



“己糖碳链等分”教学法在糖酵解教学中的应用*

朱 笠^{1,2)}** 赫荣乔^{1,2)}**⁽¹⁾ 中国科学院生物物理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101; ⁽²⁾ 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049)

摘要 糖酵解是生物化学课程教学中有关葡萄糖代谢的重点内容之一, 也是微生物学、海洋生物学、动物学、细胞生物学、生物工程学等相关专业教学中所涉及的难点内容之一。糖酵解途径十分复杂, 有10个反应步骤, 参与的酶多, 中间产物多, 既消耗ATP又合成ATP。在现有教学中, 教师们通常按照糖酵解的反应步骤依次讲解(本文称顺序教学法, 简称顺序法), 导致教与学的效果不太理想。本研究聚焦糖酵解途径中葡萄糖的碳链变化, 提出一种新的教学思路: 从结果来看, 糖酵解就是一分子(6C)葡萄糖等分成为两分子(3C)丙酮酸的过程。要实现己糖分子的等分, 就需要在己糖碳链的首尾分别加上一个磷酸基团, 生成1,6-二磷酸果糖, 导致分子中间(C3-C4)发生化学键断裂, 产生两分子磷酸丙糖。之后发生的5步反应, 是磷酸丙糖经过磷酸基团转移等步骤生成丙酮酸。这种从“己糖碳链等分”入手进行糖酵解教学的方法, 称为“己糖碳链等分教学法”(简称己糖等分法)。招募研究生($n=63$)和本科生($n=39$)作为教学调研的被试, 他们在本科阶段均接受过“顺序法”教学。采用“己糖等分法”开展糖酵解的教学并进行问卷调查。结果显示, 在接受“己糖等分法”教学之前, 同学们普遍认为要理解和记住“糖酵解”的反应步骤比较困难, 要准确默写出“糖酵解”每一步化学反应就更加困难, 并且记住后又容易遗忘。采用“己糖等分法”教学和学习后, 绝大多数研究生感觉“糖酵解”的每一步反应都变得容易理解和记忆了, 并且要写出反应步骤变得相对简单。对本科生进行同样的教学与调研, 将其统计分析结果与研究生进行比较, 二者无显著差异($P>0.05$)。因此, “己糖等分”教学法能够让学生更容易理解糖酵解机理, 便于记忆, 也有助于培养学生自觉动脑、勤于分析的习惯, 从而获得更好的学习效果。

关键词 糖酵解, 葡萄糖, 丙酮酸, 教学方法**中图分类号** Q591.4, Q-4**DOI:** 10.16476/j.pibb.2024.0366

糖酵解(glycolysis)是葡萄糖代谢产生能量的途径之一, 也是糖代谢进入氧化磷酸化的前奏。该过程发生在细胞(如肝脏、肌肉、脑等)的胞质中。糖酵解又称糖的无氧分解, 但细胞在有氧情况下, 糖酵解也能进行。在通用的生物化学教材中, 糖酵解经历10个步骤, 生成丙酮酸, 同时产生少量能量(消耗一分子葡萄糖, 产生2个ATP和2个NADH, 其中2个NADH还可产生4个ATP)。丙酮酸是三羧酸循环(tricarboxylic acid cycle, 简称TCA cycle或Krebs cycle)的起始化合物, 通过发生在线粒体内膜上的氧化磷酸化, 被氧化成为 CO_2 和 H_2O , 同时产生大量的能量(消耗一分子葡萄糖, 最终可以产生38个ATP)。

糖酵解是生物化学课程教学中的重点和难点。许多教师在讲授糖酵解途径时, 通常按照教科书的10个生物化学步骤依次讲解^[1-7], 包括每个步骤涉及的反应物、产物和参与催化反应的酶(表S1)。

这种按照反应步骤依次讲解的方式, 其过程繁琐且复杂(顺序教学法, 简称“顺序法”)。

在教学中, 深入分析糖酵解途径, 理解关键化学反应及其机制, 就可能对糖酵解中的每一步化学反应进行推导, 这就有助于学习、记忆其中的反应物、产物、酶的催化等。面对糖酵解这一复杂途径, 要实现教学过程的简单明了、学生的准确理解、学习记忆效率的提高, 本研究提出了“己糖碳链等分教学法”(简称“己糖等分法”)。通过招募本科生和研究生作为被试, 采用“己糖等分法”讲授糖酵解, 经问卷调查比较“顺序法”和“己糖等分法”的教学效果, 结果显示“己糖等分法”获得了本科生和研究生的认可。

