

青稞对 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射小鼠造血功能的保护作用

赵亮星, 赵卿宇, 吴彤, 王晗, 薛勇, 沈群*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院 国家粮食产业(青稞深加工)技术创新中心 北京 100083)

摘要 目的:探讨青稞对辐射小鼠造血功能的保护作用。方法:以含 20%青稞饲料饲养 C57BL/6J 小鼠 12 周后,采用 4 Gy 剂量 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射全身。照射后继续干预 2 周,监测其体重、摄食量、外周血象、骨髓与脾脏组织形态、骨髓有核细胞数、脏器指数及血生化水平,以评价其造血功能恢复情况。结果:与辐射对照组相比,青稞干预后小鼠在辐照第 4 天体重明显恢复,第 1 周摄食量显著上升,总胆固醇(TC)水平明显恢复,小鼠的骨髓有核细胞数、红细胞、血红蛋白、白细胞及血淋巴细胞水平明显恢复,且小鼠骨髓结构损伤较小。同时,青稞干预可有效恢复辐照导致的脏器指数的异常并保护脾脏结构。本研究结果表明,青稞的预防性干预通过减轻小鼠辐照后脾脏组织形态的损伤、白细胞、淋巴细胞、脏器指数及血生化水平的异常来防止对免疫功能的损伤。通过恢复小鼠辐照后骨髓结构的损伤,促进骨髓有核细胞数及外周血红细胞的恢复来保护造血功能。结论:青稞预防性干预是通过保护机体免疫功能,有效恢复辐射引起的造血功能损伤。

关键词 青稞; 辐射损伤; 造血; 免疫

文章编号 1009-7848(2022)11-0145-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.016

电离辐射是指可以直接或间接地引起物质原子和分子发生电离的辐射,主要包括带电粒子的辐射和电磁波辐射,前者包括由正电子或负电子组成的 β 射线和由氦核组成的 α 射线,后者包括 γ 射线、X 射线和中子射线^[1-2]。生活在地球上的人类每时每刻都受到各种辐射的影响。根据人类生存环境中电离辐射的来源,可将辐射分为天然辐射和人工辐射源辐射。天然辐射是指来自人类生存的自然环境的电离辐射,如来自地面的放射以及来自外层空间的宇宙射线(0.20~1.24 mSv),世界人均天然辐射剂量约为 2.4 mSv/年,我国人均辐射剂量约为 2.3 mSv/年^[3];人工辐射,如核工业工人受到的辐射剂量约 1.5~2.75 mSv^[4],医疗领域的医用加速器的辐射剂量约 2 mSv/次。1990 年国际放射防护委员会(ICRP)60 号建议书规定:职业性与个人照射在任何一年内的有效剂量不得超过 50 mSv^[5]。胡国辉等^[3]认为 1~10 mSv/年是公众可以接受的辐射剂量的安全阈值区。另一方面,由于人体各组织对辐射的敏感程度不一样,辐射剂量(Sv)=吸收剂量(Gy)×Q(生物组织加权系数)。值得注意的是,放射治疗(1~60 Gy)在治疗疾病的同

时也会损害机体的正常细胞、组织与功能,当人类的全身吸收剂量达到 2~7.5 Gy(啮齿动物 3~10 Gy)时会发生造血功能障碍,是导致辐射死亡的主要原因^[6]。同时,辐射会对机体免疫系统造成损伤,出现免疫力低下等情况,且免疫功能对造血功能的恢复有重要作用^[7],促使照射后免疫功能的重建以及造血功能的恢复^[8]。

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. F.),又称裸大麦、米大麦、元麦,是禾本科大麦属一年生草本植物^[9],主要种植于西藏、青海以及四川、云南等地的高海拔地区,最高种植海拔可达 4 500 m,是藏区的主要经济作物。青稞富含多糖、多酚、生育酚和活性肽等生物活性物质^[10-11],具有提高免疫力^[12],调节体重^[13],抗菌^[14],抗氧化^[15],调节肠道健康^[16],抗肿瘤^[17]等作用。有研究表明,青稞多糖可通过促进脾细胞 DNA 和蛋白质合成,发挥对辐射损伤小鼠免疫功能的保护作用^[12]。青稞中含有的 β -葡聚糖常用作生物应答调节剂,可调节宿主免疫反应,增加辐射损伤小鼠内源多效造血干细胞的数量,发挥造血功能的保护作用^[18]。然而,青稞是否对辐射损伤小鼠的造血功能有保护作用尚不明晰。

本研究以 20%青稞饲料喂养 4 周龄 C57BL/6J 小鼠 12 周后,通过 4 Gy $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射小鼠,并继续喂养 2 周后观察青稞对小鼠生长发育、

收稿日期: 2022-08-03

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-06-14.5)

第一作者: 赵亮星,男,硕士生

通信作者: 沈群 E-mail: shenqun@cau.edu.cn

骨髓有核细胞数及外周血象指标等指标的影响,探讨青稞对 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射小鼠造血功能的保护作用。

