

基于多组学联合分析及机器学习识别低温症药物靶点及候选药物

冉姝¹ 彭运哲¹ 刘宝林²

¹ 健康科学与工程学院，上海理工大学

² 能源与动力工程学院，上海理工大学

【Multi-Omics analysis and machine learning Identifies therapeutic targets for hypothermia】

背景：

低温症（Hypothermia）是人体核心温度（CBT）低于 35 摄氏度（95 华氏度）。低于这个温度，身体散失的热量多于产生的热量。轻度低温症体温为 32 至 35 摄氏度，中度低温症体温为 28 至 32 摄氏度，重度低温症体温为低于 28 摄氏度。低温症多由于意外（寒冷暴露、医疗干预或创伤）和治疗（通过特定的降温措施来进行治疗）引起。低体温引发包括炎症，酸中毒，凝血障碍和低钙血症等并发症反馈循环，增加死亡风险。同时，温度影响基因的转录和表达。正常体温下，SMYD5 通过 H3K36me3 组蛋白修饰抑制 SP1 基因。在轻度低温条件下，SMYD5 通过蛋白酶体降解途径被降解，由 SMYD5 引起的抑制作用也被解除[1]。轻度低温也可促进后期神经前体细胞中再生相关基因包括 Ncam1, Itgb1 和 Cdh2 的表达[2]。中度低温可导致急性单核细胞白血病细胞冷休克基因 CIRBP 和 RBM3 等 mRNA 表达水平下降[3]。重度低温可导致大脑皮层神经细胞中与铁死亡相关的基因（如 PPARG、SCD、ADIPOQ、SAT1、EGR1 和 HMOX1）发生显著变化。这些变化会导致铁离子积累、脂质过氧化以及铁死亡相关蛋白的显著表达[4]。然而，在接受低温治疗后的围产期窒息患儿的淋巴细胞中与 Alzheimer's 病相关 amyloid protein precursor 和 β -secretase 等基因表达没有变化。可能这些基因可作为大脑在窒息后出现的进行性病理变化的生物标志物，但是这些变化不受低温的影响[5]。目前低温症相关基因及有效药物机制还没有研究清楚。本研究旨在通过整合多种公共数据集，挖掘低温症潜在治疗靶点及药物，为低温症有效治疗提供理论支持。

方法：

通过整合药物基因组数据、人类血液、骨骼肌、脂肪及心脏组织的 cis-eQTL/cis-pQTL 数据，结合低温症全基因组关联研究（GWAS）汇总数据，分析与低温症相关的潜在药物靶基

