

王卫民, 王博远, 魏小鲁, 等. 低糖复配电解质水对急性慢性缺水大鼠的改善作用 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 315–324. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020107

WANG Weimin, WANG Boyuan, WEI Xiaolu, et al. Ameliorating Effect of Low Sugar Electrolyte Water on Acute and Chronic Dehydration in Rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 315–324. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020107

· 营养与保健 ·

# 低糖复配电解质水对急性慢性缺水大鼠的改善作用

王卫民<sup>1</sup>, 王博远<sup>1</sup>, 魏小鲁<sup>1</sup>, 赵夕颜<sup>1</sup>, 宗厚汝<sup>1</sup>, 王思元<sup>2</sup>, 邓建军<sup>3</sup>, 杨海霞<sup>1,\*</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

2. 元气森林 (北京) 食品科技集团有限公司, 北京 100191;

3. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所蔬菜生物育种全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**目的: 构建急性慢性大鼠缺水模型, 优化模型干预条件, 并评价对比了纯净水、茶饮料和低糖复配电解质水对急性慢性缺水大鼠的改善作用。方法: 通过测定血浆容量、血浆电解质离子总量、渗透压、肌酐 (creatinine, CRE)、血尿素氮 (blood urea nitrogen, BUN) 等指标, 确定构建急性慢性大鼠缺水模型的缺水时间、缺水水量等造模条件。分别给急性慢性缺水大鼠灌胃或自由饮用纯净水、茶饮料和低糖复配电解质水, 通过比较上述指标, 评价不同补液的改善作用。结果: 急性缺水大鼠的建模条件为缺水 60 h 后, 初始跑步速度 10 m/min, 10 min 内匀速加到 20 m/min, 共运动 30 min; 慢性缺水大鼠的建模条件为限制 50% 的每日饮水量, 持续 14 d。对急性缺水大鼠补液评价发现, 4 h 灌胃干预后, 三组补液均显著改善了急性缺水大鼠的血浆容量、血浆电解质离子总量降低和血浆渗透压升高, 低糖复配电解质水表现出更好的改善作用。此外, 低糖复配电解质水和茶饮料组显著降低了急性缺水大鼠 BUN 和 CRE 的升高, 纯净水组未表现出恢复趋势。对慢性缺水大鼠补液评价发现, 24 h 自由饮水后, 三组补液均能够显著改善慢性缺水大鼠的血浆容量下降和血浆渗透压升高, 低糖复配电解质水表现出更有效的改善作用。低糖复配电解质水还显著增加慢性缺水大鼠血浆电解质离子总量, 茶饮料和纯净水仅表现出恢复趋势。此外, 茶饮料和低糖复配电解质水显著降低慢性缺水引起中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白 (neutrophil gelatinase-associated lipocalin, NGAL) 和趋化因子 2 (chemokine 2, CCL2) 的表达升高, 指示其缓解肾脏炎症和损伤。结论: 低糖复配电解质水能够显著恢复急性缺水和慢性缺水大鼠的血浆容量降低、电解质流失和肾损伤, 研究结果为运动后急性缺水和长期慢性缺水状态人群的补液开发提供了理论思路。

**关键词:** 急性慢性缺水, 电解质, 肾损伤, 低糖复配电解质水, 改善作用

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)07-0315-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020107

本文网刊:



## Ameliorating Effect of Low Sugar Electrolyte Water on Acute and Chronic Dehydration in Rats

WANG Weimin<sup>1</sup>, WANG Boyuan<sup>1</sup>, WEI Xiaolu<sup>1</sup>, ZHAO Xiyan<sup>1</sup>, ZONG Houru<sup>1</sup>, WANG Siyuan<sup>2</sup>,  
DENG Jianjun<sup>3</sup>, YANG Haixia<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Genki Forest Beverage Co., Ltd., Beijing 100191, China;

3. State Key Laboratory of Vegetable Biobreeding, Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Objective: To construct a model of acute and chronic dehydration in rats, the intervention conditions of the model

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF1100205); 中国农业大学基本科研业务费专项资金资助 (2024TC158)。

作者简介: 王卫民 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: 15056039789@163.com。

\* 通信作者: 杨海霞 (1984-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: hyang@cau.edu.cn。

was optimized, the improvement effects of pure water, tea drink, and low-sugar compounded electrolyte water on rats with acute and chronic dehydration were evaluated. Methods: Plasma volume, total plasma electrolytes, osmolality, CRE, BUN, and other markers were measured to determine the modeling conditions, such as dehydration time and volume. Acute and chronic dehydrated rats were administered pure water, tea drink and low-sugar compounded electrolyte water by gavage or free drinking respectively. The improvement effects of different rehydration were evaluated by comparing the above markers. Results: The modeling conditions for rats with acute dehydration were 60 h of dehydration, followed by an initial running speed of 10 m/min, which was gradually increased to 20 m/min within 10 min, with the exercise lasting for 30 min. The modeling conditions for chronic dehydration in rats involved restricting daily water intake by 50% for 14 d. Evaluation of rehydration in acute dehydrated rats revealed that after 4 h of gavage intervention, all three rehydration groups significantly improved the reduced plasma volume, total plasma electrolyte ions and elevated plasma osmolality in acute dehydration rats, with the low-sugar compounded electrolyte water showing better improvement. Additionally, the low-sugar compounded electrolyte water and tea drink groups significantly reduced the elevated levels of BUN and CRE in acute dehydrated rats, while the pure water group did not show a trend of recovery. Evaluation of rehydration in rats with chronic dehydration showed that after free drinking for 24 h, all three rehydration groups significantly improved the decreased plasma volume and elevated plasma osmolality in chronic dehydrated rats, with the low-sugar compounded electrolyte water showing more effective improvement. The low-sugar compounded electrolyte water also significantly increased the total plasma electrolyte ions in chronic dehydrated rats, while the tea drink and pure water only showed a trend of recovery. Furthermore, the tea drink and low-sugar compounded electrolyte water significantly reduced the elevated expressions of *NGAL* and *CCL2* induced by chronic dehydration, indicating the alleviation of renal inflammation and injury. Conclusion: Low-sugar compounded electrolyte water could significantly restore the reduced plasma volume, electrolyte loss, and renal injury in rats with acute and chronic dehydration. The results of this study provided theoretical insights for the development of rehydration strategies for people experiencing acute post-exercise dehydration and long-term chronic dehydration.

**Key words:** acute and chronic dehydration; electrolyte; kidney injury; low-sugar compounded electrolyte water; ameliorating effect

水在体内具有多种生理功能,包括作为溶剂,帮助营养成分和其他物质在体内运输等<sup>[1]</sup>。通常在温和环境中,人体体重变化在正常值的 0.5% 左右,当水的摄入量较少或体内液体流失较多导致体重下降时,会出现急性或慢性缺水状态<sup>[2-3]</sup>。运动是导致急性缺水的常见因素之一,因其增加代谢产热并提高出汗量,最终导致缺水<sup>[4]</sup>。缺水可能会显著降低运动性能,并导致如低钠血症、认知功能障碍、新陈代谢减慢等健康问题<sup>[5-7]</sup>,严重缺水时会出现虚脱,甚至危及生命<sup>[8]</sup>。慢性缺水则由于长期液体摄入不足,往往不易察觉<sup>[9]</sup>。目前对于缺水的定义和诊断缺乏国际共识,血浆电解质离子总量是缺水的重要生物标志,反映电解质流失程度。血浆容量和血浆渗透压的直接测量是确定脱水的重要标准。此外,缺水影响肾脏的滤过和重吸收功能,BUN 和 CRE 也是衡量脱水的重要生物标志物<sup>[10]</sup>。

出于对人体安全和伦理的考虑,通常构建缺水动物模型来评价补液的改善效果<sup>[11-12]</sup>。目前用于研究的缺水大鼠模型主要利用甘露醇等化学试剂诱导,或通过热暴露及饮水限制诱导<sup>[13-14]</sup>。然而,急性缺水常发生于剧烈运动后,除体重变化外,还包括电解质紊乱、运动表现下降、能量代谢失调等问题,故需重新建立急性缺水模型<sup>[15]</sup>。大多数研究集中在利用运动构建急性力竭模型,但运动条件各不相同<sup>[16-17]</sup>。根据这些方法,采用初始跑步速度 10 m/min,10 min 内匀速加速至 20 m/min,共运动 30 min 的运动条件,