1 材料与方 法

1.1 实验动物、材料与试剂

SPF级雌性4周龄C57BL/6J小鼠24只,体重16~18g,由维通利华提供。动物许可证编号:SCXK(京)2016-0006。

“藏青3号”青稞粉,由山西东方亮生命科技股份有限公司提供。AIN-93G基础饲料,购于常州鼠一鼠二生物科技有限公司。

PBS缓冲液,北京索莱宝科技有限公司;多聚甲醛,国药集团化学试剂有限公司;伊红,美国Sigma试剂公司;乙酸,德国Dr.Ehrenstorfer公司。

1.2 仪器及设备

3100型自动血生化分析仪,日本日立公司;Eclipse E100型显微镜,日本Nikon公司; $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照源,北京大学化学学院;EG1150H型体式石蜡包埋机,德国Leica公司;Centrifuge 5430R型高速冷冻离心机,德国Eppendorf公司;BC-5000Vet型兽用全自动血液细胞分析仪,深圳迈瑞生物医疗股份有限公司。

1.3 方 法

1.3.1 青稞基本营养成分的测定及青稞饲料的制作 青稞中的蛋白质根据GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的方法测定,脂肪根据GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的方法测定,膳食纤维根据GB 5009.88-2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》中的方法测定,粗多糖根据SN/T 4260-2015《出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚-硫酸法》中的方法测定, β -葡聚糖根据NY/T 2006-2011《谷物及其制品中 β -葡聚糖含量的测定》中的方法测定,总多酚根据T/AHFIA 005-2018《植物提取物及其制品中总多酚含量的测定 分光光度法》中的方法测定,灰分根据GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的方法测定,水分根据GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法测定。

正常对照组(NCD)饲料和青稞干预组(WGB)饲料的主要营养素和热量需保持一致,添加20%青稞粉后,相应减少纯化饲料中玉米淀粉、酪蛋白、麦芽糊精、大豆油、蔗糖的含量,饲料配方和供能比例见表1。WGB组饲料由常州鼠一鼠二生物科技有限公司代为配比加工。

表1 饲料配方
Table 1 Feed formula

	NCD组饲料		WGB组饲料	
	质量/g	热量/kJ	质量/g	热量/kJ
青稞	0.00	0.00	230.15	3 155.53
酪蛋白	140.00	2 344.16	110.77	1 854.73
L-半胱氨酸	1.80	30.14	1.80	30.14
玉米淀粉	495.69	8 300.84	352.52	5 902.64
麦芽糊精	125.00	2093	125.00	2 093.00
蔗糖	100.00	1 674.4	100.00	1 674.40
纤维素	50.00	0.00	29.54	0.00
大豆油	40.00	1 506.96	32.86	1 237.97
叔丁基氢醌	0.01	0.00	0.01	0.00
矿物质混合物(S10022M)	35.00	0.00	35.00	0.00
维生素混合物(V10037)	10.00	167.44	10.00	167.44
胆碱酒石酸氢盐	2.50	0.00	2.50	0.00
总计	1 000.00	16 116.94	1 030.15	16 115.85

1.3.2 动物实验设计及分组 小鼠饲养于北京大学医学部SPF级动物房,饲养条件严格按照《实验

动物管理条件》进行,实验方案得到中国农业大学实验动物福利与动物实验伦理审查委员会的批

准,批准编号为:AW71302202-5-2。小鼠适应性饲养 1 周后,随机分成 3 组,每组 8 只($n=8$)。正常对照组(NCD 组;未受过辐射暴露)与辐射对照组(IRC 组;经辐射暴露)均采用基础饲料喂养,青稞干预组(BWG 组;经辐射暴露)采用含 20%青稞的饲料喂养。饲养期间(12 周)小鼠自由进食和饮水,每周称重、记录摄食量。12 周后,除 NCD 组之外,IRC 组和 BWG 组小鼠进行一次全身辐照 4 Gy 剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射。照射后继续喂养 14 d,并于辐照后第 14 天眼眶取血后颈椎脱臼处死小鼠,收集小鼠肝脏、脾脏、胸腺等组织进行后续分析检测。

1.3.3 实验动物造模 除正常对照组小鼠外,其余所有小鼠分别置于单独的有机玻璃(3 cm×3 cm×11 cm)中,一次性全身辐照 4 Gy 剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线,吸收剂量率为 1 Gy/min,辐照时间为 4 min。

1.3.4 骨髓有核细胞计数 参照赵钦君^[9]的方法进行骨髓有核细胞计数。

1.3.5 外周血象的检测 分别于辐射前 1 天,照射后第 1,7 天和 14 天尾静脉取血 20 μL ,用兽用全自动血液细胞分析仪分析白细胞、红细胞、淋巴

细胞和血红蛋白变化水平。

1.3.6 免疫脏器指数测定 辐照后第 14 天,取出各组织器官,称重,计算脏器指数。

脏器指数=脏器质量(mg)/体重(g)。

1.3.7 骨髓和脾脏病理检测 辐照后第 14 天,参照冉媛媛^[9]的方法进行骨髓和脾脏病理检测。

1.3.8 血生化指标的检测 辐照后第 14 天后,将从眼眶采集的小鼠血液离心(3 000 r/min、15 min、4 $^{\circ}\text{C}$),获得的上清液即为血清,使用自动血生化分析仪测定血清中的总甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)水平。

1.4 数据统计与分析

统计结果以平均值±标准差($\bar{x} \pm s$)表示。用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,One-way ANOVA (Duncan multiple-range test)分析组间差异显著性($P<0.05$ 时被认为存在差异显著),并上标不同字母。用 GraphPad Prism 8.0.1 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 青稞基本营养成分

青稞基本营养成分如表 2 所示。

表 2 青稞粉的基本营养成分(g/100 g)