因。通过敏感性分析和贝叶斯共定位验证结果，并利用机器学习随机森林算法和差异分析等方法进一步筛选关键基因，结合现有数据评估靶基因的成药性。

结果：

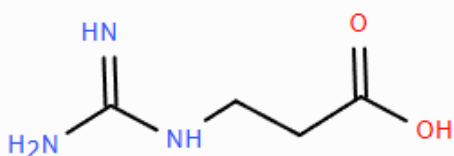
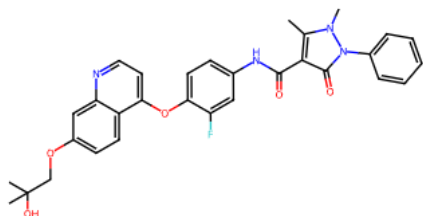
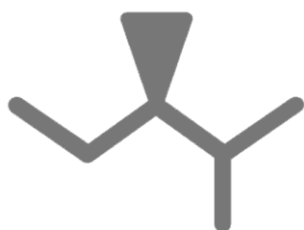
从 DGIdb 数据库和已有研究中获得了 2532 个已知的成药基因，其中血液表达数量性状座位 (eqtl) 和蛋白质数量性状座位 (pqt1) 分别有 870,655snp 和 1,535 基因，11,4281snp 和 1,045 基因；脂肪、肌肉和心脏共有 2,379snp 和 1,196 基因。通过分析发现 4 个与低温症存在潜在因果关联的候选基因，分别为 COL18A1、SLC1A7、ADIPOQ 和 MERTK。这些基因均通过逆方差加权法筛选得到，并经贝叶斯共定位验证 (PPH4 > 90%)。其中：COL18A1 基因表达升高与低温症风险增加相关 (beta: 0.0046, 95% CI: 0.0003-0.0090, $P = 3.8 \times 10^{-2}$, OR: 1.0047, 95% CI: 1.0003-1.0091)；SLC1A7 基因表达升高与低温症风险降低相关 (beta: -0.99, 95% CI: -1.51--0.47, $P = 1.9 \times 10^{-4}$, OR: 0.37, 95% CI: 0.22-0.62)；ADIPOQ 基因表达升高与低温症风险增加相关 (beta: 0.52, 95% CI: 0.094-0.94, $P = 1.6 \times 10^{-2}$, OR: 1.68, 95% CI: 1.10-2.56)；MERTK 基因表达升高与低温症风险降低相关 (beta: -0.53, 95% CI: -0.94--0.11, $P = 1.4 \times 10^{-2}$, OR: 0.59, 95% CI: 0.39-0.90)。进一步经随机森林算法验证成功共同的关键基因 ADIPOQ，该基因编码脂联素蛋白。低温环境降低脂联素分泌，促进解偶联蛋白 1 (Uncoupling Protein 1, UCP1) 分泌增加，该蛋白可以将用于生产 ATP 的能量转变成热能释放，达到非颤抖性生热的效果[6]。此外差异分析结果显示 SLC1A3, SLC04A1 可能是低温症的致病基因，与 SLC1A7 同为溶质载体超家族成员 (solute carrier family 1)。针对上述基因药物重定位分析显示，宁格替尼 (ningetinib) 可能通过抑制受体酪氨酸激酶 MERTK、奥克纤溶酶 (ocriplasmin) 可能通过降解胶原蛋白 COL18A1，发挥低温症治疗潜力。

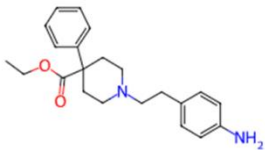
结论：

本研究提示 COL18A1、SLC1A7、ADIPOQ 和 MERTK 为低温症的治疗靶点，宁格替尼和奥克纤溶酶在低温症治疗中的有效性仍需进一步验证。本研究成果为临床治疗低温症提供新的遗传学思路和理论基础。

关键字：低温;治疗靶点;基因关联;药物再利用;ADIPOQ

Druggable gene	Molecule type	Compounds	Action type	Clinical development activities	Druggable gene molecular function
COL18A1	Protein	OCRIPLASMIN	Collagen hydrolytic enzyme	Intravenous injection of Ocriplasmin for the treatment of CRVO (central retinal vein occlusion) NCT02747030 For the treatment of vitreomacular traction NCT02035748	extracellular matrix structural constituent
MerTK	Small molecule	NINGETINIB	Proto-oncogene tyrosine-protein kinase MER inhibitor	For the treatment of advanced solid tumors NCT04577703 For the treatment of non-small cell lung cancer NCT03758287 For the treatment of advanced non-small cell lung cancer NCT04992858	ATP binding / receptor tyrosine kinase activity / protein binding
SLC1A7	Small molecule	OMPENACLID	NA	Combination with FOLFIRI plus bevacizumab for the treatment of advanced/metastatic colorectal cancer NCT05983367 Study of combination therapy for advanced colorectal cancer with gastrointestinal	glutamate transmembrane transporter activity / amino acid transmembrane transporter activity



tumor mutations					
NCT03597581					
ADIPOQ	Small molecule	ANILERIDINE	Kappa opioid receptor agonist	NA	hormone activity / cytokine activity / receptor binding
					

References

[1] Rafnsdottir S, Jang K, Halldorsdottir ST, Vinod M, Tomasdottir A, Möller K, et al. SMYD5 is a regulator of the mild hypothermia response. Cell reports. 2024;43(8).

[2] Mitrečić LD, Park EE, El-Hajj A, Mitrečić D. Mild hypothermia enhances regenerative gene expression in late-stage neural precursors. Medicine International. 2025;5(5):53.

