2020) CircRNA_102179 promotes the

proliferation, migration and invasion in non-small cell lung cancer cells by regulating miR-330-5p/HMGB3 axis. Pathology-Research and Practice 216:153144.

Zhuang G, Wu X, Jiang Z, Kasman I, Yao J, Guan Y, Sampath D (2012) Tumour-secreted miR-9 promotes endothelial cell migration and angiogenesis by activating the JAK-STAT pathway. The EMBO Journal 31:3513-3523.