

红景天在防治高原病中的作用机制和应用研究进展

代雪梅, 何亚聪, 王 飞*, 王振兴*

成都中医药大学附属医院, 四川 成都 610075

摘 要: 高原病是因高原低氧低压、寒冷干燥、强紫外线等特殊环境因素引发的高原相关疾病, 其发病机制复杂, 且多与气虚、血瘀相关。红景天 *Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma* 作为著名的中药材, 其活性成分多样, 包括苯乙醇苷类、黄酮类、苯丙素类、挥发油类、有机酸类及其他活性成分, 具有益气活血、通脉平喘的功效, 在防治高原病中展现出多重生物学效应。现代药理学研究证实红景天及其有效成分在抗炎、抗氧化应激、抗疲劳、调控程序性细胞死亡、改善糖脂代谢和肠道菌群调节等方面对高原病发挥防治作用。对近年来红景天及其有效成分对高原病防治的作用机制与应用进行综述, 为红景天在高原病的临床应用研究提供参考依据。

关键词: 红景天; 高原病; 红景天药对; 红景天苷; 山柰酚; 抗炎; 抗氧化应激; 抗疲劳; 改善糖脂代谢

中图分类号: R283 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)16-6589-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.16.030

Research progress on mechanism and application of *Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma* in prevention and treatment of high altitude disease

DAI Xuemei, HE Yacong, WANG Fei, WANG Zhenxing

Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610075, China

Abstract: High altitude disease (HAD) refers to disorders triggered by specific environmental factors such as low oxygen levels, low atmospheric pressure, cold and dry conditions, and strong ultraviolet radiation. Its pathogenesis is complex and often linked to *qi* deficiency and blood stasis. Hongjingtian (*Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma*), a renowned traditional Chinese medicinal herb, contains diverse active ingredients including phenylethanoid glycosides, flavonoids, phenylpropanoids, volatile oils, organic acids and other active components. It has the effects of nourishing *qi*, promoting blood circulation, clearing meridians and relieving asthma, exhibiting multiple biological effects in prevention and treatment of HAD. Modern pharmacological studies have confirmed that *Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma* and its active ingredients play a preventive and therapeutic role in HAD through anti-inflammatory, anti-oxidative stress, anti-fatigue, regulation of programmed cell death, improvement of glucose and lipid metabolism, and intestinal flora regulation. This review summarizes the mechanisms and applications of *Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma* and its active ingredients in prevention and treatment of HAD in recent years, providing a reference for clinical research on *Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma* in treatment of HAD.

Key words: *Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma*; high altitude disease; *Rhodiolae Crenulatae Radix et Rhizoma* drug pair; salidroside; kaempferol; anti-inflammatory; anti-oxidative stress; anti-fatigue; improvement of glucose and lipid metabolism

高原病是指人体从低海拔地区快速进入高海拔地区(海拔>2 500 m), 因低氧低压、寒冷干燥、强紫外线等特殊环境因素而造成的特发性疾病, 以头痛、头晕、呕吐、疲乏、气短等作为主要临床表现, 严重者可出现多器官功能障碍、高原肺水肿

(high altitude pulmonary edema, HAPE) 或高原脑水肿^[1-2]。据文献统计, 中国高原病合并发病率达 37%, 其中主要以急性高原病(acute high altitude disease, AHAD)为主, 发病率高达 40%^[3], 严重影响人体健康与活动能力, 成为制约高原地区人口健康与社

收稿日期: 2026-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(82205043); 成都市卫生健康委员会委校联合专项(WXLH202403114)

作者简介: 代雪梅, 硕士研究生, 研究方向为中医药防治呼吸病与老年病。E-mail: daixuemei0525@163.com

*通信作者: 王 飞, 教授, 主任医师, 博士生导师, 从事中医药防治呼吸病和老年病的临床与基础研究。E-mail: Wangfei896@163.com

王振兴, 副主任医师, 硕士生导师, 从事中医药防治呼吸病和老年病的临床与基础研究。E-mail: wangzhenxing@cdutcm.edu.cn

会发展的重要公共卫生问题。目前,临床针对高原病防治多以阶梯式登高、吸氧支持及对症药物治疗为主^[4],但部分化学药物存在不良反应明显,且适用人群受限等不足^[5],很大程度地限制了高原病的治疗。中医药作为中华民族的瑰宝,对高原病的防治独具中医特色,具有多成分、多靶点、多通路,且不良反应少的特点。因此,开展中医药防治高原病的研究,具有重要的临床价值与现实意义。

红景天为景天科植物大花红景天 *Rhodiola crenulate* (Hook. f. et Thoms.) H. Ohba 的干燥根和根茎,主要生长于青藏高原、喜马拉雅山脉等地区^[6]。红景天始载于东汉时期《神农本草经》,原名“景天”,被列为上品^[7-8]。公元 8 世纪,宇妥·元丹贡布所著《四部医典》将红景天归为涩药部,其藏药名为“扫罗玛尔布”,与藏红花、雪莲花并称为藏药“吉祥三宝”^[9]。红景天药用历史悠久,在《四部医典》中,记载其“善润肺,能补肾、理气、养血”,主治周身乏力、胸闷、体虚等,与高原病“气虚血瘀、清气不足”的病机高度契合^[10]。现代药理学研究表明,红景天具有抗缺氧、抗氧化应激、抗抑郁等药理作用,已被开发为红景天口服液、红景天胶囊、红景天注射液、利舒康胶囊等中药制剂,用于改善 HAPE 与 AHAD 等相关症状。近年来,关于红景天及其活性成分在高原病防治中的作用机制研究与临床观察逐渐增多,其药理作用与临床价值得到进一步证实。本文系统梳理了红景天及其化学成分在高原病防治中的作用机制和应用,为红景天在高原病的临床使用上提供参考。

1 红景天在高原病的中医治则属性

高原病病名在中医古籍中并无相关记载,古代多将其描述为“瘴气”“冷瘴”“瘴疔”等,其症状表现可归属于“心悸”“虚劳”“喘证”“头痛”等范畴,核心病机与高原环境的特殊性密切相关^[11]。《素问·异法方宜论》记载:“西方者,金玉之域,沙石之处,天地之所收引也,其民陵居而多风,水土刚强”,描述高原地区海拔高、多风干燥、气候寒冷的环境特征,为高原病病机的地域溯源提供了中医理论根基。高原地区致病特点主要体现在 3 方面:一是耗气伤肺,《黄帝内经·素问·举痛论篇第三十九》曰:“寒则腠理闭,气不行,故气收矣”,寒邪易耗损肺气,致肺主气司呼吸功能减退,正如《灵枢·五味》所言:“肺气虚则少气不足以息”,则出现气短、喘息、乏力等;唐代《通典·边防典六》记载吐蕃地

区“地有冷瘴,令人气急”,指出在高原“寒凉”与“瘴气”叠加的环境特性下,易致肺气壅滞、气机升降失常,形成“气急”等核心症状,强化了高原病“耗气伤肺”的病机认知。二是气血瘀滞,《汉书·西域传》记载:“历大头痛、小头痛之山,赤土、身热之阪,令人身热无色,头痛呕吐,驴畜尽然”,揭示古代高原地区人们出现头痛、呕吐、乏力等临床症状,与高原病高度一致;《黄帝内经·素问·举痛论》曰:“寒气入经而稽迟,泣而不行,客于脉外则血少,客于脉中则气不通,故卒然而痛”,阐述寒邪侵袭致血脉挛缩、气血凝滞,导致脑部、心肺等脏腑气血供应不足,引发头痛、头晕、胸闷等不适。三是肺阴亏虚,《黄帝内经·素问·阴阳应象大论》指出:“西方生燥,燥生金,金生辛,辛生肺,肺生皮毛,皮毛生肾,燥胜则干”,明确西方(高原多居西方)以为燥气所主,燥邪易伤肺,致津液耗损而见干燥之象,肺失濡润,则咳嗽、痰黏、咽干,进一步加重呼吸功能失调。