通过缺水辅助运动的方式构建急性缺水模型,探讨不同缺水时间对大鼠生理状态的影响,优化急性缺水大鼠的造模条件。目前用于构建慢性缺水动物模型的方法包括给动物饮用 2% 氯化钠溶液,通过长期盐负荷进行脱水,限制饮水量或间歇性断水干预等<sup>[18-19]</sup>。在限制饮水量的研究中,Vasilev 等<sup>[20]</sup>发现,对大鼠定时、连续和间歇限制饮水,14 d 后大鼠出现缺水状态。因此,本研究探讨不同日常饮水量持续 14 d 后对大鼠生理状态的影响,优化慢性缺水大鼠的造模条件,为不同补液的评价提供基础。

产生缺水状态后的补液选择充满争议,其中茶饮料是全球液体摄入量中仅次于水的第二大成分,自古以来就被认为是一种促进健康的饮料<sup>[21]</sup>。Takamata 等<sup>[22]</sup>研究表明,摄入绿茶饮料能够有效减少体液流失,对轻度缺水有显著的缓解作用。此外,随着功能运动饮料倍受关注,电解质补液对于缺水状态的改善效果被广泛研究<sup>[23-24]</sup>。研究表明,电解质补液中的离子浓度显著影响补液效果,钠离子浓度至少为 40 mmol/L 的补液有助于恢复运动性缺水患者的体液平衡<sup>[25]</sup>。电解质补液中的碳水化合物可以通过延长胃排空和肠道吸收来促进补液期间的液体储存,Evans 等<sup>[26]</sup>研究表明碳水化合物复配电解质水在恢复缺水引起的体液和电解质流失方面比单独饮用电解质水更有效。由此可见,碳水化合物和电解质离子的合适配比是补液效果的关键,然而,高钠和高碳水化合物摄入与高血压和心血管疾病风险增加密切相

关<sup>[27]</sup>, 因此探讨低碳水化合物和低钠含量的复配电解质水的改善作用更符合健康补水需求。本研究通过构建急性和慢性大鼠缺水模型, 首次系统评价了纯净水、茶饮料和低糖复配电解质水对缺水状态的改善作用, 不仅为理解不同补液对缺水状态的改善效果提供了新的科学依据, 而且为开发更健康的补液策略提供了重要的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

5~7 周龄 SD 雄性大鼠 维通利华实验动物技术有限公司, 实验动物生产许可证号为 SCXK(京) 2021-0011, 饲养环境室温 22~25 ℃, 相对湿度 45%~60%, 自然昼夜节律光照, 自由饮水摄食。所有程序均由中国农业大学实验动物福利与动物实验伦理审查委员会批准, 并根据其要求, 按照实验动物护理和使用指南执行; 低糖复配电解质水(碳水化合物 4.4 g/100 mL, 钠 38 mg/100 mL, 维生素 E1 40 mg α-TE/100 mL, 锌 0.4 mg/100 mL, 钾 ≥20 mg/100 mL) 市售; 茉莉花茶饮料(茶多酚 ≥280 mg/kg) 市售; 0.9% 生理盐水 中国医药集团有限公司; BUN 检测试剂盒、CRE 检测试剂盒 英科新创(厦门)科技有限公司; Trizol 试剂盒 南京诺唯赞生物科技股份有限公司; FastKing cDNA 合成试剂盒、荧光定量(SYBR Green)试剂盒 天根生化科技(北京)有限公司; 动物标准饲料 维通利华实验动物技术有限公司。

ZH-PT 动物跑台 安徽正华生物仪器设备有限公司; Multiskan FC 酶标仪 Thermo Scientific; GA-3 全自动血糖仪 三诺生物传感股份有限公司; ZG-TP203 电子天平 武义珠恒电子有限公司; TDZ4-WS 低温高速离心机 平凡科技有限公司; BS-830 全自动生化分析仪 深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司; Osmo210 自动进样渗透压仪 北京雅森博科科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 急性缺水大鼠模型缺水时间优化 36 只大鼠适应性喂养 3 d 后随机分为 6 组, 分别缺水 0、24、36、48、60、72 h, 期间自由饮食。缺水结束后按照初始跑步速度 10 m/min, 10 min 内匀速加到 20 m/min, 共运动 30 min 的条件运动, 运动结束后记录每组血浆容量变化, 进行外观、行为评分, 评分结束后眼球取血后脱颈处死。新鲜血液收集在含有 EDTA 抗凝剂的抗凝管, 摇匀后在 4 ℃, 3000 r/min 离心 10 min, 离心结束后取上清液即为血浆, 用于血浆电解质离子浓度、血浆渗透压、BUN、CRE 水平的测定。

1.2.2 低糖复配电解质水对于急性缺水大鼠的改善作用评价 30 只大鼠适应性喂养 3 d 后随机分为 5 组, 分别是对照组(control, CON)、模型组(model, MODEL)、纯净水组(pure water, PW)、茶饮料组(tea beverage, TB)和低糖复配电解质水组(elec-

trolyte water, EW), 对照组自由饮食饮水, 其余 4 组缺水 60 h, 期间提供自由饮食。缺水结束后, 按照 1.2.1 所述的运动条件运动。为控制相同的补水体积, 运动结束后, 补液组每隔 1 h 灌胃 10 mL 纯净水、茶饮料、低糖复配电解质水<sup>[28]</sup>, 模型组不予灌胃, 干预 4 次后记录每组血浆容量, 共计饮水干预 4 h<sup>[29]</sup>。干预结束后眼球取血后脱颈处死, 血液样品按照 1.2.1 步骤处理, 用于血浆电解质离子浓度、血浆渗透压、BUN、CRE 水平的测定。

1.2.3 慢性缺水大鼠模型缺水水量优化 24 只大鼠适应性喂养 3 d 后随机分 4 组, 分别是 100% 日常饮水量组、75% 日常饮水量组、50% 日常饮水量组和 25% 日常饮水量组。各组的 100% 饮水量通过记录自由饮水饮食时每日饮水量所得, 之后按照每组对应的饮水量限制饮水持续 14 d, 期间自由饮食, 饮水限制结束后记录每组血浆容量, 之后眼球取血后脱颈处死, 血液样品按照 1.2.1 步骤处理, 用于血浆电解质离子浓度、血浆渗透压、BUN、CRE 水平的测定。

1.2.4 低糖复配电解质水对于慢性缺水大鼠的改善作用评价 30 只大鼠适应性喂养 3 d 后随机分为 5 组, 分别为对照组(control, CON)、模型组(model, MODEL)、纯净水组(pure water, PW)、茶饮料组(tea beverage, TB)和低糖复配电解质水组(electrolyte water, EW)。对照组自由饮水饮食, 其余 4 组给予 50% 日常饮水量持续 14 d。慢性缺水结束后, 模型组继续缺水, 补液组大鼠分别给予纯净水、茶饮料、低糖复配电解质水的自由饮水干预 24 h, 对照组自由饮水饮食, 干预结束后记录每组血浆容量, 眼球取血后脱颈处死, 收集血液及肾脏组织, 血液样品按照 1.2.1 步骤处理, 用于血浆电解质离子浓度、血浆渗透压的测定, 肾脏组织用于 CCL2 和 NGAL 基因表达量的测定。

1.2.5 急性缺水大鼠缺水外观、行为评分 每只大鼠按照表 1 的各项状态进行评分<sup>[30]</sup>, 所得总和即为每只大鼠缺水状态的最终得分。

表 1 缺水外观和行为状态评分赋值  
Table 1 Water scarcity appearance and behavioral status score assignment

| 外观状态                     | 行为状态            | 分值 |
|--------------------------|-----------------|----|
| 正常的背部皮肤张力和状态             | 处理前和处理期间行为活跃    | 5  |
| 背部皮肤出现松弛                 | 活跃度下降, 对于处理反应敏捷 | 4  |
| 身体蜷缩, 出现毛发倒立, 中度背部皮肤张力松弛 | 无精打采, 对于处理反应不敏感 | 3  |
| 眼睛凹陷, 毛发倒立, 严重的背部皮肤松弛    | 没有反应, 只有在触摸时移动  | 2  |
| 不能控制自己                   | 触摸时不移动          | 1  |

