

PRILOŽNOSTI, RAZVOJ IN UPORABA UMETNE INTELIGENCE V IMUNOTERAPIJI RAKA

Karin Kunstelj^{1,2}, Neja Brumec^{1,3}, Luka Irenej Pečan⁴, Anja Tanšek⁵, Minja Zorc⁵,
Marko Jeran¹

¹ Odsek za anorgansko kemijo in tehnologijo, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, Slovenija

² Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

³ Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

⁴ Department of Life Sciences, University of Trieste, Trieste, Italy

⁵ Oddelek za zootehniko, Katedra za genetiko, animalno biotehnologijo in imunologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Domžale, Slovenija

Elektronski naslov: marko.jeran@ijs.si

Umetna inteligenca (UI) v onkologiji ne predstavlja zamenjavo dosedanjih pristopov zdravljenja raka, temveč omogoča njihovo nadgradnjo ter odpira poti k dodatnim možnostim in bolj prilagojenim terapevtskim rešitvam. UI lahko obdeluje in integrira multimodalne podatkovne sklope kot so genomske in transkriptomski podatki, radiomska analiza, sekvenciranje posameznih celic in klinični zapisi.^{1,2}

Napredek na področju UI je pokazal njen potencial v številnih znanstvenih in tehnoloških disciplinah. Z uporabo razločljivih modelov UI so raziskovalci odkrili nove mehanizme odpornosti. Algoritmi, ki uporabljajo podatke sekvenciranja transkriptoma posamezne celice, so podali cenovno dostopne in neinvazivne biomarkerje, ki bolj zanesljivo napovedujejo izid zdravljenja kot tradicionalne histopatološke metode. Uporaba Bayesovih mrež omogoča sprotne prilagajanje protokolov terapije CAR-T (T-limfociti s himernim antigenimskim receptorjem) z namenom izboljšanja dolgoročne remisije prek zgodnjega zaznavanja ponovitve simptomov.^{1,2}

Uporaba radiomike in slikanja s pozitronsko emisijsko tomografijo (PET) v kombinaciji z analizo transkriptomskih podatkov, podprto z umetno inteligenco, je pokazala visoko obetavnost pri napovedovanju odziva na imunoterapijo z zaviralci kontrolnih točk.³ Kvantne simulacije omogočajo in silico preizkušanje kombinacij med imunskim sistemom in tumorjem, kar prinaša hitrejša rezultate in varno sodelovanje med institucijami brez ogrožanja zasebnosti pacientov. Kvantne simulacije omogočajo in silico preizkušanje kombinacij med imunskim sistemom in tumorjem, kar prinaša hitrejša rezultate in varno sodelovanje med institucijami brez ogrožanja zasebnosti pacientov.⁴

Iskanje optimalnih kombinacij imunoterapij in napovedovanje neželenih učinkov se poenostavlja z uporabo generativne UI, okrepljenega učenja in nevronske mreže. Ti pristopi prispevajo k razvoju naprednih računalniških metod za odkrivanje zdravil in optimizacijo terapij. Cilj uporabe teh orodij ni zgolj pospeševanje razvoja, temveč povečanje verjetnosti kliničnega uspeha z identifikacijo sinergijskih mehanizmov in zmanjšanjem stranskih učinkov.^{3,5,6} Na podlagi podatkov o sestavi tumorskega mikrookolja so modeli UI sposobni napovedati vzorce infiltracije imunskih celic, imunogenost tumorja ter občutljivost na blokado kontrolnih točk.^{4,6,7}

Uporaba UI v imunoterapiji raka omogoča naprednejše napovedovanje odzivov bolnikov, vendar odpira vprašanja zasebnosti in regulative. V skladu s splošno uredbo o varstvu podatkov je potrebno za podatke iz genomike, slikanja in kliničnih evidenc zagotoviti anonimizacijo, varno hrambo in privolitev bolnikov, pri čemer ostaja tveganje ponovne identifikacije.^{8,9,10} Pri uvedbi UI je potrebno upoštevati tudi etične vidike. Slednji vključujejo pristranskost algoritmov, pomanjkanje preglednosti ter odsotnost enotnih norm in validacijskih protokolov.^{8,9,10,11} Poleg opisanega se tehnologija sama sooča z omejitvami, kot so heterogenost podatkov, pristranski učni nabori, omejena zastopanost

p13

populacij in težavna razločljivost t. i. »črnih skrinjic«. Možne rešitve vključujejo standardizacijo zbiranja podatkov, razvoj razločljivih metod (npr. SHAP, modeli pozornosti) ter prilagodljive oblike kliničnih preskušanj. Kljub navedenim omejitvam ostaja UI perspektiven dopolnilni pristop, ki lahko postopno izboljša zanesljivost in učinkovitost imunoterapije raka.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskav programa (P1-0045, P4-0220) Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

Literatura

1. Olawade DB, et al. Integrating AI into cancer immunotherapy – A narrative review of current applications and future directions. *Diseases*. 2025;13(1):24.
2. Derraz B, et al. New regulatory thinking is needed for AI-based personalised drug and cell therapies in precision oncology. *Npj Precis Oncol*. 2024;8(1):23.
3. McGale JP, et al. Integrating artificial intelligence and PET imaging for drug discovery: A paradigm shift in immunotherapy. *Pharmaceuticals*. 2024;17(2):210.
4. Gui Y, He X, Yu J, Jing J. Artificial intelligence-assisted transcriptomic analysis to advance cancer immunotherapy. *J Clin Med*. 2023;12(4):1279.
5. Li T, et al. Artificial intelligence in cancer immunotherapy: Applications in neoantigen recognition, antibody design and immunotherapy response prediction. *Semin Cancer Biol*. 2023;91:50–69.
6. Prelaj A, et al. Artificial intelligence for predictive biomarker discovery in immuno-oncology: A systematic review. *Ann Oncol*. 2024;35(1):29–65.
7. Garg P, et al. Artificial intelligence-driven computational approaches in the development of anticancer drugs. *Cancers*. 2024;16(22):3884.
8. Kumar A, et al. Personalized cancer vaccine design using AI-powered technologies. *Front Immunol*. 2024;15:1357217.
9. Olawade D, et al. Integrating AI into cancer immunotherapy—A narrative review of current applications and future directions. *Diseases*. 2025;13(1):24.
10. Prelaj A, et al. Artificial intelligence for predictive biomarker discovery in immuno-oncology: a systematic review. *Ann Oncol*. 2023;35(1):29–65.
11. Gao Q, et al. The artificial intelligence and machine learning in lung cancer immunotherapy. *J Hematol Oncol*. 2023;16:55.