红景天性味多归于甘、苦,药性以温、平为主,主要入肺、脾、心、肝经,具有益气活血、通脉平喘、养阴润燥的功效。高原干燥气候易致肺阴亏虚,加重呼吸不适,红景天苦能清肺热、甘能润肺阴,可缓解肺热阴虚所致的咳嗽、痰黏、呼吸不畅。临床数据挖掘显示,在治疗以气阴两虚为主要证型时,红景天是使用频次最高的药物之一,常与麦冬、玉竹、党参等益气养阴之品配伍,形成核心药组^[12]。高原缺氧易致血行不畅,瘀血内生。红景天兼具益气与活血之功,可“以气行血”,既补气虚之不足,又通血瘀之阻滞,在治疗心肺疾病存在“痰瘀互结”或“气虚血瘀”病机的疾病中,红景天常与川芎、丹参、莪术等活血药配伍,以达益气活血、化瘀通络之效^[13-14]。肺为气之主,司呼吸而贯心脉,高原病的核心矛盾是机体对缺氧的不耐受,本质为肺气亏虚、呼吸功能衰减。红景天甘平益气,尤善补肺气,能增强肺主气、司宣降的功能,提升机体摄纳清气、运化气血的能力,从根源上改善气虚所致的气短、乏力、血氧运化不足等问题,增强机体对高原低氧环境的适应性与耐受力,缓解高原性缺氧引起的临床症状^[15]。因此,红景天集益气、养阴、活血于一身,与高原病“气虚阴伤、血瘀络阻”的核心病机结合。

2 红景天防治高原病的研究

2.1 红景天的化学成分

红景天作为药食同源的常用中药材,其化学成

分丰富多样,目前已从红景天中分离得到超过 200 种化合物,主要包括苯乙醇苷类、黄酮类、苯丙素类、挥发油类、有机酸类及其他成分,这些成分相互协同,共同构成了红景天药效物质基础^[16-18]。苯乙醇苷类主要含红景天苷、酪醇、苯乙醇-*O*- β -*D*-吡喃葡萄糖苷、苯乙醇- β -巢菜糖苷等。现代研究发现红景天苷是苯乙醇苷类的核心成分,具有抗缺氧、抗炎、抗疲劳、抗氧化等功效,其含量被作为评价红景天质量的重要指标^[6,19-20]。黄酮类化合物是红景天中重要的次生代谢产物,目前已从红景天中检测出 70 余种,主要包括山柰酚、山柰酚-7-*O*- α -*L*-鼠李糖苷、山柰酚-7-*O*-葡萄糖苷、异槲皮苷、根皮素、槲皮素、儿茶素、表儿茶素没食子酸酯等^[21-22]。其中,山柰酚及其糖苷类衍生物是红景天中含量较高的黄酮类成分,具有抗氧化应激、抗炎等作用^[23-24],与苯乙醇苷类成分协同增强红景天的药理活性。苯丙素类化合物根据结构可将其分为香豆素、木脂素、苯丙烷苷类等,目前从红景天中分离鉴定出的苯丙素类化合物主要有香豆素、秦皮乙素、秦皮苷、松脂酚、络塞维、洛塞琳等,该类成分在抗氧化与清除自由基、抗炎、调节肠道菌群、神经保护等方面发挥广泛的药理作用^[25-28]。挥发油类化合物主要含醛类、烷类、醇类、烯烃类、酯类、酮类、芳香族等化合物。现代研究表明辛醇、香叶醇及 6-甲基-5-庚烯-2-醇含量较高,为红景天挥发油中的主要成分,该成分具有抗氧化、抗菌、改善肠道菌群失衡的特点^[29-30]。红景天中还含有没食子酸、原儿茶酸、阿魏酸、咖啡酸、桂皮酸、香草酸等有机酸类化合物^[31]。此外,红景天中还含有多糖类及微量元素等^[32-33]。

2.2 活性成分防治高原病的作用机制

2.2.1 抗炎 高原缺氧环境可诱发机体强烈的炎症反应,导致肺、心、脑等重要脏器损伤。红景天作为传统藏药,其主要活性成分红景天苷被证实具有广泛的抗炎生物活性,是发挥防治高原病的关键物质基础^[34]。红景天苷能够通过多靶点、多通路的方式调节炎症反应,从而在缓解高原病相关的组织损伤^[35-36]。王子晗^[37]使用红景天苷 28、56、112 mg/kg 作用于 HAPE 大鼠模型后发现,红景天苷可减轻肺组织炎症浸润和水肿程度,改善肺组织病理损伤状态,其机制可能与抑制磷脂酰肌醇 3-激酶(phosphatidylinositol-3-kinase, PI3K)/蛋白激酶 B(protein kinase B, Akt)/哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(mammalian target of rapamycin, mTOR)信号通路,

下调白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)、IL-1 β 、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)及单核细胞趋化蛋白-1 表达有关。此外,在脂多糖诱导的小鼠小胶质 BV-2 细胞炎症模型中,红景天苷 10 mg/L 可通过调控丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinases, MAPK)家族中的 p38 和 c-Jun 氨基末端激酶(c-Jun N-terminal kinase, JNK)信号通路,降低 IL-6 和 TNF- α 的 mRNA 表达及分泌量,抑制小胶质细胞活化及炎症因子释放,进而减轻神经细胞损伤^[38]。另外,刘忠毅等^[39]采用 AB-8 大孔吸附树脂色谱法分离红景天,发现红景天总黄酮提取物 40%~95%洗脱物可降低 β 淀粉样蛋白 25-35(amyloid β -protein 25-35, A β ₂₅₋₃₅)诱导大鼠肾上腺髓质嗜铬细胞瘤 PC12 细胞上清液中 IL-6、TNF- α 、IL-1 β 和环氧合酶-2(cyclooxygenase-2, COX-2)的分泌水平,抑制细胞炎症的发生,拮抗 A β ₂₅₋₃₅ 的神经毒性,减轻 PC12 细胞损伤。研究发现,红景天中黄酮类化合物山柰酚,能够降低 HAPE 大鼠模型中 IL-6 和 TNF- α 的表达水平,调控 PI3K/Akt 信号通路,减轻高原低氧所引发的炎症反应,减轻肺水肿症状,改善肺组织损伤^[40]。

2.2.2 降低氧化应激损伤 高原低氧诱导的氧化应激是高原病发生发展的核心病理机制之一。低氧环境会打破机体氧化-抗氧化系统稳态,导致线粒体功能紊乱、活性氧大量蓄积,直接损伤海马、皮质等区域的神经元,引发脂质过氧化、蛋白质氧化损伤及 DNA 氧化断裂,加重肺、脑、肝等靶器官损伤^[41-42]。研究发现,红景天提取物(含有没食子酸、红景天苷、酪醇等)干预高原低氧脑损伤 SD 大鼠后,可通过调控缺氧诱导因子-1 α (hypoxia inducible factor-1 α , HIF-1 α)/miR-10/铁硫簇组装同源物 1/2(iron-sulfur cluster assembly enzyme homolog1/2, ISCU1/2)信号通路,降低海马区的丙二醛、乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)、氧化型谷胱甘肽表达,增加谷胱甘肽和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)表达,从而调节线粒体能量代谢紊乱,减轻缺氧导致的脑损伤^[43]。廖冬燕等^[44]研究发现 ip 红景天苷 25、50 mg/kg 于阿尔茨海默病模型大鼠后,能增强海马组织中总 SOD、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)和过氧化氢酶(catalase, CAT)活性,降低海马组织中的活性氧水平,减轻氧化损伤,从而保护认知功能。秦宁宁等^[45]研究发现红景天苷 10 mg/kg

能改善高原低氧环境下小鼠的学习记忆能力,降低脑组织中 H_2O_2 和丙二醛含量及乙酰胆碱酯酶活力,提高谷胱甘肽水平和 SOD 活性,抑制海马组织中谷氨酸受体 1 和凋亡蛋白 B 淋巴细胞瘤-2 相关 X 蛋白 (B-cell lymphoma-2 associated X protein, Bax)、半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶-3 (cystein-aspartate protease-3, Caspase-3) 的表达,减少神经元凋亡及氧化应激损伤。赵安鹏等^[46]发现在缺氧大鼠模型中,红景天中活性成分儿茶素 47.1、94.2、141.3 mg/kg 通过提高缺氧大鼠的血氧饱和度,降低心肌、脑、肺组织中丙二醛、一氧化氮、IL-6、TNF- α 含量,升高谷胱甘肽含量和 SOD 活力,从而缓解急性低氧暴露所致炎症反应和氧化应激。