1.2.6 血液指标检测 取 100 μL 血浆, 利用全自动生化分析仪检测钠、钾、氯离子浓度。取 100 μL 血浆, 采用自动进样渗透压仪测定血浆渗透压。各取 20 μL 血浆, 使用 BUN 试剂盒、CRE 试剂盒依据操



作说明对血浆中的 BUN 和 CRE 水平进行测定。

1.2.7 血浆容量及血浆电解质离子总量的计算 根据 Bijsterbosch 等<sup>[31]</sup>的方法,大鼠血浆容量和血浆电解质离子总量根据以下公式计算:

$$\text{血浆容量(mL)} = 0.0291 \times m + 2.54 \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{血浆电解质离子总量}(\mu\text{mol}) = PV \times c \quad \text{式 (2)}$$

式中:  $m$  为大鼠体重,  $g$ ;  $PV$  为血浆容量,  $mL$ ;  $c$  为大鼠血浆电解质离子浓度,  $mmol \cdot L^{-1}$ 。

1.2.8 RNA 提取与实时荧光定量聚合酶链式反应 (quantitative real-time polymerase chain reaction, qRT-PCR) 分析 取大鼠肾脏组织 20 g, 采用 Trizol 试剂盒说明方法提取 RNA, 利用 FastKing cDNA 合成试剂盒将 RNA 反转录成 cDNA, 以 cDNA 为模板进行 qRT-PCR 分析, 引物序列如表 2 所示。qRT-PCR 反应条件:  $95^{\circ}C$  15 min,  $95^{\circ}C$  10 s,  $60^{\circ}C$  30 s, 循环 40 次。以甘油醛-3-磷酸脱氢酶 (glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase, GAPDH) 为内参, 相对定量  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  分析法计算样品中各基因的相对表达量。

表 2 qRT-PCR 引物信息  
Table 2 qRT-PCR primers

| 基因    | 正向引物(5'→3')              | 反向引物(3'→5')               |
|-------|--------------------------|---------------------------|
| GAPDH | TCTCTGCTCCTCC<br>CTGTTCT | GATGGTGATGGGT<br>TTCCCGT  |
| CCL2  | GATCCCAATGAGT<br>CGGCTGG | ACAGAAGTGCTTGAG<br>GTGGTT |
| NGAL  | CAAGTGGCCGAC<br>ACTGACTA | CATTGGTCGGTGGGA<br>ACAGA  |

### 1.3 数据处理

用 GraphPad Prism 9.3 分析软件进行数据整理和分析, 数据均用平均数±标准偏差 (Mean±SEM) 表示。所有数据通过正态分布和方差齐性检验评估后, 采用 ANOVA 法和  $t$  检验进行单因素方差分析, 统计学意义水平  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 急性缺水大鼠模型缺水时间优化

2.1.1 缺水时间对大鼠外观和行为的影响 缺水会导致细胞萎缩, 导致皮肤失去弹性和恢复能力, 进而影响行动能力和活力。由图 1 可知, 随着缺水时间的增加, 大鼠的外观皮肤和行为状态评分总体呈现降低的趋势, 在 60 h 时相比于 0 h 分别显著降低了 30.0% 和 27.5% ( $P < 0.05$ ), Eda 等<sup>[32]</sup>研究发现脱水对皮肤外观和弹性以及自主神经和行为反应有影响, 与本研究结果相似。以上结果表明, 缺水 60 h 时大鼠的外观和皮肤已表现出显著的缺水状态。

2.1.2 缺水时间对大鼠血浆容量和血浆电解质离子总量的影响 随着缺水时间的增加, 水分的持续损失会造成大鼠血浆容量的减少和电解质的流失<sup>[33]</sup>。不

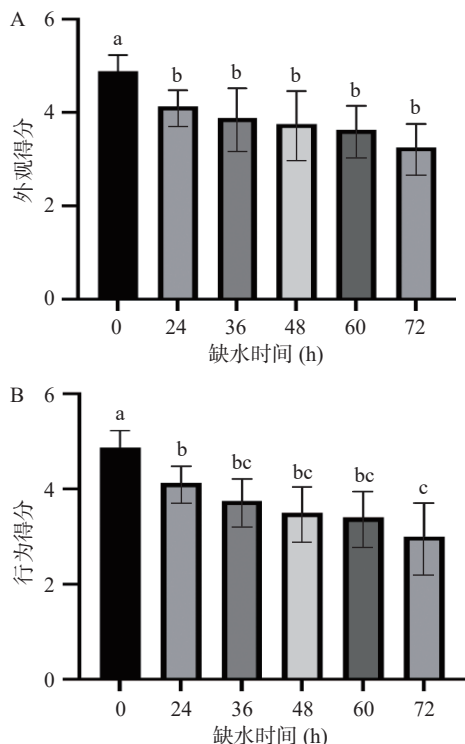


图 1 缺水时间对大鼠外观和行为的影响

Fig.1 Effect of dehydration time on the appearance and behavior of rats

注: 不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); 图 2~图 7 同。

同缺水时间对大鼠血浆容量和血浆电解质离子总量的影响见图 2。由图 2A 可知, 大鼠血浆容量在缺水 24 h 时显著降低 ( $P < 0.05$ ), 随着缺水时间的增加, 血浆容量的减少趋势趋于平缓, 在缺水 60 h 时相比于 0 h 显著降低了 20.0% ( $P < 0.05$ )。由图 2B 和 2D 可知, 血浆中钠、氯离子的总量在缺水 24 h 时显著减少, 相比于缺水 0 h 分别显著降低 12.8% 和 11.8% ( $P < 0.05$ ), 之后减少趋势趋于平缓, 在缺水 60 h 时相比于缺水 0 h 分别降低了 20.6% 和 15.6% ( $P < 0.05$ ), 且在缺水 72 h 时与缺水 60 h 时均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。由图 2C 可知, 血浆钾离子总量在缺水 48 h 前无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 在缺水 60 h 时相比于缺水 0 h 显著降低了 19.0% ( $P < 0.05$ )。以上研究表明, 在缺水 60 h 时, 血浆容量和血浆电解质离子总量都有显著下降, 指示其缺水状态的产生。

2.1.3 缺水时间对血浆其他指标的影响 渗透压必须通过体液平衡调节, 当处于缺水状态时, 血浆溶质浓度会迅速升高, 进而导致血浆渗透压上升<sup>[10]</sup>。大鼠的正常血浆渗透压在 290~310 mOSM/L 范围内, 当血浆渗透压高于 310 mOSM/L 时即发生高渗性缺水<sup>[34]</sup>。由表 3 可知, 随着缺水时间的增加, 大鼠血浆渗透压呈上升趋势, 在缺水 60 h 时达到了 330.6 mOSM/L, 比缺水 0 h 显著升高了 5.7% ( $P < 0.05$ ), 指示其缺水状态的产生。缺水还会引起肾功能损伤, 导致 BUN 浓度迅速升高<sup>[35]</sup>。随着缺水时间的增加, BUN 水平在缺水 60 h 时达到 8.80 mmol/L, 相比于缺水 0 h 显著升高了 40.1% ( $P < 0.05$ ), 但在缺水 72 h