Table 2 Basic nutrients of <i>Hordeum vulgare</i> L. var. <i>nudum</i> Hook. F. powder (g/100 g)									
	碳水化合物	蛋白质	脂肪	膳食纤维	灰分	水分	β -葡聚糖	多酚	粗多糖
含量	62.20	12.70	3.10	8.89	1.80	11.30	2.13	0.33	9.74

2.2 青稞对辐照小鼠基本指标的影响

2.2.1 青稞对辐照小鼠体重及进食量的影响 如图 1a 所示,在未经过 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射的分组饲养期间,各组小鼠体重自然增加且无显著性差异。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射后,小鼠体重呈现先下降后上升的趋势,其中 IRC 组小鼠体重下降最为显著,且后期体重恢复较慢。辐照后 1 天,与 NCD 组相比,IRC 组与 BWG 组小鼠体重均显著性降低;辐照后 4 天,BWG 组小鼠体重明显增长,与 NCD 组相比无显著差异(图 1b)。在未经过 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射的分组饲养期间,各组小鼠摄食量无显著差异(图 1c)。辐照 1 周后,与 NCD 组相比,经辐照后小鼠进食量虽显著降低,但 BWG 组小鼠进食量显著高

于 IRC 组;辐照 2 周后,各组进食量无显著差异(图 1d)。图 1 说明 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射在一定程度上影响小鼠正常的饮食,从而导致一定时间内小鼠体重呈下降状态,青稞干预能较快的恢复小鼠进食量,并使体重恢复至正常。

2.2.2 青稞对辐照小鼠血生化指标的影响 血生化指标的稳态也是观测机体抗辐射损伤的重要指标,可以在一定程度上反映机体受辐照损伤的恢复程度^[20]。如图 2 所示,辐照 2 周后 IRC 组小鼠的血清 TC 水平显著低于 NCD 组小鼠,而 BWG 组与 NCD 组相比无显著差异。尽管各组血清 HDL-C、LDL-C、TG 水平无显著差异,但 BWG 组各项指标更接近 NCD 组。

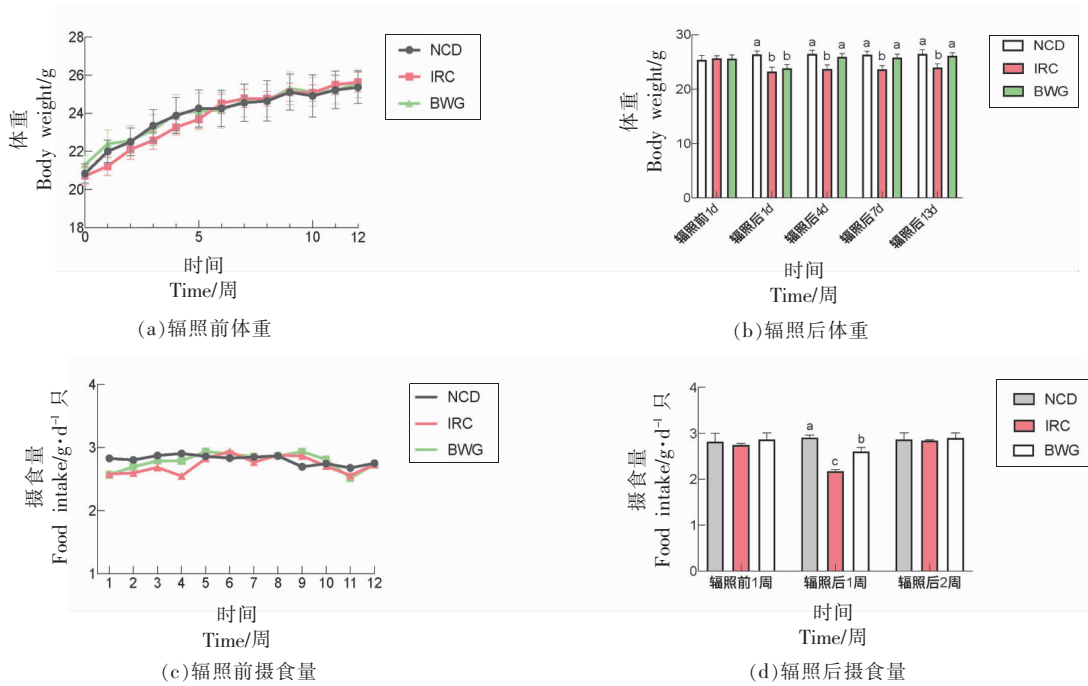


图1 饲养期间青稞对小鼠体重和摄食量的影响

Fig.1 The effects of highland barley on the body weight and food intake of mice during rearing

Liu 等^[21]以 350 mg/kg β-D-葡聚糖灌胃 6 Gy 碳离子辐照小鼠，结果发现其可缓解由辐射引起的体重下降。本研究中的青稞含有 2.13 g/100 g β-葡聚糖(表 2)，小鼠平均每日摄入含有 20% 青稞的饲料 2.8 g，相当于每日平均摄入约 477 mg/kg β-葡聚糖。由此可以推测青稞中的 β-葡聚糖可能具有一定的改善辐射副作用的能力。