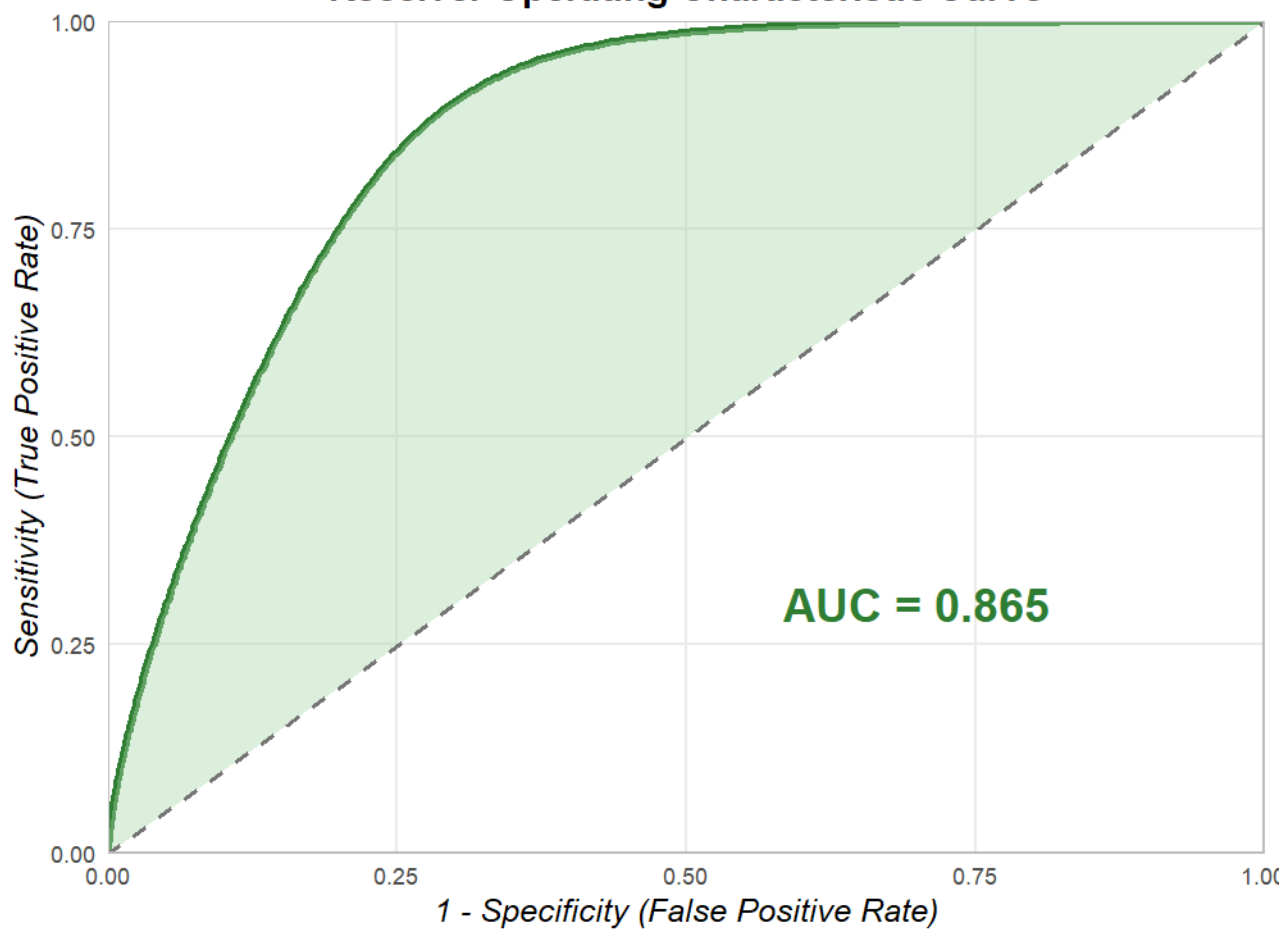
[3] Sonna LA, Kuhlmeier MM, Carter HC, Hasday JD, Lilly CM, Fairchild KD. Effect of moderate hypothermia on gene expression by THP-1 cells: a DNA microarray study. Physiological genomics. 2006;26(1):91-8.