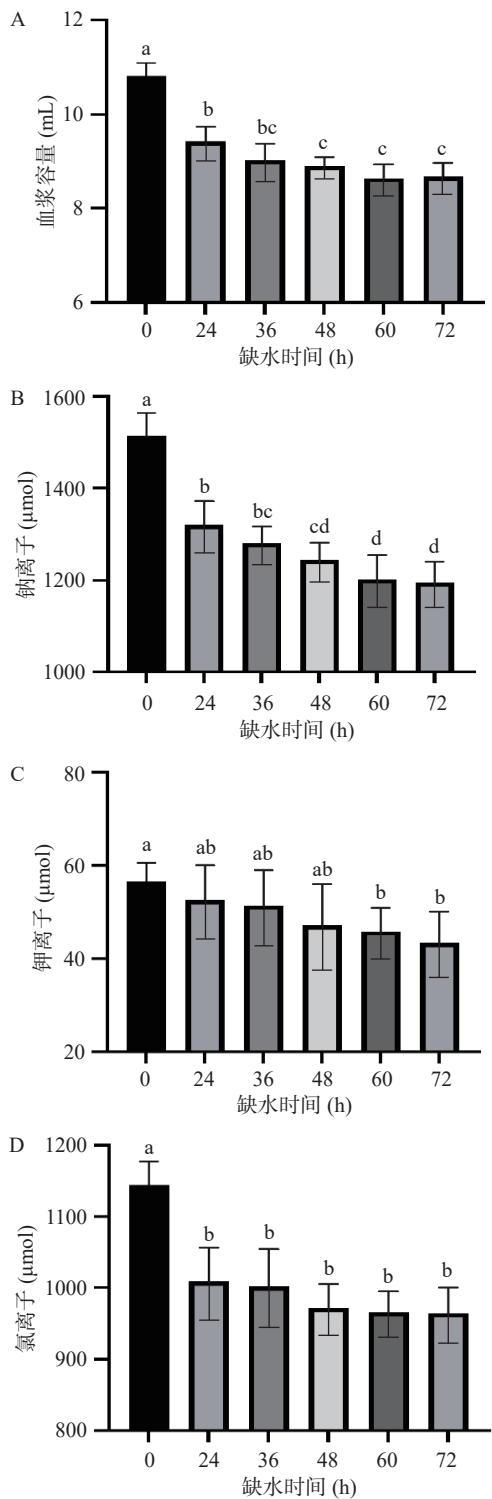


图2 缺水时间对大鼠血浆容量和血浆电解质离子总量的影响

Fig.2 Effect of dehydration time on plasma volume and total electrolyte ions of rats

注: A 血浆容量; B 钠离子总量; C 钾离子总量; D 氯离子总量。时下降。游离 CRE 在体内代谢主要通过肾小球滤过后随尿液排出, CRE 水平可用于评价肾功能状态<sup>[36]</sup>。随着缺水时间的增加,和缺水 0 h 相比, CRE 水平呈增加趋势,在缺水 36 h 时出现显著上升,在缺水 60 h 时达到 40.50 μmol/L,相比于缺水 0 h 显著升高了 52.1%( $P<0.05$ ),但在缺水 72 h 有所下降。BUN 和 CRE 水平在缺水 72 h 的下降可能是由

表3 缺水时间对大鼠血浆渗透压、BUN 和 CRE 的影响

Table 3 Effect of water deprivation time on plasma osmolality, BUN and CRE of rats

| 缺水时间(h) | 血浆渗透压(mOSM/L)             | BUN(mmol/L)             | CRE(μmol/L)              |
|---------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 0       | 306.80±3.47 <sup>b</sup>  | 6.30±0.32 <sup>b</sup>  | 26.60±2.04 <sup>b</sup>  |
| 24      | 320.60±2.66 <sup>ab</sup> | 8.10±0.44 <sup>a</sup>  | 30.80±2.76 <sup>ab</sup> |
| 36      | 325.40±4.04 <sup>a</sup>  | 8.50±0.39 <sup>a</sup>  | 37.20±1.45 <sup>a</sup>  |
| 48      | 328.30±0.80 <sup>a</sup>  | 8.60±0.56 <sup>a</sup>  | 38.30±2.37 <sup>a</sup>  |
| 60      | 330.60±8.29 <sup>a</sup>  | 8.80±0.52 <sup>a</sup>  | 40.50±4.46 <sup>a</sup>  |
| 72      | 333.60±3.47 <sup>a</sup>  | 7.80±0.54 <sup>ab</sup> | 30.80±4.99 <sup>ab</sup> |

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ); 表4~表5同。

于肾损伤发生不可逆的病理损伤后伴随着肾小球代偿性高滤过性,出现暂时性的过滤功能恢复,出现 BUN 和 CRE 水平的降低<sup>[37]</sup>。这些结果表明,在缺水 60 h 时,大鼠各指标已经出现显著的变化,指示其达到缺水状态,但在缺水 72 h 时,可能出现了肾脏的病理性损伤,因此综合考虑,选定缺水 60 h 为构建急性缺水大鼠模型的干预条件。

2.2 低糖复配电解质水对急性缺水大鼠的改善作用评价

2.2.1 不同补液 4 h 灌胃干预对急性缺水大鼠血浆容量和血浆电解质离子总量的影响 由图 3A 可知,模型组大鼠的血浆容量相比于对照组显著降低了 16.3%( $P<0.05$ ),三种补液均显著增加急性缺水大鼠的血浆容量,低糖复配电解质水组相比于模型组显著升高了 9.5%( $P<0.05$ ),并表现出更好的恢复趋势。由图 3B 可知,模型组大鼠的血浆钠离子总量相比于对照组显著降低了 18.6%( $P<0.05$ ),低糖复配电解质水组大鼠的血浆钠离子总量达到了 1783 μmol,相比于模型组显著升高了 11.4%( $P<0.05$ ),相比于纯净水组显著升高了 3.9%( $P<0.05$ )。由图 3C 和图 3D 可知,血浆钾离子和氯离子总量也呈现相同的变化趋势,低糖复配电解质水组相比于模型组分别显著升高了 26.3% 和 8.9%( $P<0.05$ ),相比于纯净水组显著升高了 8.8% 和 5.9%( $P<0.05$ )。以上结果表明,急性缺水会导致大鼠的血浆容量和血浆电解质离子总量显著下降,纯净水、茶饮料及低糖复配电解质水的补液干预均能够显著恢复血浆容量和血浆电解质离子总量的降低,同时低糖复配电解质水表现出了更显著的改善作用。

2.2.2 不同补液 4 h 干预对急性缺水大鼠血浆其他指标的影响 由表 4 可知,模型组大鼠的血浆渗透压、BUN 和 CRE 含量相比于对照组显著升高,分别上升了 6.4%、16.7% 和 22.6%( $P<0.05$ ),低糖复配电解质水对于血浆渗透压具有显著的恢复效果,且与纯净水和茶饮料相比更接近对照组水平,此时低糖复配电解质水组的血浆渗透压较模型组相比降低了 7.4%( $P<0.05$ )。此外低糖复配电解质水和茶饮料均能显著恢复 BUN 的水平,4 h 干预后分别降低至 5.22 和 5.20 mmol/L,相比于模型组降低了 17.8%

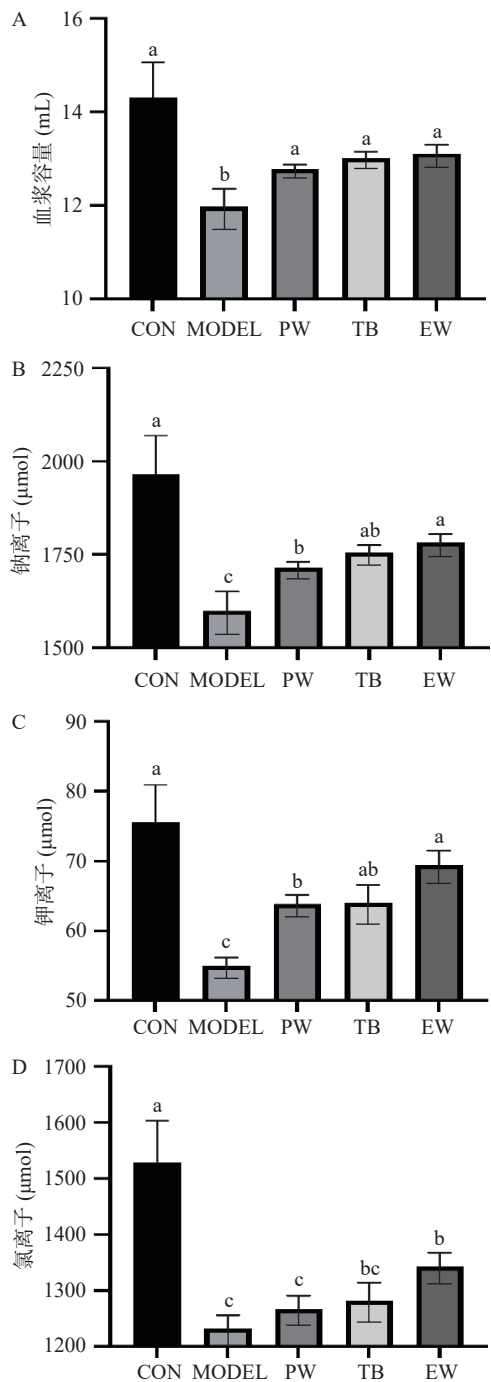


图3 不同补液4 h干预对急性缺水大鼠血浆容量和血浆电解质离子总量的影响

Fig.3 Effects of different rehydration interventions for 4 h on plasma volume and total plasma electrolyte ions in acute dehydrated rats