2.2.3 抗疲劳 高原低氧是诱发疲劳的始动因素,其通过多途径破坏机体正常的生理代谢与功能调节,最终导致骨骼肌、中枢神经系统、心肌等关键组织的功能下降,表现为全身乏力、运动耐力显著降低、精神萎靡等疲劳症状。红景天作为传统中药材,其抗疲劳作用已得到现代药理研究的广泛证实。研究表明,无论是长白山产的高山红景天,还是西藏产的大花红景天,均能显著延长小鼠的力竭游泳时间,并有效降低运动后血尿素氮和血乳酸水平,同时提升肝糖原储备,显示出明确的抗疲劳效果^[47]。王莹等^[48]研究发现红景天 200~800 mg/kg 可能通过甘油磷脂代谢和花生四烯酸代谢信号通路,改善运动性疲劳小鼠骨骼肌病理形态,降低血清血乳酸积累,促进糖原合成,降低骨骼肌 TNF- α 、IL-6 的含量,从而起到抗疲劳作用。秦宁宁等^[49]探讨高原低氧环境下红景天苷对小鼠运动耐力,发现红景天苷 5、10、20 mg/kg 能显著延长小鼠力竭游泳时间,具有显著的抗疲劳活性,其作用与减少氧化应激损伤、降低血乳酸不良代谢产物的堆积及增加肝糖原和肌糖原等能量物质的储备密切相关。此外,杨芳芳^[50]研究发现红景天苷 50、100、200 mg/kg 可提升大鼠骨骼肌呼吸链复合体活性,上调骨骼肌 Kelch 样 ECH 相关蛋白 1 (Kelch like ECH associated protein 1, Keap1)、核因子 E2 相关因子 2 (nuclear factor E2 related factor 2, Nrf2) 及血红素加氧酶-1 (heme oxygenase-1, HO-1) 表达,改善线粒体能量代谢,提升机体的抗疲劳能力。

2.2.4 调控程序性细胞死亡 自噬是细胞降解、回收蛋白质和细胞器以维持细胞内稳态的过程^[51]。高原低压缺氧会引发自噬的双重调控,适度自噬可通

过清除受损细胞器、维持能量代谢平衡发挥保护作用,而过度或紊乱的自噬则会加重组织损伤。有研究表明^[52-53],高原低氧环境暴露可以诱导细胞的过度自噬,对脑、心、肺等器官造成损害。杜丽等^[54]发现红景天苷 40 mg/kg 可正向调节腺苷酸活化蛋白激酶 (adenosine monophosphate activated protein kinase, AMPK) 信号通路,下调 mTOR 表达,增强心肌自噬作用,减轻缺氧引起的心脏损伤。唐朝等^[55]发现红景天苷 500 $\mu\text{mol/L}$ 干预氧-糖剥夺/再灌注 (oxygen-glucose deprivation/reoxygenation, OGD/R) 诱导的小鼠海马神经元 HT₂₂ 细胞后,可下调 p-细胞外调节蛋白激酶 (extracellular regulated protein kinase, ERK) 水平、上调 p-mTOR 水平,其机制可能通过阻止 MAPK/ERK/mTOR 信号途径激活和转导,抑制 OGD/R 诱导的海马神经元过度自噬,发挥神经保护作用。

细胞凋亡是一种高度调控的细胞死亡过程,其主要通过 Caspase 家族的作用来发挥其效果^[56]。高原病的病理损伤与 Caspase 家族密切相关,其中 Caspase-3/8/9 作为调控细胞凋亡的核心分子,介导程序性细胞死亡,其表达变化直接影响靶器官损伤程度^[57-59]。向权等^[60]研究发现红景天苷 20 $\mu\text{mol/L}$ 可下调 Caspase-3、HIF-1 α 的 mRNA 表达,明显升高大鼠心肌细胞活力,抑制心肌细胞凋亡。郭勇等^[61]研究发现红景天苷 0.15 g/kg 可有效抑制高原红细胞增多症大鼠骨髓有核红细胞凋亡增加,改善低氧引起的核红细胞过度积累,其机制与降低凋亡蛋白 Bax、Caspase-3 和 Caspase-9 蛋白表达有关。此外,红景天苷还能通过激活 AMPK α 1-p53-Bax/Bcl-2-Caspase-9-Caspase-3 信号通路,调控细胞增殖与凋亡平衡,抑制缺氧诱导的神经细胞、肺组织细胞等过度凋亡,减轻组织形态损伤^[62]。罗金婷^[63]以红景天多糖 0.012 5 mg/mL 干预低氧环境下猪睾丸间质细胞损伤模型,发现红景天多糖可上调抗凋亡基因 Bcl-2 的表达,下调促凋亡基因 TNF- α 、IL-6、Bax、Caspase-3 及相关蛋白 p21、p53、p-JNK/JNK 的表达,通过调控 p53/p21 和 JNK 信号通路活化来抑制细胞凋亡。另外相关研究已证实,红景天中成分儿茶素能够通过下调长链非编码 RNA 心肌梗死相关转录本的表达,促进 Akt/糖原合成酶激酶-3 β (glycogen synthase kinase-3 β , GSK-3 β) 的激活,从而减轻缺氧/复氧诱导的心肌细胞凋亡^[64]。

细胞焦亡是由气孔蛋白 (gasdermin, GSDM) 家

族蛋白介导的程序性炎症细胞死亡,以细胞膜穿孔、细胞肿胀破裂及促炎因子大量释放为特征^[65-66]。Caspase-1 介导的经典途径和 Caspase-11 介导的非经典途径是焦亡的 2 大核心通路。NOD 样受体热蛋白结构域 3(NOD like receptor family pyrin domain containing 3, NLRP3)炎症小体的活化、重排,导致细胞焦亡^[67]。已有研究证实,高原低氧环境可特异性激活核苷酸结合寡聚化结构域样受体信号通路,通过上调 Caspase-1、Caspase-11、GSDMD 等细胞焦亡关键分子的表达,诱导动物脏腑组织细胞发生焦亡,同时促进 IL-1 β 、IL-18 等炎症因子释放,引发脏腑组织炎症浸润,最终导致脏腑结构与功能损伤^[68]。史世华^[69]研究发现红景天苷 50、100 mg/kg 可调控 NLRP3/Caspase-1 信号通路,降低 NLRP3 炎症小体相关蛋白和焦亡相关蛋白在 PM_{2.5} 暴露的肺组织细胞中表达量,从而抑制细胞焦亡,减轻肺部炎症。温方军等^[70]研究证实红景天苷 10、30、50 mg/kg 可调控 Toll 样受体 4 (Toll-like receptor 4, TLR4)/NLRP3/Caspase-1 信号通路,下调心肌组织中 NLRP3、Caspase-1、GSDMD 的 mRNA 表达,抑制心肌细胞焦亡,减轻心肌炎症损伤,降低心肌纤维化程度。

铁死亡作为铁依赖、脂质过氧化驱动的程序性细胞死亡形式,近年来被证实是连接高原低氧与组织损伤的关键分子通路,其核心机制是低氧通过 HIF-1 α /HIF-2 α 调控铁代谢、抑制溶质载体家族 7 成员 11 (solute carrier family 7 member 11, SLC7A11) - 谷胱甘肽-谷胱甘肽过氧化物酶 4 (glutathione peroxidase 4, GPX4) 轴并激活脂质过氧化,最终导致细胞死亡与器官功能障碍^[71-73]。周珂如^[74]通过 ip 红景天苷 50 mg/kg 于缺血缺氧性脑病大鼠,发现红景天苷可通过直接结合 HIF-1 α ,抑制 HIF-1 α 入核及下游 HO-1 的转录激活,增强海马神经元抗氧化应激能力,上调 GPX4 的表达,下调酰基辅酶 A 合成酶长链家族成员 4 的表达,抑制海马神经元铁死亡,减轻脑损伤并恢复认知功能。梁白薇^[75]采用红景天苷 10~320 μ mol/L 干预 H₂O₂ 诱导的 HT₂₂ 细胞,可上调 GPX4、SLC7A11 与线粒体编码的烟酰胺腺嘌呤二核苷酸氢化物脱氢酶 1 表达,降低活性氧、丙二醛、超氧阴离子、细胞铁离子的含量,减少线粒体损伤,保护神经细胞免受铁死亡侵害。

2.2.5 改善糖脂代谢障碍 高原病与糖脂代谢存在密切的双向调控关系。低氧作为核心应激因素,

通过激活多条信号通路重塑机体能量代谢模式,而糖脂代谢紊乱又会加剧低氧所致的组织损伤,形成恶性循环。

研究表明,在急性低氧暴露时,机体虽启动应激反应升高血糖,但肝脏糖酵解通路受抑,转而通过上调乳酸/氨基酸-丙酮酸-三羧酸循环通路供能,血糖升高而糖酵解关键酶葡萄糖激酶活性显著下降,LDH 等代偿酶活性上调,导致乳酸堆积,引发酸中毒,进一步损伤组织细胞^[76-78];长期低氧状态下,HIF 家族发挥核心调控作用,HIF-1 通过促进葡萄糖转运体表达,增强外周组织葡萄糖摄取,同时诱导丙酮酸脱氢酶激酶 1 转录以抑制氧化磷酸化,强化无氧糖酵解;HIF-2 则通过 PI3K/Akt 信号通路抑制肝脏糖异生、促进糖原生成,协同 AMPK 通路维持血糖稳态,在低氧或适应不良时,这种调控失衡会引发胰岛素抵抗,加重高原病病情。Zheng 等^[79]研究发现红景天苷 25~100 mg/kg 可呈剂量相关性诱导肝细胞中 AMPK、PI3K/Akt 及 GSK-3 β 的磷酸化,同时激活 AMPK 信号通路,抑制磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶和葡萄糖-6-磷酸酶的表达,阻断肝糖异生和肝糖输出,改善肝脏胰岛素抵抗。高静媛等^[80]研究报道,在 2 型糖尿病大鼠模型中,红景天苷 50、100、200 mg/kg 可直接影响骨骼肌葡萄糖代谢,改善骨骼肌的胰岛素抵抗,其机制与增强糖尿病模型组大鼠骨骼肌细胞中 PI3K 及葡萄糖转运蛋白 4 蛋白表达有关。