[4] Lu C-L, Sha J-J, Ma R-F, Dong X-T, Su X-R, Cong B, et al. Severe hypothermia induces ferroptosis in cerebral cortical nerve cells. International Journal of Molecular Sciences. 2024;25(15):8086.

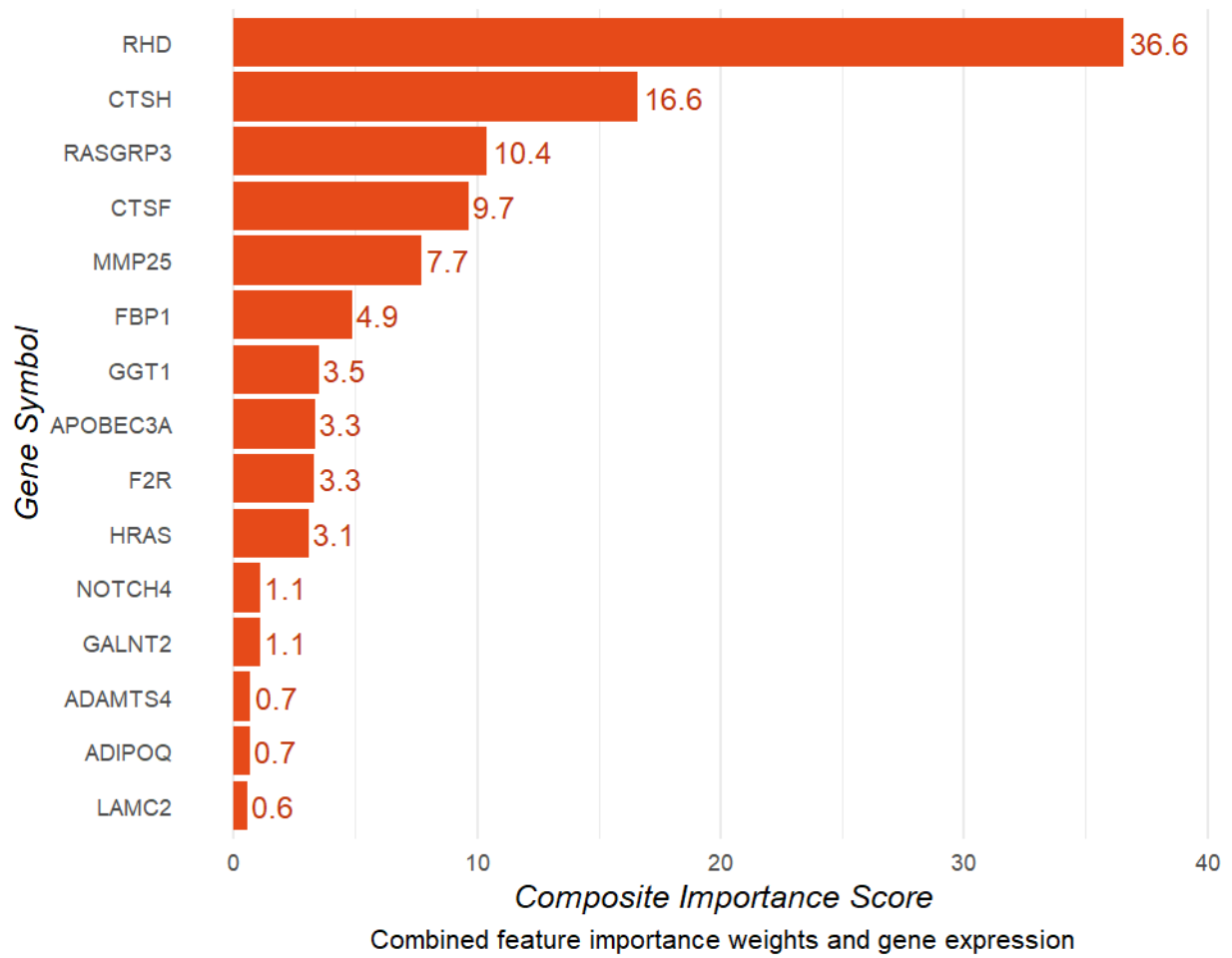
[5] Tarkowska A, Furmaga-Jabłońska W, Bogucki J, Kocki J, Pluta R. Hypothermia after perinatal asphyxia does not affect genes responsible for amyloid production in neonatal peripheral lymphocytes. Journal of Clinical Medicine. 2022;11(12):3263.