注: A 血浆容量; B 钠离子总量; C 钾离子总量; D 氯离子总量。和 18.1% ( $P<0.05$ ), 显著优于纯净水组 ( $P<0.05$ ); 对于 CRE, 三组补液均未显著恢复 CRE 含量 ( $P>0.05$ ), 但低糖复配电解质水和茶饮料仍然表现出恢复趋势, 相比于模型组分别降低了 6.2% 和 7.7% ( $P>0.05$ )。这些结果表明三种补液都能够显著改善急性缺水大鼠的血浆渗透压升高, 低糖复配电解质水和茶饮料可以有效恢复 BUN 和 CRE 水平, 相比于纯净水, 低糖复配电解质水和茶饮料对急性缺水引起的肾功能障碍具有更显著的改善作用。

表4 不同补液4 h干预对急性缺水大鼠血浆渗透压、BUN 和 CRE 的影响

Table 4 Effects of different rehydration interventions for 4 h on plasma osmolality, BUN and CRE in acute dehydrated rats

| 组别    | 血浆渗透压(mOSM/L)            | BUN(mmol/L)            | CRE( $\mu\text{mol/L}$ ) |
|-------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| CON   | 304.80±0.79 <sup>b</sup> | 5.42±0.23 <sup>b</sup> | 28.33±1.56 <sup>b</sup>  |
| MODEL | 324.30±3.37 <sup>a</sup> | 6.35±0.30 <sup>a</sup> | 34.67±1.73 <sup>a</sup>  |
| PW    | 294.50±1.98 <sup>b</sup> | 6.40±0.63 <sup>a</sup> | 36.50±2.86 <sup>a</sup>  |
| TB    | 295.30±2.65 <sup>b</sup> | 5.20±0.36 <sup>b</sup> | 32.00±1.32 <sup>ab</sup> |
| EW    | 300.20±2.56 <sup>b</sup> | 5.22±0.40 <sup>b</sup> | 32.50±1.69 <sup>ab</sup> |

### 2.3 慢性缺水大鼠模型缺水水量优化

2.3.1 不同日常饮水量干预对大鼠体重的影响 由图4可知, 14 d的干预后, 75% 和 50% 日常饮水量组大鼠体重在下降后呈现稳定上升的趋势, 在第14 d时显著低于 100% 日常饮水量组 ( $P<0.05$ ), 同时超过缺水前体重, 表明其能够恢复正常生理代谢状态, 而 25% 日常饮水量组大鼠的体重一直下降, 在第14 d时显著低于 75% 和 50% 日常饮水量组 ( $P<0.05$ ), 提示此饮水量的慢性干预可能导致其不可逆代谢紊乱, 从而影响到生长状态。

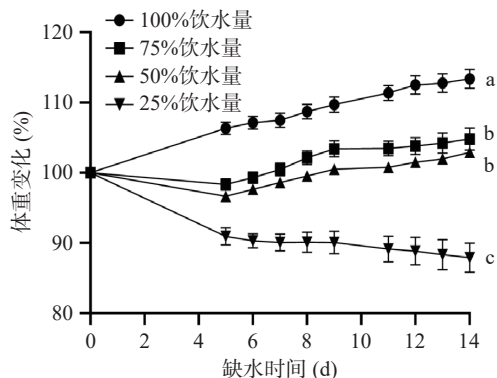


图4 不同日常饮水量对大鼠体重变化的影响  
Fig.4 Effect of different water intake on body weight changes in rats

2.3.2 不同日常饮水量对大鼠血浆容量及血浆电解质离子总量的影响 由图5可知, 大鼠日常饮水量越少, 大鼠的血浆容量损失越多, 二者呈正相关, 血浆电解质离子总量也呈现出相同的趋势。其中, 提供 50% 日常饮水量时, 血浆容量降低至 15.61 mL, 相比于 100% 日常饮水量组显著减少了 9.1% ( $P<0.05$ ); 血浆钠离子总量降低至 2150.40  $\mu\text{mol}$ , 相比于 100% 日常饮水量组显著减少了 10.5% ( $P<0.05$ ); 血浆钾离子总量降低至 82.53  $\mu\text{mol}$ , 相比于 100% 日常饮水量组减少了 1.6% ( $P>0.05$ ); 血浆氯离子总量降低至 1716.91  $\mu\text{mol}$ , 相比于 100% 日常饮水量组显著减少了 8.8% ( $P<0.05$ ), 这与 Bekkevold 等<sup>[30]</sup>的研究结果一致, 50% 的日常饮水量会导致显著的生理状态改变。这些结果表明日常饮水量越少, 血浆容量和血浆电解质离子总量降低越显著, 即缺水情况越严重。故在提供 50% 日常饮水量时, 血浆容量和血浆电解质

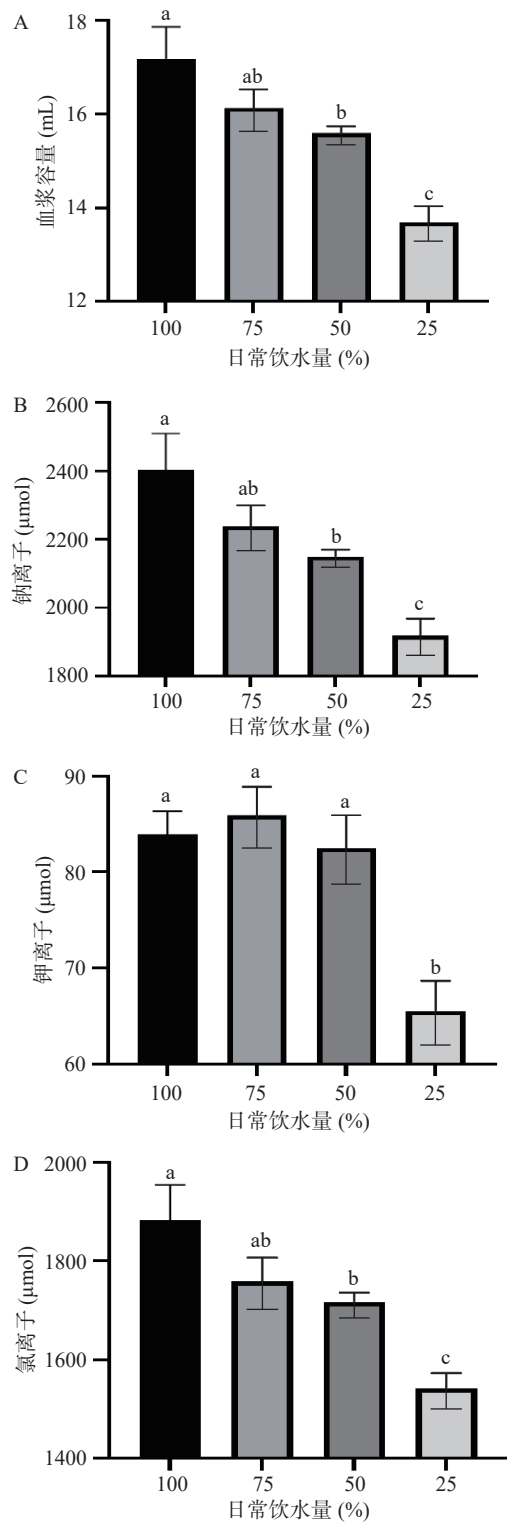


图 5 不同日常饮水量对大鼠血浆容量及血浆电解质离子总量的影响

Fig.5 Effect of different water intake on total volumes of plasma and electrolyte ions of rats

注: A 血浆容量; B 钠离子总量; C 钾离子总量; D 氯离子总量。  
离子总量已有显著下降, 指示其达到缺水状态。

2.3.3 不同日常饮水量对大鼠血浆其他指标的影响

由表 5 可知, 在 50% 日常饮水量的条件下, 血浆渗透压达到了 325.40 mOSM/L, 较 100% 日常饮水量组显著升高 5.65% ( $P<0.05$ ), 表明已达到了缺水状态; 然而, 各饮水量组的大鼠血浆 BUN 和 CRE 无显