另外,研究发现低海拔人群在高原长期停留后,载脂蛋白 B (apolipoprotein B, ApoB)、ApoCIII 等表达升高,极低密度脂蛋白清除与乳糜微粒组装障碍,导致总胆固醇、三酰甘油、低密度脂蛋白胆固醇 (low density lipoprotein cholesterol, LDL-C) 升高,高密度脂蛋白胆固醇 (high density lipoprotein cholesterol, HDL-C) 降低,证实高原低氧直接诱发脂蛋白代谢紊乱^[81]。刘文宁等^[82]以红景天苷 50、80 mg/kg 干预动脉粥样硬化 (atherosclerosis, AS) 小鼠,结果显示红景天苷能够改善脂质代谢指标,降低总胆固醇、三酰甘油及 LDL-C 含量,提高 HDL-C 含量,改善 AS 小鼠的血脂水平。Song 等^[83]发现红景天苷 25、50 mg/g 作用于高脂饮食诱导的 ApoE 缺陷小鼠后,可显著降低肝脏中总胆固醇、三酰甘油、脂肪酸和不饱和脂肪酸的生物合成,其机制与通过下调固醇调节元件结合蛋白 (Srebf1 和 Srebf2) 的基因表达有关,表明红景天苷可作为 AS 小鼠脂

质稳态的调节剂。

2.2.6 调节肠道菌群 近年来研究表明,高原低氧环境可诱导肠道菌群结构失衡与功能紊乱,表现为机会致病菌富集、有益菌丰度下降,而菌群失调又通过代谢产物介导、肠屏障损伤及系统性炎症等途径,加剧高原病的病理进程^[84]。研究发现红景天多种活性成分具有重塑肠道微生物群结构和组成的作用,其中红景天苷能够促进益生菌(乳酸菌和双歧杆菌)的增殖,并短时间内增加代谢产物短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SCFAs)的含量,恢复肠道屏障功能,纠正肠道微生物群紊乱^[85]。王子玥^[86]发现以红景天苷 10、20、40 mg/kg 作用于呋喃诱导 Balb/c 小鼠肠道损伤后,可促进闭锁小带蛋白-1(zonula occluden-1, ZO-1)、紧密连接蛋白-1(claudin-1)和闭合蛋白(occludin)表达,从而调节肠道屏障功能,缓解小鼠肠道损伤,同时采用 16S rRNA 基因测序测定,发现红景天苷能够改善呋喃导致的小鼠肠道菌

群紊乱,调整肠道菌群结构,增加有益菌丰度,降低有害菌丰度,升高代谢产物 SCFAs 表达,激活 SCFAs 关键受体蛋白,进而上调肠上皮细胞中 ZO-1 的表达,保护肠屏障的完整性,纠正代谢产物失调恢复肠道微生物生态。Wang 等^[87]研究证实红景天活性成分络塞维 50~200 mg/kg 可显著缓解由葡聚糖硫酸钠(dextran sulfate sodium salt, DSS)引起的小鼠急性及慢性结肠炎,减轻结肠损伤,抑制肠上皮细胞的凋亡,维持肠屏障功能,同时还可增加乳酸菌属和阿克曼氏菌属有益菌丰度,特异性调节肠道微生物群。基于中医“肺与大肠相表里”的理论,肺病及肠,肠病及肺^[88],红景天可能通过调节肠道菌群以维持平衡,从而改善高原低氧所致肠道组织损伤与菌群结构改变,起到防治高原病的作用。

综上,红景天及其活性成分可从以上 6 个方面发挥防治高原病的作用。在防治高原病方面具有多途径、多靶点、协同作用的特点,作用机制见图 1。

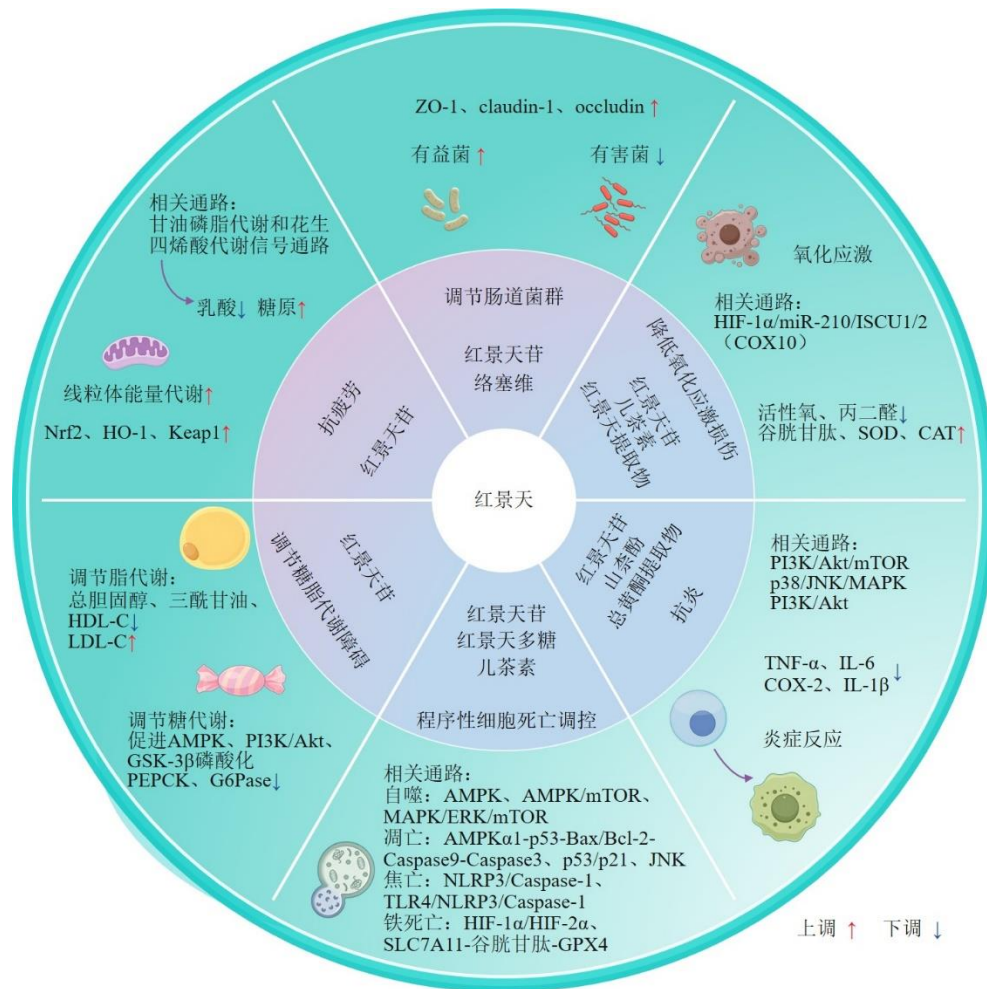


图 1 红景天防治高原病相关作用机制

Fig. 1 Mechanisms of *Rhodiola Crenulatae Radix et Rhizoma* in prevention and treatment of HAD

3 红景天在高原病中的应用

红景天作为高原特有的珍稀药用植物，是藏药防治高原病的经典药材，其药用历史悠久，随着现代药理学研究和临床应用，红景天的用药形式多样，包括单药制剂、药对、中药复方等，均在防治高原病方面有所作用。