2.3 青稞对造血功能的影响

2.3.1 青稞对造血及血细胞的影响 造血系统主

要由造血细胞与造血器官组成，骨髓产生的造血干细胞先分化形成各系定向祖细胞，后发育为各系幼稚细胞，进一步分化、成熟为红细胞、血红蛋白以及白细胞等各类血细胞^[7,22]。骨髓有核细胞数是指骨髓细胞中含有细胞核的细胞数量，体现机体造血功能状态^[19]。如图 3 所示，小鼠经 ⁶⁰Co-γ 射线照射后，小鼠骨髓有核细胞数均有不同程度地减少。与 IRC 组相比，BWG 组小鼠骨髓有核细胞数恢复显著，与 NCD 组无显著差异。

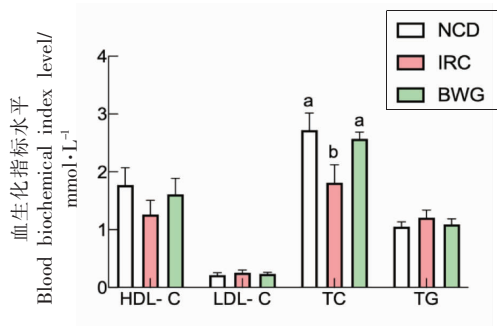


图2 青稞对小鼠血生化指标的影响

Fig.2 The effects of highland barley on blood biochemistry index of mice

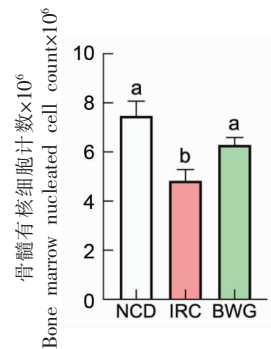


图3 青稞对小鼠骨髓细胞数的影响

Fig.3 The effects of highland barley on the number of nucleated cells in the bone marrow of mice

如图 4 所示, 辐射后各组红细胞数量快速下降, 在辐射后第 7 天下降到最低点, 随后逐渐上升; BWG 组红细胞数量上升速度明显高于 IRC 组 (图 4a)。血红蛋白含量也呈现同样的趋势 (图 4b)。对于白细胞数量而言, 辐射后各组白细胞数量急剧减少, 辐射后第 1 天即到达最低点, 之后缓慢上升, 第 14 天时 BWG 组白细胞数量显著高于 IRC 组 (图 4c)。小鼠淋巴细胞也呈现出与白细胞数量同样的变化趋势 (图 4d)。

红细胞的功能是运输氧、电解质以及葡萄糖和氨基酸等新陈代谢所必需的营养物质, 同时具

有增强吞噬作用, 提高防御能力, 防止感染等作用^[23]。白细胞的主要功能是防卫作用, 不同种类的白细胞以不同的方式参与机体的防御反应。淋巴细胞是白细胞的一种, 是体积最小的白细胞, 主要存在于淋巴管中循环的淋巴液中, 是机体免疫应答功能的重要细胞成分, 是淋巴系统几乎全部免疫功能的主要执行者^[24]。本研究表明青稞干预可以在一定时间内显著促进辐射小鼠红细胞、血红蛋白、白细胞及淋巴细胞水平的恢复, 有助于小鼠免疫功能的恢复从而保全造血功能。