[6] Dong M, Yang X, Lim S, Cao Z, Honek J, Lu H, et al. Cold exposure promotes atherosclerotic plaque growth and instability via UCP1-dependent lipolysis. Cell metabolism. 2013;18(1):118-29.

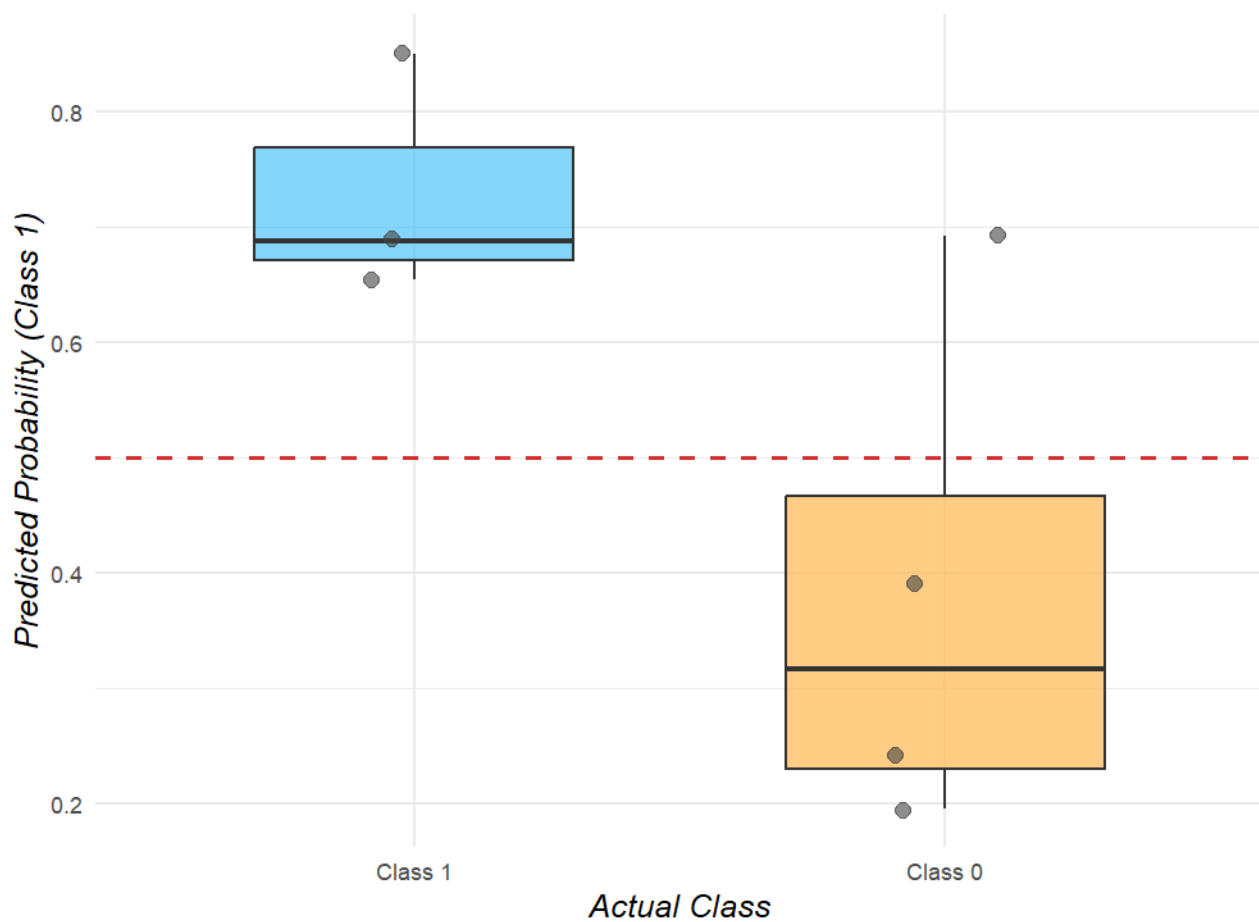
Receiver Operating Characteristic Curve



Top 15 Genes Associated with Hypothermia