* 国家自然科学基金(32271200)资助项目。

** 通讯联系人。

赫荣乔 Tel: 13552534019, E-mail: herq@ibp.ac.cn

朱笠 Tel: 010-64888303, E-mail: zhuli@ibp.ac.cn

收稿日期: 2024-08-13, 接受日期: 2024-09-10

1 糖酵解途径的步骤分析

1.1 糖酵解途径的10个步骤

糖酵解途径的10个步骤包括参与各步骤的反应物、产物和参与催化反应的酶(图1)。在有氧

情况下,糖酵解第六步释放出的NADH发生脱氢氧化,产生 2H^+ 即通过电子传递体系氧化生成 H_2O ,同时释放4个ATP。在无氧情况下,第六步释放出的NADH即用来还原丙酮酸产生乳酸。

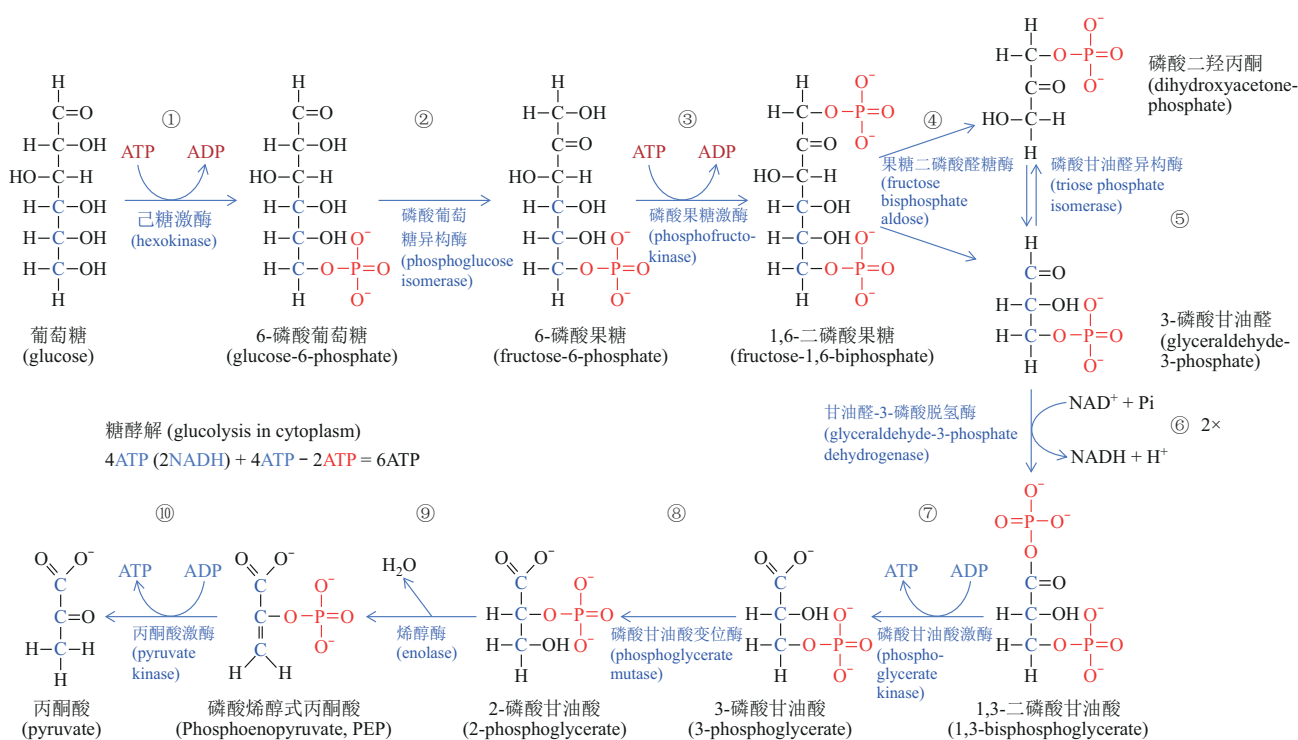


Fig. 1 The 10 successive reactions of glycolysis

图1 糖酵解途径的10步反应

图中展示了糖酵解每一步的反应物、产物、酶、消耗或释放ATP及磷酸基团在代谢产物上的位置。

1.2 糖酵解途径中己糖分子的碳链变化

糖酵解途径虽然复杂,但可以将其理解为:一分子葡萄糖裂解为两分子丙酮酸的过程(图2a),也就是位于己糖碳链中间C3-C4化学键发生断裂,将六碳(6C)糖链等分为两个三碳(3C)分子的过程^[3-5]。本研究聚焦糖酵解途径中葡萄糖的碳链变化,将己糖分子碳链的断裂总结为“己糖碳链的等分裂解”,简称“己糖等分”。