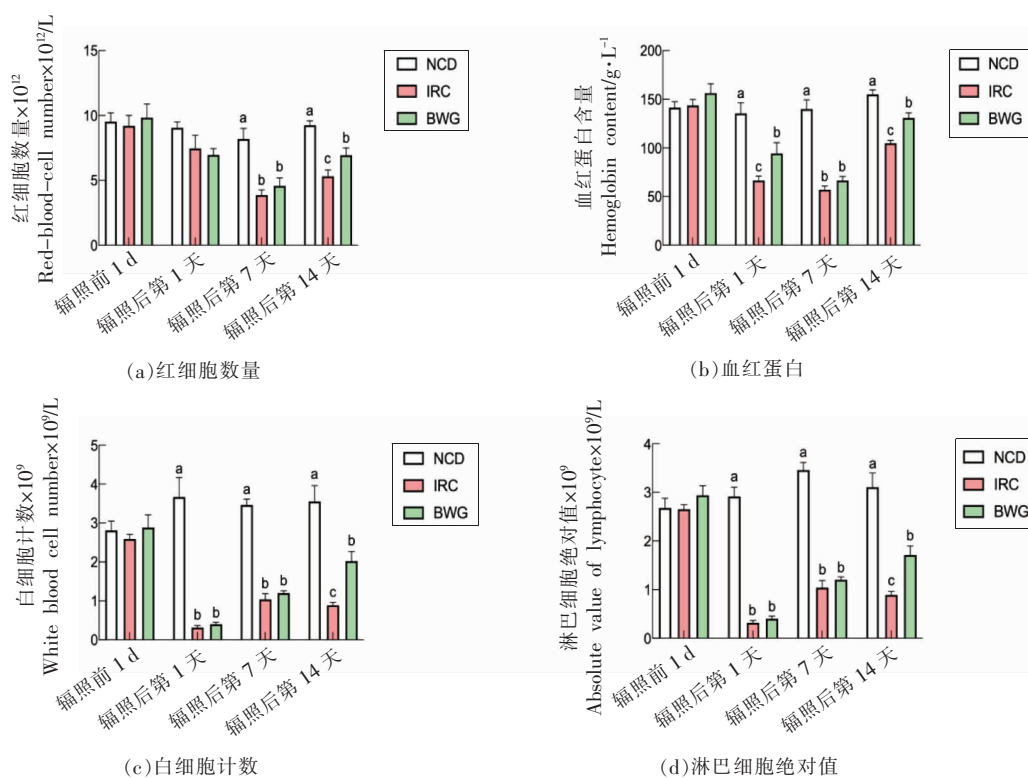


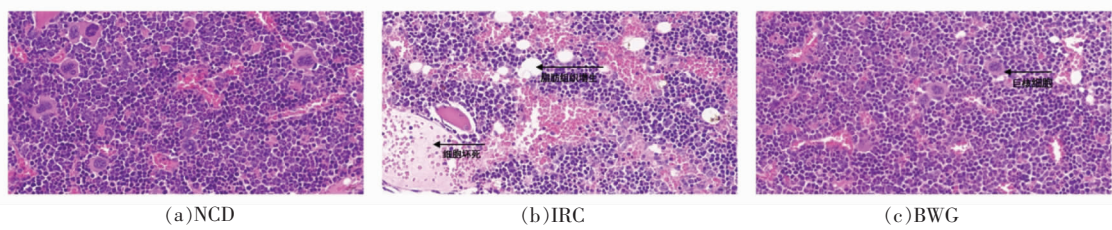
图 4 青稞对小鼠外周血象的影响

Fig.4 The effects of highland barley on the peripheral blood of mice

2.3.2 青稞对骨髓病理组织形态学的影响 如图 5 所示, 正常对照组小鼠的骨髓结构完好, 骨髓内由红系细胞及髓系细胞细胞填充, 并可见分布的巨核细胞。经 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射后, IRC 组小鼠胸骨骨髓出现明显的造血细胞坏死, 脂肪组织增生, 红系、髓系及巨核细胞数量明显减少, BWG 组小鼠脂肪组织增生明显少于 IRC 组, 造血细胞比例、形态和数量与 NCD 组基本一致。同时, 骨髓是白细

胞发育、分化及执行功能的场所^[24]。图 5 结果表明青稞干预可以保护骨髓结构以明显恢复白细胞数量发挥免疫功能, 从而发挥保全机体造血功能的作用, 与图 4 结果一致。

一些植物多糖具有增加小鼠骨髓有核细胞数量的功效。例如青稞中提取纯化的一种水溶性多糖能显著增加小鼠骨髓有核细胞数量^[25]; 当归多糖可调节细胞周期调控基因的表达, 以延缓 X 射



注:比例尺 20 μm ,物镜:40 \times 。

图5 青稞对小鼠骨髓病理组织形态学的影响

Fig.5 The effects of highland barley on the histomorphology of bone marrow in mice

线诱导的小鼠造血干细胞的衰老^[26],分别以 50, 100, 200 mg/kg 灵芝多糖灌胃经 5.0 Gy 剂量 X 射线辐照小鼠,能有效减轻电离辐射引起血细胞的损伤程度,且具有剂量效应关系^[27];采用 350, 875 mg/kg 及 1 750 mg/kg 酵母 β -葡聚糖灌胃 2 Gy 剂量碳离子束照射小鼠,发现 β -葡聚糖能有效恢复辐照小鼠外周血细胞的水平,并显著增加辐照小鼠的骨髓有核细胞数,从而发挥对造血功能的保护作用^[28]。本研究采用的青稞饲料中含有 9.74 g/100 g 粗多糖(表 2),相当于每日平均摄入约 2 181 mg/kg 多糖。由此可以推测青稞中的多糖尤其 β -葡聚糖可通过保护骨髓组织和促进骨髓细

胞增殖,发挥对辐照损伤小鼠的骨髓造血器官的保护作用,促进造血细胞的恢复,保护辐照小鼠的造血功能。

2.4 青稞对辐照小鼠免疫系统的影响

2.4.1 青稞对辐照小鼠脏器指数的影响 脏器指数可以在一定程度上反映器官功能的强、弱,肝脏、胸腺与脾脏是机体重要的免疫器官,同时与机体造血功能紧密相关^[29-30]。如图 6 所示,IRC 组小鼠肝脏脏器指数显著高于 NCD 组,脾脏脏器指数显著低于 NCD 组小鼠。BWG 组小鼠恢复肝脏及脾脏脏器指数的能力明显优于 IRC 组。表明青稞干预可以显著促进辐照小鼠脏器指数的恢复。

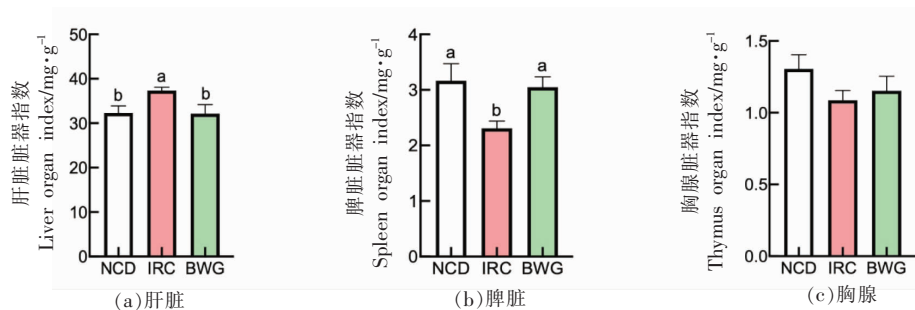


图6 青稞对小鼠脏器指数的影响

Fig.6 The effects of highland barley on the organ index of mice

2.4.2 青稞对脾脏病理组织形态学的影响 脾脏属于周围免疫器官,参与免疫细胞的成熟和分化,是免疫防御的重要场所^[31]。如图 7 所示,正常组小鼠脾脏白、红髓分界清晰,淋巴细胞分化完好,嗜碱性强。IRC 组小鼠脾脏白、红髓分界不清,白髓结构基本不可见,淋巴细胞减少。BWG 组小鼠脾脏白髓结构恢复,白髓淋巴细胞数显著增加,与 2.2.1 节青稞有助于恢复辐照小鼠血细胞的结论相一致。印证青稞的预防性干预是通过防止辐照