著变化( $P>0.05$ ), 但也呈现了逐步升高的趋势, 可能是由于缺水干预时间较长, 机体进行自我调节, 导致 BUN 和 CRE 指标出现代偿性调节。故综合考虑, 选择 50% 日常饮水量作为慢性缺水大鼠模型的干预条件。并且由于 BUN 和 CRE 的变化不显著, 故选用 *CCL2* 和 *NGAL* 作为评价不同补液对于慢性缺水大鼠改善作用的指标。

表 5 不同日常饮水量对大鼠血浆渗透压、BUN 和 CRE 的影响

Table 5 Effects of different water intake on plasma osmolality, BUN and CRE of rats

| 日常饮水量 (%) | 血浆渗透压(mOSM/L)             | BUN(mmol/L)            | CRE(μmol/L)             |
|-----------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| 100       | 308.00±4.82 <sup>b</sup>  | 4.95±0.14 <sup>a</sup> | 32.17±1.81 <sup>a</sup> |
| 75        | 321.00±6.63 <sup>a</sup>  | 5.22±0.23 <sup>a</sup> | 34.43±1.11 <sup>a</sup> |
| 50        | 325.40±11.43 <sup>a</sup> | 5.06±0.07 <sup>a</sup> | 36.33±1.45 <sup>a</sup> |
| 25        | 331.70±4.46 <sup>a</sup>  | 5.20±0.18 <sup>a</sup> | 37.83±2.04 <sup>a</sup> |

2.4 低糖复配电解质水对于慢性缺水大鼠的改善作用评价

2.4.1 不同补液对于慢性缺水大鼠血浆容量、血浆电解质离子总量和血浆渗透压的影响 由图 6 可知, 相比于对照组, 模型组慢性缺水大鼠的血浆容量、血浆电解质离子总量显著下降, 血浆渗透压显著上升( $P<0.05$ )。由图 6A 可知, 24 h 自由饮水后, 相比于模型组, 三个补液组的血浆容量均显著升高 ( $P<0.05$ ), 其中, 低糖复配电解质水组升高至 15.43 mL, 相比于模型组升高了 12.5% ( $P<0.05$ ), 相比于纯净水组和茶饮料组分别升高了 3.28% 和 2.00%; 对于血浆电解质离子总量, 只有低糖复配电解质水组表现出了显著的恢复作用(图 6B~D), 相比于模型组, 钠、钾、氯离子总量分别提高了 8.8%、19.3% 和 9.4% ( $P<0.05$ )。此外, 由图 6E 可知, 三个补液处理组均表现出了显著改善血浆渗透压的能力, 其中低糖复配电解质水改善作用最为明显, 降低至 304.7 mOSM/L, 相比于模型组显著降低了 5.3% ( $P<0.05$ ), 较纯净水组降低了 0.9%, 相比于茶饮料组降低了 1.0%。

结果表明, 低糖复配电解质水能够显著恢复慢性缺水大鼠的血浆容量、血浆电解质离子总量和血浆渗透压, 其改善作用显著优于纯净水和茶饮料。

2.4.2 不同补液对于慢性缺水大鼠肾脏炎症及损伤的影响 慢性缺水会导致肾 MCP-1 和巨噬细胞浸润, 产生肾脏炎症, 进而导致近端肾小管损伤<sup>[38]</sup>。由图 7 可知, 相比于对照组, 模型组慢性缺水大鼠肾脏体重比、*CCL2* 和 *NGAL* 的表达水平显著上升 ( $P<0.05$ ), 指示其炎症和肾损伤的产生。由图 7A 可知, 24 h 自由饮水后, 低糖复配电解质水能够显著恢复慢性缺水大鼠的肾脏体重比( $P<0.05$ ), 而另外两种补液无显著差异( $P>0.05$ ), 指示低糖复配电解质水可缓解肾脏炎症。*CCL2* 对单核细胞和嗜碱性粒细胞



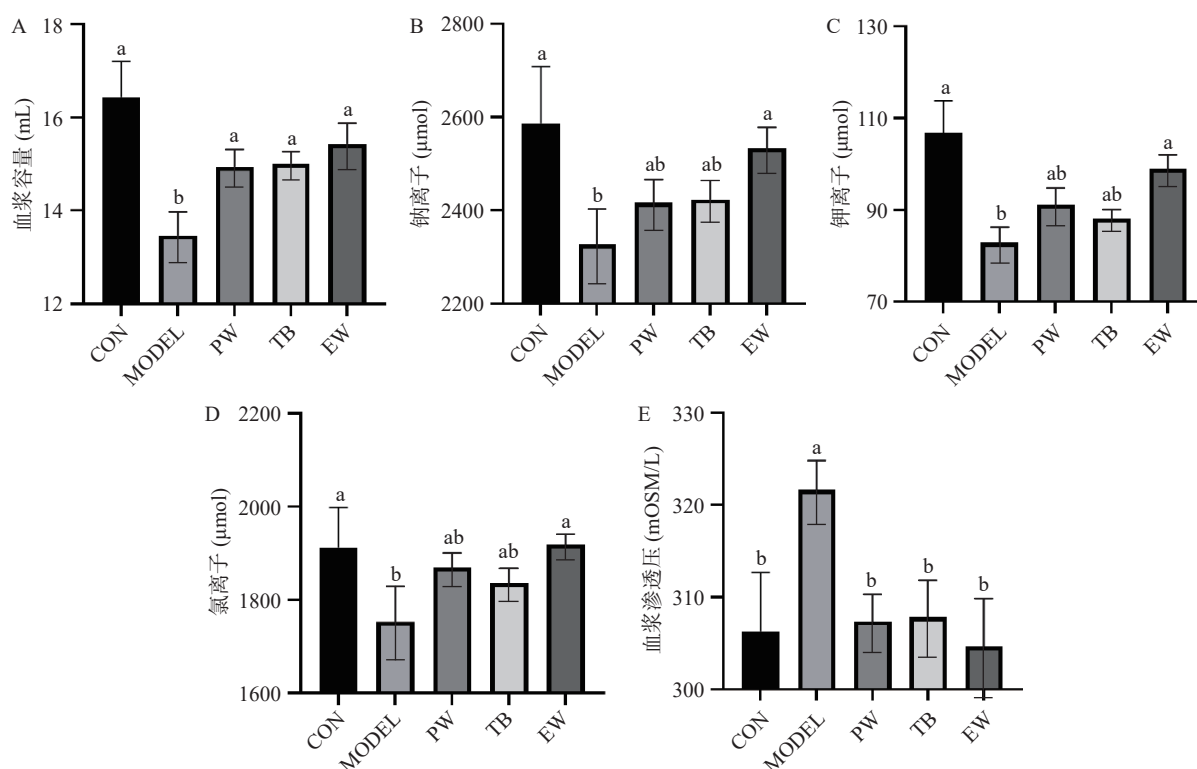


图6 不同补液 24 h 自由饮水干预对慢性缺水大鼠血浆容量、血浆电解质离子总量和血浆渗透压的影响

Fig.6 Effect of different rehydration intervention for 24 h on plasma volume, total plasma electrolyte ions and plasma osmolality in chronic dehydrated rats

注: A 血浆容量; B 钠离子总量; C 钾离子总量; D 氯离子总量; E 血浆渗透压。

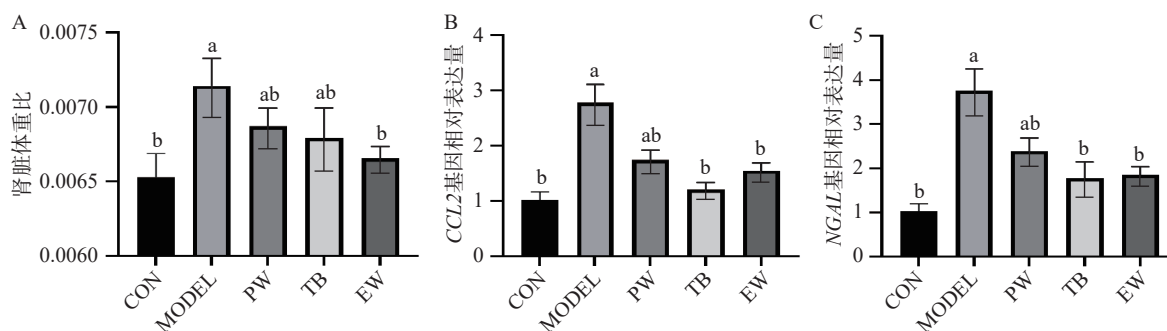


图7 不同补液 24 h 自由饮水干预对慢性缺水大鼠肾脏炎症及损伤的影响

Fig.7 Effect of different rehydration intervention for 24 h on renal inflammation and injury in chronic dehydrated rats