3.1 单药制剂

红景天单药制剂主要以红景天提取物为核心原料，如红景天口服液、红景天胶囊、红景天注射剂等，在防治高原病中具有重要作用。强巴欧珠^[89]采用红景天口服液联合常规治疗防治 HAPE，发现疗效优于单纯常规治疗，可显著降低 IL-6 与 C 反应蛋白表达，升高动脉血氧分压、下降动脉血二氧化碳分压，能快速改善患者临床症状与氧合功能，减轻炎症反应。另有研究发现，红景天胶囊也可以改善氧合，通过提升血氧饱和度，降低肺动脉压，预防 AHAD 的发生^[90]。相关研究证实，高原低氧环境可通过多途径诱发或加重高原病相关缺氧抑郁，成为影响高原移居人群、驻高原人员身心健康与作业能力的重要问题^[91-93]。研究发现，红景天胶囊可上调血清脑源性神经生长因子（brain-derived neurotrophic factor, BDNF）、环磷酸腺苷反应原件结合蛋白（cAMP-response element binding protein, CREB）及海马组织中 CREB、BDNF 的 mRNA 表达，与调控 BDNF/GSK-3 β /CREB 信号通路有关，从而发挥抗抑郁的作用^[94]。Zhang 等^[95]研究发现红景天注射液呈剂量相关性降低缺氧/复氧诱导的大鼠心肌 H9c2 细胞活性氧与丙二醛水平，提升 SOD 活性，改善线粒体膜电位与氧耗，增加三磷酸腺苷（adenosine triphosphate, ATP）生成，同时上调微管相关蛋白轻链 3-II/I 的值、Beclin-1、p-Akt、p-ERK 及 B 淋巴细胞瘤-2（B-cell lymphoma-2, Bcl-2）表达，下调 p-mTOR 与剪切的 Caspase-3 表达，从而减轻心肌氧化损伤，其保护作用依赖 Akt/Beclin-1、Akt/mTOR 与 ERK/mTOR 通路协同调控自噬-凋亡平衡。

3.2 药对

中药药对配伍作为中医用药的基础，并非简单的药效叠加，而是遵循“性味相和、功效互补、君臣相佐、寒热相调”的核心原则，通过精准配对实现“增效减毒、辨证适配、标本兼顾”的用药目标^[96-97]。孔秀梅等^[98]研究发现麻花秦艽-红景天配伍比例 3：7 为最佳，可显著提高常压缺氧小鼠的存活时间，降

低小鼠肺组织中核因子- κ B（nuclear factor- κ B, NF- κ B）、IL-6、IL-1 β 及丙二醛含量，升高 IL-10、SOD 表达，麻花秦艽-红景天配伍可协同发挥抗缺氧、抗炎、抗氧化作用，其机制可能与调控 PI3K/Akt/mTOR、HIF-1/NF- κ B 信号通路有关。李晶等^[99]以红参-红景天 1：1 为研究对象，采用现代分析技术与动物实验相结合的方法，系统对比红参-红景天配伍合提（共煎）与单煎合并 2 种制备方式，发现二者配伍合提液抗疲劳疗效优于红参和红景天单煎合并液，能够延长小鼠负重游泳力竭时间，降低血清中血尿素氮、乳酸堆积，提升肝糖原储备，改善疲劳相关生化指标。冯颖童等^[100]以西洋参红景天复配方干预乙醇诱导的氧化损伤小鼠模型，发现西洋参红景天复配方 330、660、990 mg/kg 可上调小鼠血清中谷胱甘肽、GSH-Px 及 SOD 水平，下调丙二醛、TNF- α 、IL-1 β 、IL-6 表达，提高抗氧化能力，抑制促炎因子的表达，其机制与抑制 MAPK 通路活化有关。史顶聪等^[101]以红景天当归配伍干预环磷酸胺造成免疫低下小鼠模型后，发现红景天当归配伍能显著提高免疫低下小鼠的胸腺指数和脾脏指数，增强小鼠迟发型变态反应强度，提高小鼠血清半数溶血值，增强 B 淋巴细胞介导的体液免疫应答，提升巨噬细胞吞噬速率与吞噬指数，增强单核巨噬细胞的吞噬功能，强化机体非特异性免疫防御能力，且效果优于红景天、当归单药组，提示红景天与当归配伍具有显著的免疫调节协同增效作用。

此外，红景天-丹参^[102]、红景天-人参^[103]、红景天-天麻^[104]等药对配伍，可有效降低炎症因子表达，抑制氧化应激反应，调节细胞凋亡，从而减轻心肌缺血/再灌注损伤，为红景天防治高原病相关方面提供药对配伍依据。

3.3 中药复方

近年来，含有红景天的中药复方在防治高原病中展现出独特优势，如益心方、利舒康胶囊、参茸景天复方酒剂等，以中医辨证论治为核心，通过益气、活血、祛瘀等治法，能有效缓解高原病的发展进程，通过调理机体气血阴阳，增强机体耐缺氧能力和对高原环境的适应能力。曹昌霞等^[105]采用自拟方益心方（由丹参、红景天、黄芪组成）干预拟高原低氧环境下大鼠心肌损伤，发现益心方可通过提高 SOD 活性、降低丙二醛生成，上调 HIF-1 α 、血管内皮细胞生长因子、促红细胞生成素表达，促进血管新生，保护心肌细胞膜与细胞器结构功能，

减轻高原低氧所致心肌损伤。利舒康胶囊作为治疗高原病的经验方剂,对高原缺氧大鼠肺损伤具有保护作用^[106]。张冬梅等^[107]研究采用不同剂量利舒康胶囊治疗 HAPE 大鼠后发现,利舒康胶囊 56.0 mg/mL 对 HAPE 防治为最优给药剂量,肺含水量与肺泡灌洗液蛋白含量显著降低,肺组织病理损伤明显减轻,炎症因子 IL-6、IL- β 及 TNF- α 水平显著下降,其机制可能与调控细胞黏附分子、糖胺聚糖生物合成、DNA 复制/核苷酸切除修复、甘油磷脂代谢等关键信号通路有关。另有研究发现,高原缺氧大鼠心肌组织损伤严重,心肌细胞线粒体外膜破坏和肿胀,且心肌组织胞质中 Nrf2、HO-1 表达增加,而利舒康胶囊 280、420、560 mg/kg 可缓解高原缺氧所致心肌组织损伤,其机制可能与激活 Nrf2/HO-1 信号通路,清除机体内多余的自由基和活性氧积累有关^[108]。疲劳是高原病最常见、最核心的症状之一,贯穿于高原病发病全过程,其核心机制之一是能量代谢障碍,高原低氧导致动脉血氧分压与饱和度下降,线粒体氧化磷酸化受抑、ATP 生成减少,糖酵解增强使乳酸堆积,引发肌肉疲劳^[109-110]。朱啸川等^[111]研究发现参茸景天复方酒剂可促进运动性疲劳小鼠肝糖原合成与分解,显著增加肝糖原储备,提升线粒体 ATP 生成效率,加速乳酸、血尿素氮代谢,减少代谢废物在肌肉与血液中蓄积,升高 SOD、GSH-Px 表达,降低 LDH 活性与丙二醛含量,减轻运动诱导的氧化应激损伤,从而显著改善小鼠运动性疲劳,其机制与通过调节能量代谢、清除代谢废物、抗氧化三重机制有关。

4 结语与展望

高原病是高海拔环境下缺氧、低温、强辐射等综合因素引发的全身性疾病,严重威胁高原旅居者、从业者及登山人员的身心健康,也制约着高原地区的开发与发展。红景天作为生长于高海拔环境的特色药用植物,在藏医药体系中应用历史悠久,《四部医典》《晶珠本草》等藏医典籍均记载其可缓解高海拔相关不适,现代研究进一步证实其是防治高原病的优势中药。

本文系统阐释中药红景天及其活性成分在高原病治疗中的作用机制与应用价值。近年来,国内外学者围绕红景天防治高原病展开了多维度、多层次的系统研究,为临床应用提供了坚实的理论支撑与实践依据。红景天作为补气活血药物,在高原病中应用方面,形成了多种含有红景天的单药制剂、

药对及中药复方配伍方案,如红景天配秦艽增强抗缺氧功效,配红参改善疲劳作用,配西洋参减轻氧化损伤,配当归协同增效免疫调节等。这些药对配伍方案通过多成分、多靶点、多途径的协同作用,弥补了红景天功效单一的不足,在缓解高原病症状、缩短病程、促进机体适应高海拔环境等方面展现出更显著的优势。此外,红景天口服液、红景天胶囊、红景天注射液、益心方、利舒康胶囊、参茸景天复方酒剂等中药制剂与经验方在临床上均有不错疗效。现代药理学研究进一步揭示了红景天及其活性成分防治高原病的多重作用机制,抑制炎症反应、减轻机体氧化应激以“平喘”,缓解高原相关的认知障碍与疲劳症状、调节肠道菌群及代谢产物以“益气”“养阴”,调控程序性细胞死亡、改善糖脂代谢障碍以“活血”“通脉”,涉及多条信号通路,协同增效保护机体器官功能,尤其是肺、脑、心等,从而防治高原病。