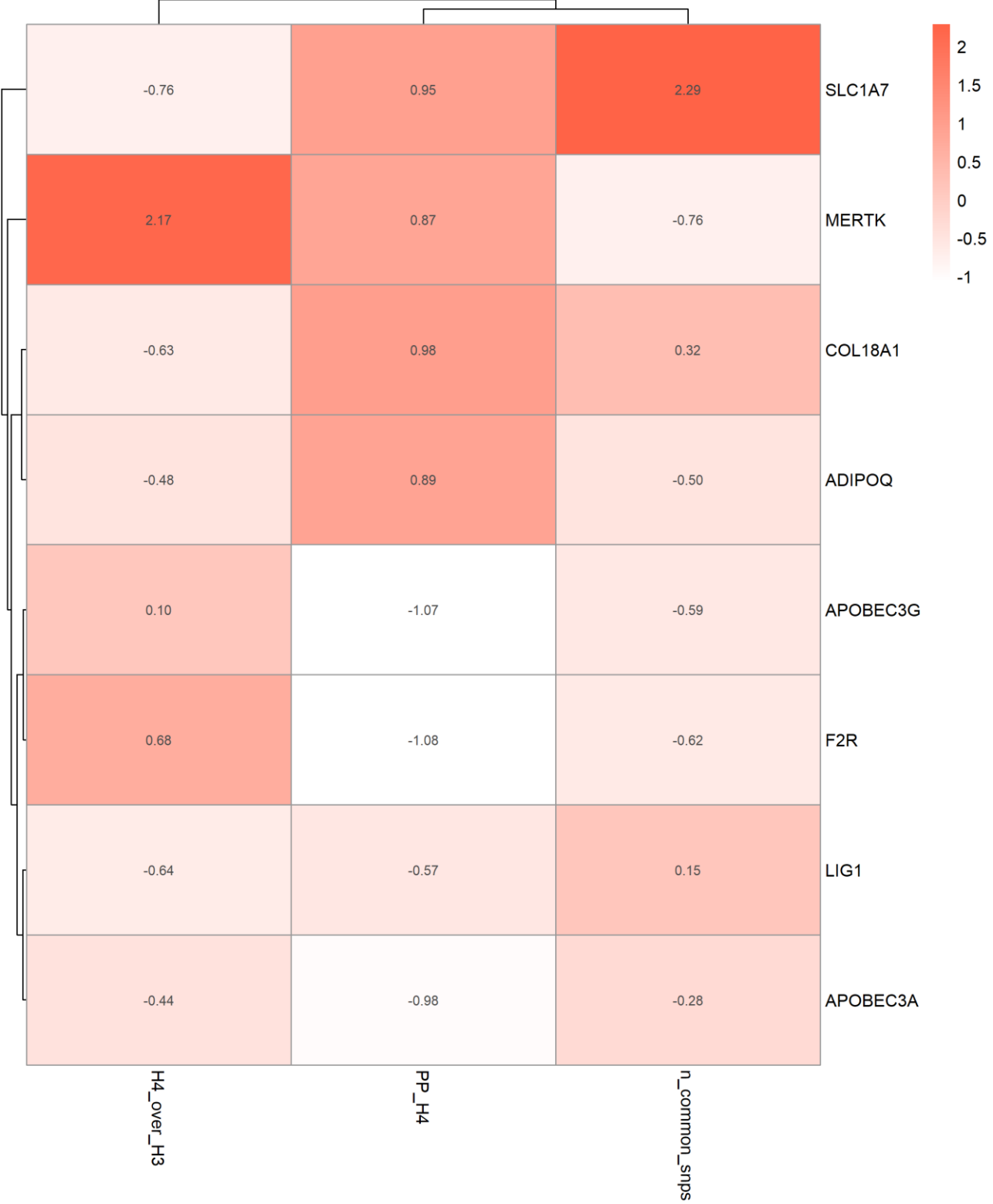


Distribution of Prediction Probabilities

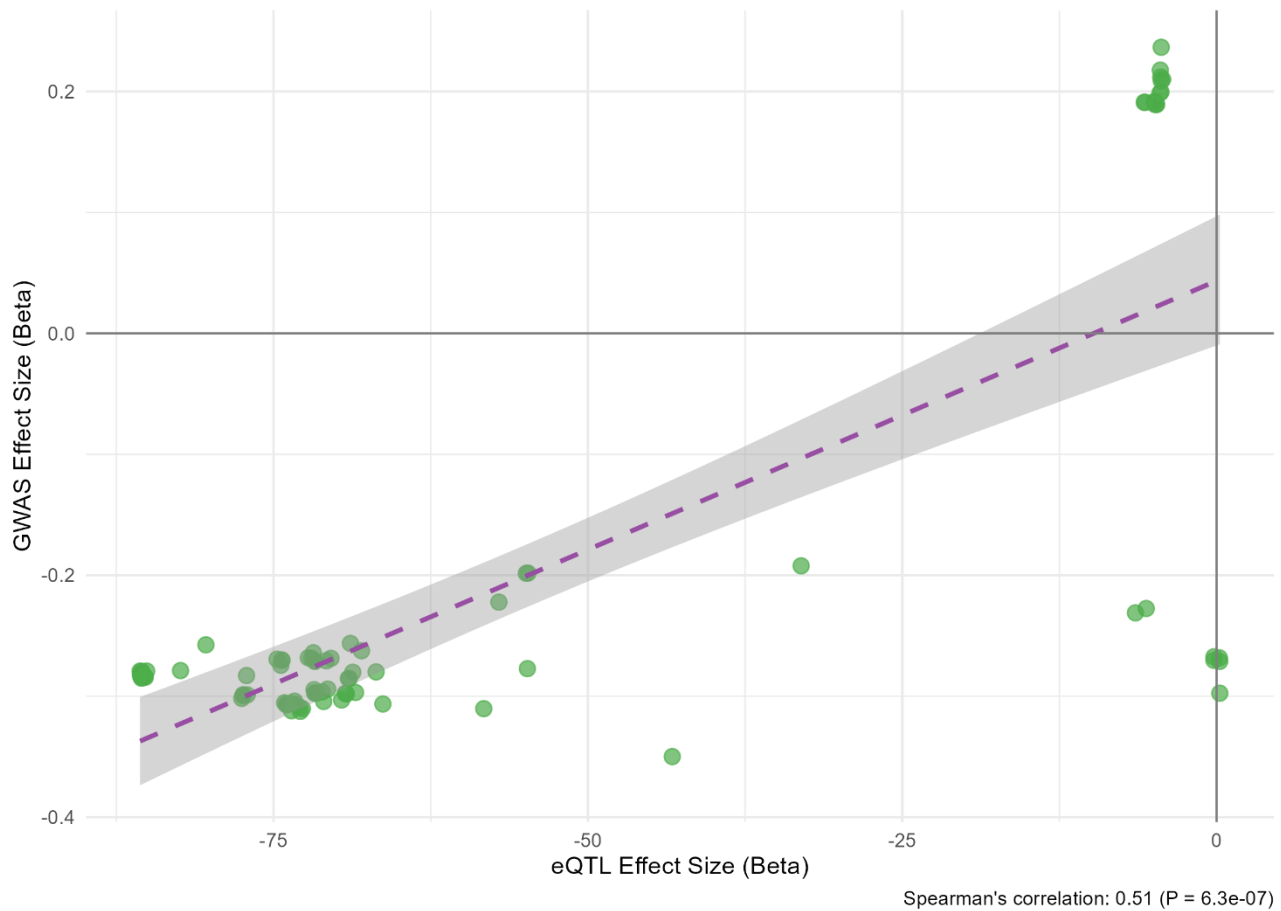


Dashed line indicates classification threshold (0.5)