注: A 肾脏体重比; B 肾脏炎症因子 CCL2; C 肾损伤标志物 NGAL。

具有趋化活性,常在炎症反应中升高<sup>[39]</sup>,由图 7B 可知,茶饮料和低糖复配电解质水能够显著恢复慢性缺水引起的 *CCL2* 水平上升( $P<0.05$ ); *NGAL* 主要参与了早期肾脏上皮细胞的发生、生长,是反应肾损伤的重要标志物之一<sup>[40]</sup>,由图 7C 可知,茶饮料和低糖复配电解质水都能够显著降低 *NGAL* 的表达( $P<0.05$ ),指示茶饮料和低糖复配电解质水可有效缓解肾损伤,纯净水均未表现出显著的缓解作用( $P>0.05$ )。

以上这些结果表明,24 h 自由饮水后,低糖复配电解质水能够有效地改善慢性缺水大鼠的血浆容量和电解质流失,其效果显著优于纯净水和茶饮料。茶饮料和低糖复配电解质水还能够有效改善慢性缺水大鼠的肾损伤和炎症,效果强于纯净水。

### 3 讨论与结论

本实验通过血浆容量、血浆电解质离子总量、血浆渗透压、CRE、BUN 等为缺水指标,成功构建了急性慢性缺水大鼠模型。在对缺水大鼠进行补水干预的研究中发现,急性缺水大鼠在灌胃干预 4 h 以及慢性缺水大鼠在 24 h 自由饮水后,低糖复配电解质水在恢复血浆容量和血浆电解质离子总量方面表现优于纯净水和茶饮料,并且能够有效恢复肾脏功能,减轻肾脏炎症和损伤。这可能是由于低糖复配电解质水为等渗溶液,更易被快速吸收且电解质不易流失,并且在储存方面也表现出更好的效果。实验结果表明,低糖复配电解质水在恢复缺水大鼠体液平衡和肾脏功能中具有显著优势。

缺水会导致电解质离子交换紊乱,进而引起血



液中电解质储备失衡<sup>[41]</sup>,进一步导致细胞外液的流失,引起血浆容量的减少。血浆容量的减少与血浆渗透压和低水合水平的增加成正相关,进而引发高渗性低血容量状态<sup>[42]</sup>。目前,许多电解质饮料已被证实具有有效的补水效果。补充低糖电解质饮料能够缓解低氧运动引起的血浆容量减少,并有效降低运动后体温上升的幅度,减少汗液的产生,从而缓解缺水程度<sup>[43]</sup>。本研究发现,三种补液均能显著恢复缺水引起的大鼠血浆容量降低、电解质损失和血浆渗透压升高,并且低糖复配电解质水在恢复程度和能力上显著优于纯净水和茶饮料。同时运动后饮用纯净水会导致血浆渗透压和钠离子浓度下降,刺激尿液产生,从而延缓补水过程<sup>[44]</sup>,这与本文的研究结果一致。

肾脏是循环系统的重要器官,急性和慢性缺水都会破坏肾脏功能<sup>[45]</sup>。研究发现,在剧烈运动导致急性缺水的皮筏艇运动员中,血浆渗透压和 BUN 浓度显著升高<sup>[46]</sup>。在热应激诱导的缺水大鼠中,也发现 CRE 清除率显著下降,CRE 积累显著增加<sup>[47]</sup>。本研究发现,低糖复配电解质水和茶饮料都能够显著降低急性缺水引起的 BUN 和 CRE 水平升高,指示其改善肾脏功能的作用。在高温缺水的甘蔗工人中,摄入碳水化合物-电解质复配电解质饮料后,也发现其肾脏功能有所恢复<sup>[48]</sup>,与本文的研究结果一致。NGAL 是急性肾损伤的生物标志物,由中性粒细胞、巨噬细胞和树突状细胞等免疫细胞分泌,在肾小管损伤后和肾脏再生过程中释放<sup>[49]</sup>。此外,当肾组织受到刺激时,CCL2 的表达水平显著升高,且受促炎细胞因子控制<sup>[49]</sup>。在周期性限制饮水的大鼠体内,发现了 NGAL 的显著升高和炎症因子的显著表达<sup>[50]</sup>。本研究发现,低糖复配电解质水和茶饮料能够显著降低慢性缺水引起的 NGAL 和 CCL2 的表达升高,而纯净水并未展现出显著的缓解作用,低糖复配电解质水中的维生素和茶饮料富含的茶多酚可能是缓解肾损伤和炎症的重要原因之一。值得注意的是,本文也检测了 BUN 和 CRE 水平,结果显示无论是模型组还是补液干预组,都没有观测到显著变化,表明在一定程度上,肾脏可能通过代偿机制维持其基本功能,即使在缺水状态下也是如此。

综上所述,低糖复配电解质水在急性和慢性缺水大鼠中均能够显著恢复血浆容量降低、血浆电解质流失、肾功能下降和肾损伤等不良反应。但有关低糖复配电解质水对具体改善作用的信号通路或分子水平未进行深入研究,未来应针对此方面开展更多的基础实验和临床研究,为运动后急性缺水和长期慢性缺水状态人群的补液选择提供更多理论指导。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 参考文献

- [1] ÇITAR DAZIROĞLU M E, ACAR TEK N. Water consumption: Effect on energy expenditure and body weight management[J]. *Current Obesity Reports*, 2023, 12(2): 99–107.
- [2] FRITH J. New horizons in the diagnosis and management of dehydration[J]. *Age and Ageing*, 2023, 52(10): afad193.
- [3] BARON S, COURBEBAILLE M, LEPICARD E M, et al. Assessment of hydration status in a large population[J]. *The British Journal of Nutrition*, 2015, 113(1): 147–158.
- [4] TOMINAGA T, IKEMURA T, YADA K, et al. The effects of beverage intake after exhaustive exercise on organ damage, inflammation and oxidative stress in healthy males[J]. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 2021, 10(6): 866.
- [5] ARMSTRONG L E. Rehydration during endurance exercise: Challenges, research, options, methods[J]. *Nutrients*, 2021, 13(3): 887.
- [6] MAUGHAN R J, SHIRREFFS S M. Dehydration and rehydration in competitive sport[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2010, 20(s3): 40–47.
- [7] SCHOLZ H, BOIVIN F J, SCHMIDT-OTT K M, et al. Kidney physiology and susceptibility to acute kidney injury: Implications for renoprotection[J]. *Nature Reviews. Nephrology*, 2021, 17(5): 335–349.
- [8] BOLIGNANO D, ZOCCALI C. Vasopressin beyond water: Implications for renal diseases[J]. *Current Opinion in Nephrology and Hypertension*, 2010, 19(5): 499–504.
- [9] NAGAE M, UMEGAKI H, ONISHI J, et al. Chronic dehydration in nursing home residents[J]. *Nutrients*, 2020, 12(11): 3562.
- [10] LACEY J, CORBETT J, FORNI L, et al. A multidisciplinary consensus on dehydration: Definitions, diagnostic methods and clinical implications[J]. *Annals of Medicine*, 2019, 51(3-4): 232–251.
- [11] HARRIS P R, KEEN D A, CONSTANTOPOULOS E, et al. Fluid type influences acute hydration and muscle performance recovery in human subjects[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2019, 16(1): 15.
- [12] WEIDMAN J, HOLSWORTH R E, BROSSMAN B, et al. Effect of electrolyzed high-pH alkaline water on blood viscosity in healthy adults[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2016, 13: 45.
- [13] IORDACHE A M, BUGA A M, ALBULESCU D, et al. Phosphodiesterase-5 inhibitors ameliorate structural kidney damage in a rat model of contrast-induced nephropathy[J]. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 2020, 143: 111535.
- [14] OLESON S, COX A, LIU Z, et al. *In vivo* magnetic resonance imaging of the rat vocal folds after systemic dehydration and rehydration[J]. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2020, 63(1): 135–142.
- [15] LEBLANC G, LANDIS S. Development of choline acetyltransferase (CAT) in the sympathetic innervation of rat sweat glands[J]. *The Journal of Neuroscience*, 1986, 6(1): 260–265.
- [16] KIDO K, ATO S, YOKOKAWA T, et al. Acute resistance exercise-induced IGF1 expression and subsequent GLUT4 translocation[J]. *Physiological Reports*, 2016, 4(16): e12907.
- [17] LJONES K, NESS H O, SOLVANG-GARTEN K, et al. Acute exhaustive aerobic exercise training impair cardiomyocyte function and calcium handling in sprague-dawley rats[J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0173449.
- [18] COLOMBARI D S A, COLOMBARI E, FREIRIA-OLIVEIRA A H, et al. Switching control of sympathetic activity from forebrain to hindbrain in chronic dehydration[J]. *The Journal of Physiology*, 2011, 589(Pt 18): 4457–4471.