尽管红景天防治高原病疗效显著,但现有研究也清晰呈现出当前领域的局限性:(1)临床研究存在短板,多数研究样本量较小,部分缺乏严格的随机双盲安慰剂对照设计,证据等级标准有待提升,且红景天的防治效果受干预时间、进入高原方式、海拔高度等因素影响,相关针对性研究仍不充分,未来应开展多中心、大样本的随机双盲安慰剂对照试验,结合人群特征优化干预方案,提升研究结果的可靠性与临床转化价值,为临床应用提供数据支撑。(2)安全性研究不足,红景天对肝脏细胞色素 P450 (cytochrome P450, CYP) 酶(尤以 CYP3A4 为主)具有潜在的抑制作用^[112],而地塞米松等高原急救一线用药主要依赖该酶系代谢^[113],二者临床联用可能导致药物蓄积,从而增加糖皮质激素过量等不良反应风险。未来亟需系统开展红景天与常规抗高原病药物(如地塞米松、乙酰唑胺等)的药动学及药效学相互作用研究,以明确其联合用药的安全性与合理性。(3)作用机制研究不够深入,多集中于动物实验与基础细胞层面,对红景天核心成分在体内的代谢过程、配伍后成分间的相互作用及协同调控机制,尚未完全阐明,后续可借助现代分子生物学、网络药理学、代谢组学等技术,深入探究红景天核心活性成分在体内的吸收、分布、代谢、排泄过程,明确其调控缺氧耐受、氧化应激、炎症反应等的关键靶点与信号通路。(4)配伍规律缺乏系统梳理,现有配伍多基于传统经验,对配伍比例

的优化、现代药效学验证及作用靶点关联性研究不足。(5)红景天产品开发滞后,现有多以传统饮片、普通胶囊、口服液或注射液为主,剂型单一,而现代新型制剂(如纳米载体、脂质体、缓释制剂等)的开发研究较少,还需进一步加快产品创新研发,以便满足高原环境下的应急防治需求。综上,在高原病防治领域具有广阔的研究前景与应用价值。未来通过深化理论研究、优化临床应用、推动产品创新,必将推动红景天在高原病防治中发挥更大的作用,为高原地区人民的健康、高原经济社会的发展及中医药现代化、国际化贡献重要力量。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 刘润泽, 庞永杰, 张梅, 等. 高原病的病理生理、预防及治疗研究进展 [J]. 临床误诊误治, 2025, 38(19): 122-131.
- [2] Luks A M, Auerbach P S, Freer L, et al. Wilderness medical society clinical practice guidelines for the prevention and treatment of acute altitude illness: 2019 update [J]. *Wildern Environ Med*, 2019, 30(4S): S3-S18.
- [3] 汤秋彤, 李芙兰, 谢海霞, 等. 高原病发病率及其影响因素的系统评价 [J]. 山东医药, 2025, 65(11): 76-81.
- [4] Bouzat P, Séchaud G, Banco P, et al. The effect of zolpidem on cognitive function and postural control at high altitude [J]. *Sleep*, 2018, 41(10): zsy153.
- [5] Gatterer H, Villafuerte F C, Ulrich S, et al. Altitude illnesses [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2024, 10: 43.
- [6] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 165-166.
- [7] 王亦舟, 郁利霞, 邹云娇, 等. 红景天属药用植物品质评价及品质影响因素研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(19): 6758-6767.
- [8] 佚名. 神农本草经 [M]. 尚志钧, 校注. 北京: 人民卫生出版社, 1982: 68.
- [9] 宇妥·元丹贡布. 四部医典 [M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1982: 238.
- [10] 中华中医药学会. 高原红细胞增多症中医临床诊疗指南 [J]. 中国高原医学与生物学杂志, 2021, 42(3): 205-216.
- [11] 杜松, 张华敏, 黄璐琦. 高原病中医病因病机理论探讨: 兼论“氧”那是第七淫 [J]. 中医杂志, 2025, 66(24): 2509-2516.
- [12] 王慧惠, 彭远, 方祝元. 基于数据挖掘分析方祝元治疗心悸的用药规律 [J]. 江苏中医药, 2024, 56(3): 14-18.
- [13] 张雯静, 王秋铭, 李萌, 等. 李国勤治疗间质性肺病的用药规律分析 [J]. 北京中医药, 2023, 42(9): 1048-1052.
- [14] 陶诗怡, 汤献文, 于林童, 等. 黄力辨治冠心病经皮冠状动脉介入术后复发心绞痛的用药规律探讨 [J]. 广州中医药大学学报, 2024, 41(6): 1598-1606.
- [15] 王仁杰, 罗凯, 杨军, 等. 基于数据挖掘中药治疗高原性缺氧的组方规律 [J]. 中南大学学报: 医学版, 2023, 48(10): 1453-1463.
- [16] 宋月英, 马玉珍, 韩慧文, 等. 红景天属植物化学成分及药理作用的研究进展 [J]. 中草药, 2004, 35(2): 121-123.
- [17] 杜宝玉, 姚丹阳, 王媛, 等. 红景天化学成分和药理作用研究进展 [J]. 药学研究, 2025, 44(9): 905-912.
- [18] 刘艳, 尧俊涵, 梅瑀, 等. 红景天化学成分研究 [J]. 中草药, 2024, 55(9): 2875-2886.
- [19] 肖泽云, 李雅潇, 李凯, 等. 红景天苷及其类似物抗缺氧药效团模型的构建及可靠性验证 [J]. 中国医药科学, 2023, 13(13): 60-63.
- [20] Liang K K, Ma S H, Luo K, et al. Salidroside: An overview of its promising potential and diverse applications [J]. *Pharmaceuticals*, 2024, 17(12): 1703.
- [21] 冯媛媛, 陈存. 红景天黄酮类化合物及药理活性研究进展 [J]. 中药材, 2014, 37(4): 700-705.
- [22] 骆前飞, 王瑞, 王峥涛, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS 结合分子网络技术快速表征大花红景天的化学成分 [J]. 中成药, 2024, 46(6): 2101-2114.
- [23] Jin S, Zhang L J, Wang L. Kaempferol, a potential neuroprotective agent in neurodegenerative diseases: From chemistry to medicine [J]. *Biomed Pharmacother*, 2023, 165: 115215.
- [24] Panossian A, Wikman G, Sarris J. Rosen root (*Rhodiola rosea*): Traditional use, chemical composition, pharmacology and clinical efficacy [J]. *Phytomedicine*, 2010, 17(7): 481-493.
- [25] 马天翔. 红景天中苷(昔元)类成分的抗辐射活性及其在 Caco-2 模型中的转运机制研究 [D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2013.
- [26] 吴青青. 络塞维调控自噬对缺血性脑损伤大鼠轴突生长的机制研究 [D]. 福州: 福建中医药大学, 2025.
- [27] 施雅仙, 付雪. 红景天及其活性成分防治神经退行性病变药理作用的研究进展 [J]. 环球中医药, 2026, 19(6): 1341-1350.
- [28] Zakharenko A M, Razgonova M P, Pikula K S, et al. Simultaneous determination of 78 compounds of *Rhodiola rosea* extract by supercritical CO₂-extraction and HPLC-ESI-MS/MS spectrometry [J]. *Biochem Res Int*, 2021, 2021: 9957490.
- [29] Zhong L Y, Peng L X, Fu J, et al. Phytochemical, antibacterial and antioxidant activity evaluation of *Rhodiola crenulata* [J]. *Molecules*, 2020, 25(16): 3664.