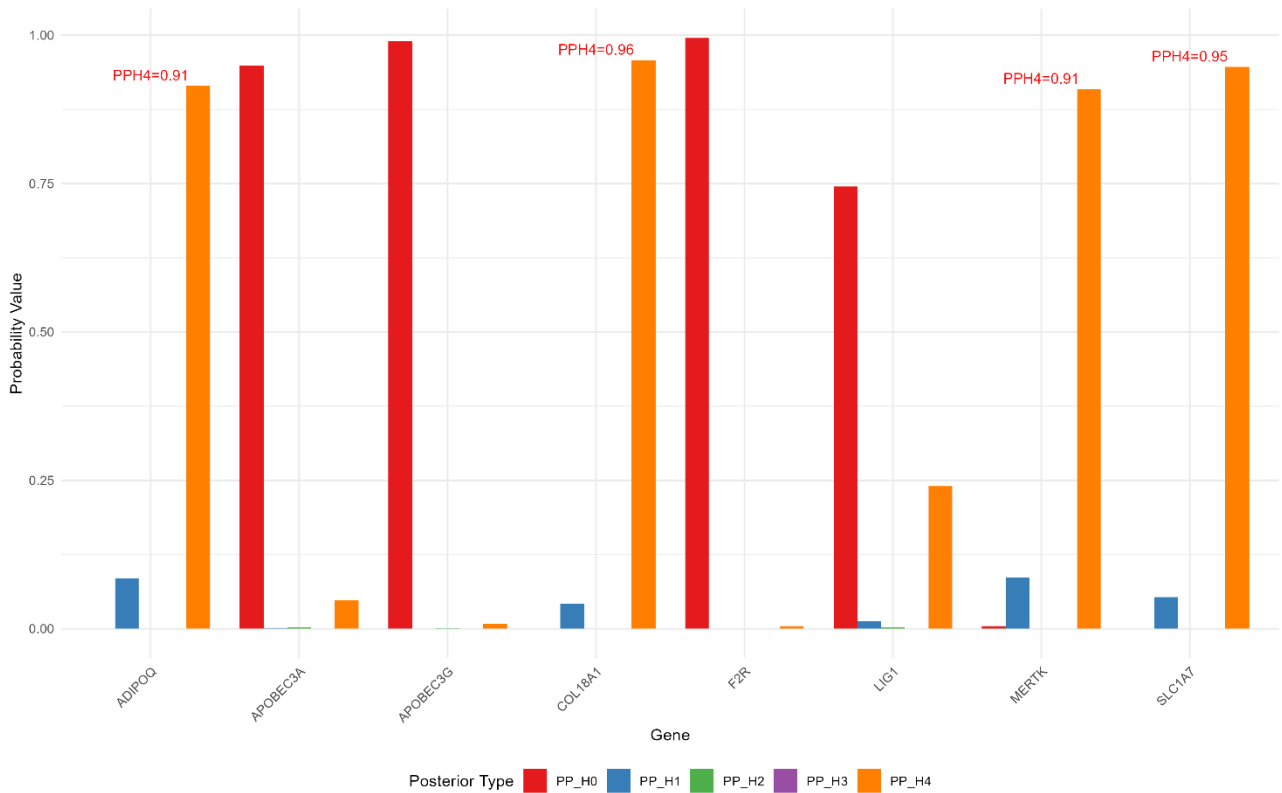
Key Metrics of Top 10 Genes Colocalization



Correlation of Effect Sizes (eQTL vs GWAS) for COL18A1



Distribution of Colocalization Posterior Probabilities



Colocalization of GWAS and eQTL Signals in COL18A1 Region