小鼠免疫功能损伤保全造血功能。

有研究表明,植物中的多糖、多酚具有提高免疫力的作用。如青稞多糖能显著提高免疫抑制小鼠的脾脏和胸腺重量指数,从而改善免疫抑制小鼠的免疫功能^[25]。安尚泽^[32]指出,出芽短硬霉(*A. Pullulans*)菌株产生的细胞外分泌型 β -葡聚糖可以提高小鼠免疫器官中胸腺和脾脏指数、血清和肝脏溶菌酶的活性、巨噬细胞的吞噬能力,减轻辐射对白细胞和淋巴细胞的杀伤,能促进白细胞和

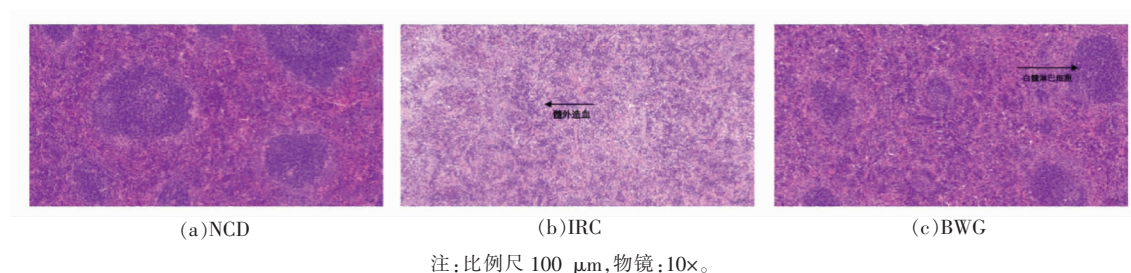


图 7 青稞全谷对小鼠脾脏病理组织形态学的影响

Fig.7 The effects of highland barley on the histomorphology of mouse spleen

淋巴细胞再生^[33],促进 IL-1、IL-6、TNF- α 的合成和释放,活化 T 淋巴细胞^[34],从而发挥提升免疫功能的功效。以 50, 100, 200 mg/kg 狗枣猕猴桃多酚对 6 Gy 剂量 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线照射小鼠进行灌胃,发现多酚提高了辐射小鼠的脏器指数、机体的免疫力,保护小鼠的造血系统^[35]。本研究采用的青稞含有 0.33 g/100 g 多酚(表 2),相当于每日平均摄入 74 mg/kg 多酚。推测青稞中含有的多糖尤其 β -葡聚糖与多酚可能通过保护免疫器官功能损伤,促进免疫细胞恢复,使机体免疫功能得到保全,从而防止机体造血功能的损伤。

3 结论与展望

青稞的预防性干预对辐照损伤小鼠的体重、辐照后进食量的影响较小,其可通过恢复免疫功能、血细胞水平、脏器指数与脾脏结构来减少辐照引起的机体免疫功能的损伤,通过明显恢复骨髓有核细胞数、外周血细胞数,减轻骨髓结构损伤,从而减少辐照引起的机体造血功能损伤。青稞属于日常性饮食谷物,本研究对青稞应用于辐射损伤的预防和辐射损伤后的恢复具有很强的现实意义。然而,本研究只探究了青稞干预对辐照小鼠造血系统的影响,研究仍然不够深入,有待于进一步开展更多的基础研究阐明机理。

参 考 文 献

- [1] HEI T K, WU L J, LIU S X, et al. Mutagenic effects of a single and an exact number of alpha particles in mammalian cells[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(8): 3765-3770.
- [2] 冉媛媛. 龙血竭及其提取物的药效作用和机制研究

[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

- RAN Y Y. Study on the pharmacodynamics and mechanism of dragon's blood and its extracts [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [3] 胡国辉, 张春霖. 公众的天然本底辐射问题[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2003, 24(5): 30-33.
- HU G H, ZHANG C L. On the problem of civil natural radiation[J]. Journal of Jinan University (Natural Science), 2003, 24(5): 30-33.
- [4] 杨连珍, 马吉增, 李桃生. 核工业系统职业性照射个人剂量监测(1991~2000)[J]. 辐射防护, 2005(2): 114-121.
- YANG L Z, MA J Z, LI T S. Individual dose monitoring of occupational exposure in nuclear industry system (1991-2000)[J]. Radiation Protection, 2005(2): 114-121.
- [5] 周永增. 国际放射防护委员会 1990 年建议书所用的剂量学量及所推荐的剂量限值[J]. 辐射防护通讯, 1992(4): 1-10.
- ZHOU Y Z. Dosimetry and recommended dose limits of the 1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection[J]. Radiation Protection Bulletin, 1992(4): 1-10.
- [6] ZHANG X H, TIAN M X, LI X, et al. Hematopoietic protection and mechanisms of ferrostatin-1 on hematopoietic acute radiation syndrome of mice[J]. Int J Radiat Biol, 2021, 97(4): 464-473.
- [7] 季屹红, 倪美鑫, 蔡晶, 等. 补康灵对辐射损伤小鼠造血功能的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(7): 184-186.
- JI Y H, NI M X, CAI J, et al. Effects of bukanling on hematopoietic function in radiation-injured mice[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2012, 18(7): 184-186.