- [30] Rizzello F, Ricci C, Scandella M, *et al.* Dietary geraniol ameliorates intestinal dysbiosis and relieves symptoms in irritable bowel syndrome patients: A pilot study [J]. *BMC Complementary Altern Med*, 2018, 18(1): 338.
- [31] 李薛萍, 骆前飞, 王瑞, 等. 大花红景天化学成分、药理作用及质量控制研究进展 [J]. 上海中医药杂志, 2025, 59(5): 76-81.
- [32] 马荣杰. 红景天多糖的制备、结构鉴定及抗氧化性研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [33] 雷富平, 张志军, 陈亮, 等. 红景天中微量元素及其营养保健作用 [J]. 饮料工业, 2015, 18(3): 60-63.
- [34] 王小博, 侯娅, 王文祥, 等. 藏药红景天的药理作用及其机制研究进展 [J]. 中国药房, 2019, 30(6): 851-856.
- [35] Xie N, Fan F F, Jiang S N, *et al.* *Rhodiola crenulate* alleviates hypobaric hypoxia-induced brain injury via adjusting NF- κ B/NLRP3-mediated inflammation [J]. *Phytomedicine*, 2022, 103: 154240.
- [36] 孙月梅, 秦宁宁, 季前, 等. 红景天苷改善高原认知功能的靶点及分子机制研究 [J]. 四川大学学报: 医学版, 2025, 56(1): 112-119.
- [37] 王子晗. 红景天苷对高原肺水肿大鼠防治作用的研究 [D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2023.
- [38] 王杰, 张艳玲, 庄楠. 红景天苷通过调节 p38 和 JNK 信号通路抑制 BV-2 细胞分泌炎症因子 [J]. 生理学报, 2018, 70(3): 245-252.
- [39] 刘忠毅, 王启文, 阿孜古丽·阿里木, 等. 蔷薇红景天总黄酮提取物对 A β ₂₅₋₃₅ 诱导 PC12 细胞损伤的保护作用及其活性部位筛选 [J]. 中南药学, 2024, 22(2): 409-415.
- [40] Li N, Cheng Y, Jin T, *et al.* Kaempferol and ginsenoside Rg₁ ameliorate acute hypobaric hypoxia induced lung injury based on network pharmacology analysis [J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2023, 480: 116742.
- [41] Xie L S, Wang Q L, Ma J X, *et al.* Hypoxia-induced reactive oxygen species in organ and tissue fibrosis [J]. *Biocell*, 2023, 47(2): 261-267.
- [42] 刘焕亮, 来文庆, 石玥, 等. 低压低氧环境下 CO 暴露致大鼠皮质组织线粒体损伤的影响研究 [J]. 环境与健康杂志, 2025, 42(4): 288-294.
- [43] Wang X B, Hou Y, Li Q Y, *et al.* *Rhodiola crenulata* attenuates apoptosis and mitochondrial energy metabolism disorder in rats with hypobaric hypoxia-induced brain injury by regulating the HIF-1 α /microRNA 210/ISCU1/2 (COX10) signaling pathway [J]. *J Ethnopharmacol*, 2019, 241: 111801.
- [44] 廖冬燕, 康雪莹, 吴展帅, 等. 红景天苷对 AD 大鼠过氧化应激和认知损伤的保护作用研究 [J]. 广西中医药, 2024, 47(4): 51-58.
- [45] 秦宁宁, 申亦可, 程俊飞, 等. 高原低氧条件下红景天苷对小鼠记忆损伤的保护作用 [J]. 中国药理学通报, 2023, 39(1): 65-70.
- [46] 赵安鹏, 马江红, 王子晗, 等. 儿茶素对急性高原缺氧损伤的保护作用 [J]. 中国药理学通报, 2023, 39(6): 1097-1104.
- [47] 田海玲, 康东周. 长白山红景天与西藏红景天对小鼠的抗疲劳作用比较 [J]. 延边大学医学学报, 2022, 45(1): 19-22.
- [48] 王莹, 张研, 徐立军, 等. 基于网络药理学和代谢组学研究红景天抗运动性疲劳的作用机制 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 419-428.
- [49] 秦宁宁, 谢华, 赵安鹏, 等. 高原低氧环境下红景天苷对小鼠运动耐力的影响 [J]. 浙江大学学报: 医学版, 2022, 51(4): 397-404.
- [50] 杨芳芳. 红景天苷对运动疲劳大鼠骨骼肌线粒体自由基代谢及呼吸链功能的影响 [J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2021, 42(5): 61-66.
- [51] Liu S Z, Yao S J, Yang H, *et al.* Autophagy: Regulator of cell death [J]. *Cell Death Dis*, 2023, 14: 648.
- [52] Zhao Z, Hou B, Tang L, *et al.* High-altitude hypoxia-induced rat alveolar cell injury by increasing autophagy [J]. *Int J Exp Pathol*, 2022, 103(4): 132-139.
- [53] Dai S H, Feng Y, Lu C H, *et al.* Impairment of autophagic flux after hypobaric hypoxia potentiates oxidative stress and cognitive function disturbances in mice [J]. *Neurosci Bull*, 2024, 40(1): 35-49.
- [54] 杜丽, 马玲, 王楠. 红景天苷对高海拔缺氧条件下大鼠心肌自噬相关通路 AMPK 的影响 [J]. 心脏杂志, 2022, 34(4): 378-382.
- [55] 唐朝, 曹妍群, 陈超亮, 等. 红景天苷调节 MAPK/ERK/mTOR 信号通路对 OGD/R 诱导的海马神经元自噬和凋亡的影响 [J]. 解放军医学杂志, 2025, 50(8): 1008-1014.
- [56] Xu X B, Lai Y Y, Hua Z C. Apoptosis and apoptotic body: Disease message and therapeutic target potentials [J]. *Biosci Rep*, 2019, 39: BSR20180992.
- [57] Huan Y, Quan H L, Jia B, *et al.* High-altitude cerebral hypoxia promotes mitochondrial dysfunction and apoptosis of mouse neurons [J]. *Front Mol Neurosci*, 2023, 16: 1216947.
- [58] Yin J J, Wang Y H, Li B, *et al.* Hypobaric hypoxia increased autophagy and apoptosis in PC12 rat pheochromocytoma cells more than normobaric hypoxia [J]. *High Alt Med Biol*, 2025, 26(3): 301-307.
- [59] 蔡玉亮. 慢性高原病骨髓造血细胞凋亡及 Caspase-3、Caspase-8 和 Caspase-9 表达研究 [D]. 西宁: 青海大学, 2011.