- [19] WU N, TASKER J G. Nongenomic glucocorticoid suppression of a postsynaptic potassium current via emergent autocrine endocannabinoid signaling in hypothalamic neuroendocrine cells following chronic dehydration[J]. *eNeuro*, 2017, 4(5): 0216–17.
- [20] VASILEV D, HAVEL D, LIEBSCHER S, et al. Three water restriction schedules used in rodent behavioral tasks transiently impair growth and differentially evoke a stress hormone response without causing dehydration[J]. *eNeuro*, 2021, 8(6): 0424–21.
- [21] KHAN N, MUKHTAR H. Multitargeted therapy of cancer by green tea polyphenols[J]. *Cancer Letters*, 2008, 269(2): 269–280.
- [22] TAKAMATA A, OKA A, NAGATA M, et al. Effect of fluid replacement with green tea on body fluid balance and renal responses under mild thermal hypohydration: A randomized crossover study[J]. *European Journal of Nutrition*, 2023, 62(8): 3339–3347.
- [23] GARRIGUET D. Changes in beverage consumption in Canada[J]. *Health Reports*, 2019, 30(7): 20–30.
- [24] PENCE J, BLOOMER R J. Impact of nuun electrolyte tablets on fluid balance in active men and women[J]. *Nutrients*, 2020, 12(10): 3030.
- [25] MAUGHAN R J, LEIPER J B. Sodium intake and post-exercise rehydration in man[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1995, 71(4): 311–319.
- [26] EVANS G H, JAMES L J, SHIRREFFS S M, et al. Optimizing the restoration and maintenance of fluid balance after exercise-induced dehydration[J]. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 2017, 122(4): 945–951.
- [27] ZYRIAX B C, WINDLER E. Lifestyle changes to prevent cardio- and cerebrovascular disease at midlife: A systematic review[J]. *Maturitas*, 2023, 167: 60–65.
- [28] TURNER P V, BRABB T, PEKOW C, et al. Administration of substances to laboratory animals: Routes of administration and factors to consider[J]. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science: JAALAS*, 2011, 50(5): 600–613.
- [29] BARNEY C C, SMITH G L, FOLKERTS M M. Thermal dehydration-induced thirst in spontaneously hypertensive rats[J]. *The American Journal of Physiology*, 1999, 276(5): R1302–1310.
- [30] BEKKEVOLD C M, ROBERTSON K L, REINHARD M K, et al. Dehydration parameters and standards for laboratory mice[J]. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science: JAALAS*, 2013, 52(3): 233–239.
- [31] BIJSTERBOSCH M K, DUURSMA A M, BOUMA J M W, et al. The plasma volume of the wistar rat in relation to the body weight[J]. *Experientia*, 1981, 37(4): 381–382.
- [32] EDA N, NAKAMURA N, INAI Y, et al. Changes in the skin characteristics associated with dehydration and rehydration[J]. *European Journal of Sport Science*, 2023, 23(4): 552–560.
- [33] 张真, 梁祎珩, 张君, 等. 预先补充不同液体对运动后机体水合状态的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2023, 42(6): 430–436.
- [34] ZHANG Z, LIANG Y Y, ZHANG J, et al. Effects of different pre-exercise fluid consumption on post-exercise hydration status[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2023, 42(6): 430–436.
- [35] GOTTSCHALK A, TOUNG T J K. Effects of volume replacement for urinary losses from mannitol diuresis on brain water in normal rats[J]. *Neurocritical Care*, 2021, 35(1): 24–29.
- [36] GUO C, CAI Q, LI Y, et al. A cross-sectional national health and nutrition examination survey-based study of the association between systemic immune-inflammation index and blood urea nitrogen levels in united states adolescents[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 13248.
- [37] FLOREZ I D, SIERRA J, PÉREZ-GAXIOLA G. Balanced crystalloid solutions versus 0.9% saline for treating acute diarrhoea and severe dehydration in children[J]. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2023, 5(5): CD013640.
- [38] WEN Y, PARIKH C R. Current concepts and advances in biomarkers of acute kidney injury[J]. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 2021, 58(5): 354–368.
- [39] RONCAL JIMENEZ C A, ISHIMOTO T, LANASPA M A, et al. Fructokinase activity mediates dehydration-induced renal injury[J]. *Kidney International*, 2014, 86(2): 294–302.
- [40] LÜ L L, FENG Y, WEN Y, et al. Exosomal CCL2 from tubular epithelial cells is critical for albumin-induced tubulointerstitial inflammation[J]. *Journal of the American Society of Nephrology: JASN*, 2018, 29(3): 919–935.
- [41] ROMEJKO K, MARKOWSKA M, NIEMCZYK S. The review of current knowledge on neutrophil gelatinase-associated lipocalin (NGAL)[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(13): 10470.
- [42] 李丁妮. 运动营养食品及其功能性成分研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(4): 119–121.
- [43] LI D N. Study on sports nutrition food and its functional components[J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(4): 119–121.
- [44] KENEFICK R W, CHEUVRON S N. Physiological adjustments to hypohydration: Impact on thermoregulation[J]. *Autonomic Neuroscience*, 2016, 196: 47–51.
- [45] 李建辉, 苗苗. 低氧运动及电解质饮料补充对血浆容量和体温的影响[J]. *体育科技*, 2019, 40(4): 20–21.
- [46] LI J H, MIAO M. Effects of hypoxic exercise and electrolyte beverage rehydration on plasma volume and body temperature[J]. *Sport Science and Technology*, 2019, 40(4): 20–21.
- [47] NOSE H, MACK G, SHI X, et al. Role of osmolality and plasma-volume during rehydration in humans[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1988, 65(1): 325–331.
- [48] HAROUTOUNIAN A, AMORIM F T, ASTORINO T A, et al. Change in exercise performance and markers of acute kidney injury following heat acclimation with permissive dehydration[J]. *Nutrients*, 2021, 13(3): 841.
- [49] KOMKA Z, SZILÁGYI B, MOLNÁR D, et al. Exercise-related hemoconcentration and hemodilution in hydrated and dehydrated athletes: An observational study of the hungarian canoeists[J]. *PloS One*, 2022, 17(12): e0277978.
- [50] SHAFEEK F, EL-KASHEF D H, ABU-ELSAAD N, et al. Epigallocatechin-3-gallate in combination with corticosteroids mitigates heat stress-induced acute kidney injury through modulating heat shock protein 70 and toll-like receptor 4-dependent pathways[J]. *Phytotherapy Research: PTR*, 2023, 37(8): 3559–3571.
- [51] KRISHER L, BUTLER-DAWSON J, YODER H, et al. Electrolyte beverage intake to promote hydration and maintain kidney function in guatemalan sugarcane workers laboring in hot conditions[J]. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2020, 62(12): e696–e703.
- [52] LIU Y, XU K, XIANG Y, et al. Role of MCP-1 as an inflammatory biomarker in nephropathy[J]. *Frontiers in Immunology*, 2024, 14: 1303076.
- [53] HILLIARD L M, COLAFELLA K M M, BULMER L L, et al. Chronic recurrent dehydration associated with periodic water intake exacerbates hypertension and promotes renal damage in male spontaneously hypertensive rats[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33855.