- [8] 刘力源, 陈敏, 赵海田, 等. 天然产物抗辐射活性研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 269-274.
LIU L Y, CHEN M, ZHAO H T, et al. Recent advances in understanding the radioprotective effect of natural products[J]. Food Science, 2018, 39(17): 269-274.
- [9] 江春艳, 严冬, 谭进, 等. 青稞的研究进展及应用现状[J]. 西藏科技, 2010(2): 14-16.
JIANG C Y, YAN D, TAN J, et al. Research progress and application status of highland barley[J]. Tibet's Science and Technology, 2010(2): 14-16.
- [10] 侯殿志, 沈群. 我国 29 种青稞的营养及功能组分分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 289-298.
HOU D Z, SHEN Q. Analysis of nutrition and functional components of 29 kinds of highland barley in China[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(2): 289-298.
- [11] 冯格格, 余永新, 洪思慧, 等. 青稞中主要功效成分最新研究进展[J]. 农产品质量与安全, 2020(2): 82-89.
FENG G G, SHE Y X, HONG S H, et al. The latest reasearch progress of bioactive components in hullless barley[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2020(2): 82-89.
- [12] 黄晓舞, 白林, 温利青, 等. 青稞多糖对辐射损伤小鼠免疫功能的影响[J]. 解放军药理学学报, 2009, 25(6): 479-481.
HUANG X W, BAI L, WEN L Q, et al. The immuno-modulatory effect of polysaccharides from hulllessbarley on mice injured by radiation[J]. Pharmaceutical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2009, 25(6): 479-481.
- [13] 龚凌霄. 青稞全谷物及其防治代谢综合征的作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
GONG L X. Highland barley whole grains and its effects on prevention and treatment of metabolic syndrome[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [14] PEI J J, FENG Z Z, REN T, et al. Selectively screen the antibacterial peptide from the hydrolysates of highland barley[J]. Eng Life Sci, 2018, 18(1): 48-54.
- [15] 王新坤, 刘超, 杨清梅, 等. 日喀则市青稞全籽粒抗氧化品质研究[J]. 核农学报, 2020, 34(1): 120-130.
WANG X K, LIU C, YANG Q M, et al. Antioxidant capacity of highland barley in Shigatse[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(1): 120-130.
- [16] BIRD A R, JACKSON M, KING R A, et al. A novel high-amylose barley cultivar (*Hordeum vulgare* var. *Himalaya 292*) lowers plasma cholesterol and alters indices of large-bowel fermentation in pigs[J]. Br J Nutr, 2004, 92(4): 607-615.
- [17] CHENG D, ZHANG X Y, MENG M, et al. Inhibitory effect on HT-29 colon cancer cells of a water-soluble polysaccharide obtained from highland barley[J]. Int J Biol Macromol, 2016, 92: 88-95.
- [18] 王颖. 酵母 β -葡聚糖对辐射损伤小鼠的防护作用[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
WANG Y. Protective effect of yeast β -glucan on radiation-injured mice[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [19] 赵敏君. 载氢-纳米氧化铈微泡对小鼠造血系统抗辐射作用的研究[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2020.
ZHAO N J. Antiradiation effect of hydrogen-carrying-nano-cerium oxide microbubbles on mouse hematopoietic system[D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2020.
- [20] 夏梓铭. 天贝有效部位及抗辐射作用研究[D]. 广州: 广东药科大学, 2018.
XIA Z M. Study on the effective parts and anti-radiation effect of Tian Bei[D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University, 2018.
- [21] LIU F, WANG Z Z, LIU J, et al. Radioprotective effect of orally administered beta-D-glucan derived from *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Int J Biol Macromol, 2018, 115: 572-579.
- [22] 马清林, 吴国泰, 孙敏, 等. 当归补血作用研究进展[J]. 甘肃中医药大学学报, 2019, 36(3): 93-97.
MA Q L, WU G T, SUN M, et al. Enriching blood effects of Danggui (*Radix Angelicae sinensis*) [J]. Journal of Gansu University of Chinese Medicine, 2019, 36(3): 93-97.
- [23] CREMEL M, GUERIN N, HORAND F, et al. Red blood cells as innovative antigen carrier to induce specific immune tolerance[J]. Int J Pharm, 2013, 443(1/2): 39-49.
- [24] 相雪莲, 许丹宁, 曹楠, 等. 白术多糖对环磷酰胺诱导的免疫抑制小鼠白细胞数量及功能的修复作用[J]. 中国兽医杂志, 2020, 56(7): 2, 36-41.
XIANG X L, XU D N, CAO N, et al. The repair effect of polysaccharide of *Atractylodes macrocephala*