- [60] 向权, 杨榛, 施树德, 等. 红景天苷对低氧诱导大鼠心肌细胞凋亡及氧化应激损伤、炎症反应的影响 [J]. 甘肃中医药大学学报, 2025, 42(1): 1-7.
- [61] 郭勇, 王生艳, 易静静, 等. 红景天苷对高原红细胞增多症模型大鼠骨髓 CD71⁺有核红细胞凋亡的影响 [J]. 吉林大学学报: 医学版, 2023, 49(5): 1174-1181.
- [62] Chen M Y, Cai H G, Yu C, *et al.* Salidroside exerts protective effects against chronic hypoxia-induced pulmonary arterial hypertension via AMPK α 1-dependent pathways [J]. *Am J Transl Res*, 2016, 8(1): 12-27.
- [63] 罗金婷. 红景天多糖对低氧环境下猪睾丸间质细胞增殖、凋亡及睾酮分泌的影响 [D]. 西宁: 青海大学, 2024.
- [64] Cong L, Su Y S, Wei D Z, *et al.* Catechin relieves hypoxia/reoxygenation-induced myocardial cell apoptosis via down-regulating lncRNA MIAT [J]. *J Cell Mol Med*, 2020, 24(3): 2356-2368.
- [65] Bai Y, Pan Y D, Liu X. Mechanistic insights into gasdermin-mediated pyroptosis [J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2025, 26(7): 501-521.
- [66] 叶承林, 李志强. GSDM 家族蛋白在细胞焦亡中的作用研究进展 [J]. 疑难病杂志, 2023, 22(3): 333-336.
- [67] Franchi L, Eigenbrod T, Muñoz-Planillo R, *et al.* The inflammasome: A Caspase-1-activation platform that regulates immune responses and disease pathogenesis [J]. *Nat Immunol*, 2009, 10(3): 241-247.
- [68] 许鑫桐, 陈晓晨, 崔成玲, 等. 高原低氧通过 NOD 样受体信号通路诱导小鼠肾脏细胞焦亡 [J]. 安徽医科大学学报, 2025, 60(11): 2052-2058.
- [69] 史世华. 基于融合医学研究红景天苷经 NLRP3 炎性小体调控细胞焦亡与凋亡保护 PM_{2.5}所致肺损伤 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2023.
- [70] 温方军, 高磊, 胡益敏, 等. 基于 TLR4 介导的细胞焦亡通路研究红景天苷预防心肌纤维化的作用机制 [J]. 中国药房, 2023, 34(9): 1053-1059.
- [71] Dixon S J, Lemberg K M, Lamprecht M R, *et al.* Ferroptosis: An iron-dependent form of nonapoptotic cell death [J]. *Cell*, 2012, 149(5): 1060-1072.
- [72] Zheng X N, Liang Y Q, Zhang C. Ferroptosis regulated by hypoxia in cells [J]. *Cells*, 2023, 12(7): 1050.
- [73] 常熙雯, 赵安鹏, 钟艳, 等. 高原低氧暴露后小鼠海马铁死亡相关通路的变化 [J]. 生理学报, 2024, 76(4): 507-516.
- [74] 周珂如. 红景天苷通过 HIF-1 α /HO-1 通路改善 NHIE 大鼠铁死亡的机制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [75] 梁白薇. 红景天苷抑制 H₂O₂ 诱导 HT₂₂ 神经细胞铁死亡初步研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2024.
- [76] Liu G W, Li Y H, Liao N, *et al.* Energy metabolic mechanisms for high altitude sickness: Downregulation of glycolysis and upregulation of the lactic acid/amino acid-pyruvate-TCA pathways and fatty acid oxidation [J]. *Sci Total Environ*, 2023, 894: 164998.
- [77] 张成慧, 邬云红, 王溯源, 等. 糖代谢对高原环境的适应与疾病 [J]. 四川大学学报: 医学版, 2024, 55(6): 1460-1468.
- [78] 巴合加玛力·努尔波拉提, 骆秦. 海拔与葡萄糖稳态的相关性: 流行病学证据与机制探讨 [J]. 新疆医学, 2025, 55(9): 1132-1136.
- [79] Zheng T, Yang X Y, Wu D, *et al.* Salidroside ameliorates insulin resistance through activation of a mitochondria-associated AMPK/PI3K/Akt/GSK3 β pathway [J]. *Br J Pharmacol*, 2015, 172(13): 3284-3301.
- [80] 高静媛, 杨雨旸, 杜晨光, 等. 不同浓度红景天苷对 II 型糖尿病大鼠骨骼肌磷脂酰肌醇-3-激酶及葡萄糖转运蛋白-4 表达的影响 [J]. 解剖学杂志, 2017, 40(6): 682-684.
- [81] Pooja, Sharma V, Meena R N, *et al.* TMT-based plasma proteomics reveals dyslipidemia among lowlanders during prolonged stay at high altitudes [J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 730601.
- [82] 刘文宁, 路璐, 谢玉霞, 等. 红景天苷对动脉粥样硬化小鼠 TLR4/NF- κ B 信号通路的影响 [J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2025, 23(24): 3734-3738.
- [83] Song T X, Wang P L, Li C Y, *et al.* Salidroside simultaneously reduces *de novo* lipogenesis and cholesterol biosynthesis to attenuate atherosclerosis in mice [J]. *Biomed Pharmacother*, 2021, 134: 111137.
- [84] 丁渝钊, 王亚婷, 刘伟丽, 等. 高原低氧环境暴露所致机体损伤对肠道微生态的影响及其关联性研究进展 [J]. 军事医学, 2024, 48(9): 690-694.
- [85] Sun T, Yang J Y, Lu L L. Salidroside improves antibiotic-induced gut microbiota disturbance and low levels of short-chain fatty acids in mice [J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3073.
- [86] 王子玥. 红景天苷基于肠道菌群及其代谢产物缓解呋喃诱导的肠-肝毒性的分子机制 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [87] Wang Y, Jiang Y, Li M X, *et al.* Rosavin derived from *Rhodiola* alleviates colitis in mice through modulation of Th17 differentiation [J]. *Phytomedicine*, 2025, 136: 156318.
- [88] 谭勇, 宁博, 陈学彬. 基于“肺与大肠相表里”探讨肠道菌群在肺动脉高压中的机制及中医药干预研究进展 [J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2025, 23(11): 1682-1688.
- [89] 强巴欧珠. 常规治疗联合藏药红景天口服液治疗高原肺水肿的效果 [J]. 中医药管理杂志, 2025, 33(22): 231-233.

- [90] 段炜, 孙书红, 惠增骞, 等. 黄芩苷与红景天胶囊对急性高原病预防作用比较 [J]. 武警医学, 2015, 26(1): 75-78.
- [91] 吴政宇, 王飞, 王德文, 等. 高原之上的忧郁: 海拔高度与抑郁风险的关系 [J]. 心理学报, 2024, 56(12): 1773-1787.
- [92] Qiao Y J, Cheng R Y, Li X H, *et al.* Plateau environment, gut microbiota, and depression: A possible concealed connection? [J]. *Curr Issues Mol Biol*, 2025, 47(7): 487.
- [93] 郭俊伟, 赵润平, 瞿伟. 平原官兵急进高原驻训期间心理状态及其影响因素 [J]. 西北国防医学杂志, 2018, 39(4): 241-245.
- [94] 高丽丽, 吴成翰, 廖远生, 等. 红景天胶囊调控 BDNF 信号通路的抗抑郁作用机制研究 [J]. 光明中医, 2022, 37(10): 1769-1773.
- [95] Zhang S J, Zhang L, Zhang H, *et al.* Hongjingtian Injection attenuates myocardial oxidative damage via promoting autophagy and inhibiting apoptosis [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2017, 2017: 6965739.
- [96] 张楚悦, 李蕾, 白宇, 等. 中药药对配伍减毒的理论内涵与现代研究进展 [J]. 中草药, 2026, 57(11): 4399-4410.
- [97] 王志斌, 唐文, 童康, 等. 基于病-证-症结合视域对方药配伍的思考 [J]. 北京中医药大学学报, 2024, 47(7): 929-933.
- [98] 孔秀梅, 姜一, 徐姣姣, 等. 麻花秦艽-红景天药对不同比例配伍抗缺氧作用及机制研究 [J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(18): 2473-2483.
- [99] 李晶, 李瑞刚, 睢博文, 等. 红参和红景天配伍前后主要成分及抗疲劳活性的变化 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(13): 87-96.
- [100] 冯颖童, 扈赜玺, 刘佳琪, 等. 西洋参红景天复配方对氧化损伤模型小鼠的抗氧化作用及机制 [J]. 国际老年医学杂志, 2024, 45(4): 397-402.
- [101] 史顶聪, 赵宏宇, 佟晓乐, 等. 红景天当归不同配伍对免疫低下小鼠免疫功能的影响 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(5): 28-33.
- [102] 吉钊, 孟新源, 李育, 等. 基于网络药理学和分子对接技术探究丹参-红景天抗心肌缺血的作用机制 [J]. 中国循证心血管医学杂志, 2024, 16(2): 133-139.
- [103] 赵倩琳, 赖颖蓉, 姜丽红. 基于网络药理学和分子对接探讨人参-红景天治疗心肌缺血/再灌注损伤的作用机制 [J]. 中国药理学通报, 2023, 39(5): 970-978.
- [104] 张影, 程宏发, 刘时祺, 等. 探讨“天麻-红景天”药对调控 TNF- α /NF- κ B 保护低灌注-脑小血管病模型小鼠内皮细胞屏障的作用机制 [J]. 北京中医药大学学报, 2024, 47(5): 611-624.
- [105] 曹昌霞, 王宏斌, 杨如意, 等. 益心方对模拟高原低氧环境大鼠相关指标及心肌损伤的干预作用 [J]. 环球中医药, 2019, 12(7): 994-998.
- [106] 孟盼盼, 郭建魁, 王荣, 等. 利舒康胶囊对模拟高原缺氧大鼠肺组织损伤的保护作用 [J]. 解放军医药杂志, 2020, 32(5): 9-13.
- [107] 张冬梅, 杨陈煜, 李晓琳, 等. 利舒康胶囊干预模型大鼠高原肺水肿的分子机制 [J]. 四川大学学报: 医学版, 2025, 56(5): 1326-1335.
- [108] 田贻婷, 孟盼盼, 蔡楠, 等. 利舒康胶囊通过 Nrf2/HO-1 途径减轻模拟高原缺氧大鼠心肌组织损伤 [J]. 实验动物科学, 2023, 40(5): 71-75.
- [109] 赵冰涵, 刘心竹, 次旦卓嘎, 等. 体力衰退型高原衰退症发病的影响因素及诊治现状 [J]. 医学信息, 2025, 38(2): 174-178.
- [110] Fan J L, Kayser B. Fatigue and exhaustion in hypoxia: The role of cerebral oxygenation [J]. *High Alt Med Biol*, 2016, 17(2): 72-84.
- [111] 朱啸川, 蔡拓, 易吉平, 等. 参茸景天复方酒剂抗运动性疲劳的作用研究 [J]. 医学动物防制, 2026, 42(3): 278-282.
- [112] Thu O K, Nilsen O G, Hellum B. *In vitro* inhibition of cytochrome P-450 activities and quantification of constituents in a selection of commercial *Rhodiola rosea* products [J]. *Pharm Biol*, 2016, 54(12): 3249-3256.
- [113] Jacobs T G, Marzolini C, Back D J, *et al.* Dexamethasone is a dose-dependent perpetrator of drug-drug interactions: Implications for use in people living with HIV [J]. *J Antimicrob Chemother*, 2022, 77(3): 568-573.

[责任编辑 赵慧亮]