- koidz induced by cyclophosphamide on the number and function of white blood cells of immunosuppressive mice[J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2020, 56(7): 2, 36–41.
- [25] HAN L R, MENG M, GUO M Z, et al. Immunomodulatory activity of a water-soluble polysaccharide obtained from highland barley on immunosuppressive mice models[J]. Food Funct, 2019, 10(1): 304–314.
- [26] 张先平, 王乾兴, 陈斌, 等. 当归多糖对小鼠衰老造血干细胞细胞周期蛋白的调控[J]. 基础医学与临床, 2013, 33(3): 320–324.
- ZHANG X P, WANG Q X, CHEN B, et al. *Angelica sinensis* polysaccharides regulate aging of mice hematopoietic stem cell through cell cycle protein[J]. Basic & Clinical Medicine, 2013, 33(3): 320–324.
- [27] 于纯森, 董婉茹, 连莲, 等. 灵芝多糖抗电离辐射作用实验研究[J]. 辽宁中医药大学学报, 2019, 21(9): 40–43.
- YU C M, DONG W R, LIAN L, et al. Experimental study on anti-ionizing radiation of *Ganoderma lucidum* polysaccharide[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2019, 21(9): 40–43.
- [28] 刘芳. 酵母β-葡聚糖的碳离子辐射防护效应及相关机理研究[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2019.
- LIU F. Carbon ion radioprotective effect and related mechanism of yeast β-glucan[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [29] 耿艳艳, 谢振飞, 周羽, 等. 姜辣素对⁶⁰Coγ射线照射小鼠造血和抗氧化损伤的治疗作用研究[J]. 核农学报, 2012, 26(3): 34, 523–526.
- GENG Y Y, XIE Z F, ZHOU Y, et al. The therapeutic effects of gingerol on hematopoietic and antioxidative damage of ⁶⁰Co γ-rays irradiated mice [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(3): 34, 523–526.
- [30] 李解. 雅安藏茶及其茶褐素、茶多糖提取物对⁶⁰Coγ辐射损伤小鼠防护作用的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- LI J. Protective effect of Ya'an Tibetan tea and its theabrownin and tea polysaccharide extracts on ⁶⁰Coγ radiation injury in mice[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2017.
- [31] 许溟宇, 赵锐, 黄瑾, 等. 工频电磁场对人体免疫功能的作用[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 1999(6): 17–19.
- XU M Y, ZHAO R, HUANG J, et al. The effects of electromagnetic field on human immune function [J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 1999(6): 17–19.
- [32] 安尚泽. β-葡聚糖对小鼠抗氧化能力及非特异性免疫的影响[D]. 延边: 延边大学, 2012.
- AN S Z. Effects of β-glucan on antioxidant capacity and nonspecific immunity in mice[D]. Yanbian: Yanbian University, 2012.
- [33] 王颖, 陆栋, 魏巍, 等. 酵母β-葡聚糖对C离子辐射损伤小鼠免疫系统的防护作用[J]. 原子核物理评论, 2012, 29(3): 285–289.
- WANG Y, LU D, WEI W, et al. Protective effect of yeast β-glucan on immune system of mice irradiated by carbon ions [J]. Nuclear Physics Review, 2012, 29(3): 285–289.
- [34] PILLAI T G, DEVI P U. Mushroom beta glucan: Potential candidate for post irradiation protection[J]. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen, 2013, 751(2): 109–115.
- [35] 左丽丽, 李昆奇, 富校轶, 等. 狗枣猕猴桃多酚对⁶⁰Coγ射线辐射损伤小鼠免疫系统保护作用的研究[J]. 中国兽医杂志, 2020, 56(1): 15, 49, 107–112.
- ZUO L L, LI S Q, FU X Y, et al. The radioprotection of *Actinidia kolomikta* polyphenols against organism damage on the immune system by ⁶⁰Co γ-rays [J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2020, 56(1): 15, 49, 107–112.

Protective Effects of Highland Barley on Hematopoietic Function in Mice Irradiated with ^{60}Co - γ Ray

Zhao Liangxing, Zhao Qingyu, Wu Tong, Wang Han, Xue Yong, Shen Qun*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Center of Technology Innovation Deep Processing of Highland Barley in Food Industry, Beijing 100083)

Abstract Objective: To explore the protective effect of highland barley (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook.F.) on the hematopoietic function of irradiated mice. Methods: After feeding with 20% highland barley diet for 12 weeks, C57BL/6J mice were irradiated with ^{60}Co - γ rays at a dose of 4 Gy once, then continue to raise two more weeks. The body weight, food intake, peripheral blood image, bone marrow and spleen tissue morphology, bone marrow nucleated cell count, organ index and blood biochemical level were monitored to evaluate the recovery of hematopoietic function. Results: Compare with irradiation group, the body weight of the mice in highland barley intervention group was significantly recovered on the 4th day after irradiation, the food intake in the 1st week was significantly increased. Also, total cholesterol (TC), bone marrow nucleated cells, red blood cells, hemoglobin, white blood cells, and blood lymphocyte cell levels were significantly recovered, and the bone marrow structure had no significant damage. At the same time, highland barley intervention could effectively prevent the abnormal organ index and protect the spleen structure after irradiation. The studies have shown that the preventive intervention of highland barley can prevent the damage to immune function by reducing the damage of spleen tissue morphology, the abnormality of white blood cells, lymphocytes, organ indexes and blood biochemical levels after irradiation. And protect hematopoietic function by recovering the damage of bone marrow structure in mice after irradiation, and promoting the recovery of bone marrow nucleated cells and peripheral blood red blood cells. Conclusion: The preventive intervention of highland barley is to effectively recover the hematopoietic damage caused by radiation through protecting the immune function of the body.

Keywords highland barley; radiation injury; hematopoiesis; immunity