要实现C3-C4化学键的等分裂解,己糖分子的首(C1)和尾(C6)就需要分别结合一个(带负电荷)磷酸基团,使分子内的电荷分布发生改变,从而活化己糖分子。在己糖激酶的作用下,形成6-磷酸葡萄糖;葡萄糖分子发生异构,重排为6-磷酸果糖;在磷酸果糖激酶的作用下,生成化学性质十分活泼且不稳定的1,6-二磷酸果糖(图2b)。己

糖分子首尾的磷酸化,消耗两分子ATP。

1.3 己糖碳链的等分

1,6-二磷酸果糖的形成是糖酵解途径中最关键的环节,参与催化的1,6-二磷酸果糖激酶是一种别构酶,在整个糖酵解中起限速作用。1,6-二磷酸果糖激酶在体内受到多种效应剂的调节^[6-7]。1,6-二磷酸果糖在醛缩酶的作用下,其6C糖链中间(C3-C4)化学键裂解,生成两个带磷酸基团的3C糖,即磷酸二羟丙酮(DHAP)和3-磷酸甘油醛(GAP)。DHAP和GAP是同分异构体,在磷酸丙糖异构酶的催化下,二者可以互相转变。在糖酵解过程中,GAP被甘油醛-3-磷酸脱氢酶氧化成1,3-二磷酸甘油酸,其浓度迅速降低,导致DHAP被迅速转变为GAP,进入糖酵解途径的第二个阶段。

如果说糖酵解第一阶段的葡萄糖分子碳链变

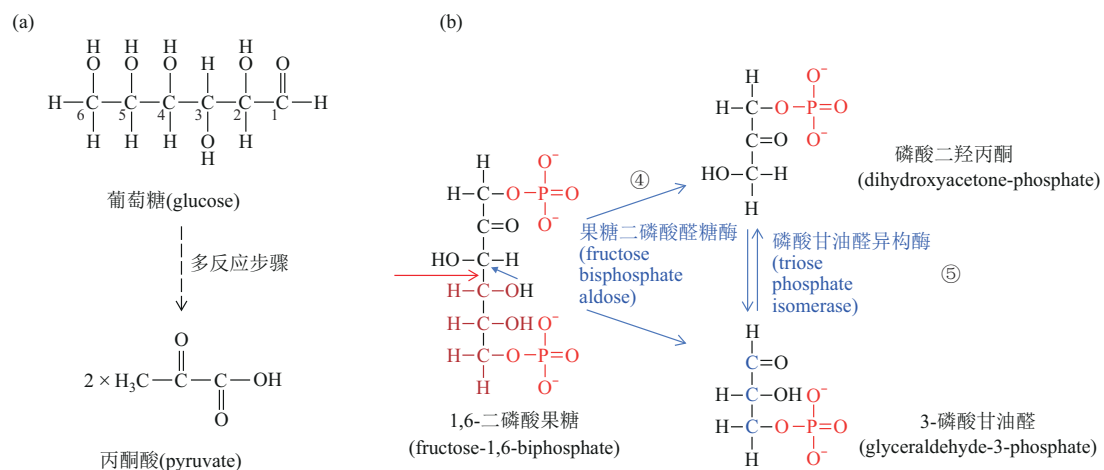


Fig. 2 The breakdown of the hexose carbon chain in glycolysis
图2 糖酵解途径中己糖分子的碳链变化

C4醇性羟基上的H转移到C3上 (a), 1,6-二磷酸果糖C3-C4化学键断裂, 形成磷酸二羟基丙酮和3-磷酸甘油醛 (b)。

化,是6C己糖等分为两个3C磷酸丙糖的过程,那么第二个阶段可以简述为:磷酸丙糖转移磷酸基团的过程,最终生成不含磷酸的丙酮酸。在这个阶段,3-磷酸甘油醛经历氧化、变位等反应,形成2-磷酸甘油酸,后者经烯醇化作用脱水,再将磷酸基团转移,即转化为3C丙酮酸。第二阶段是释放能量的过程,每个3-磷酸甘油醛产生两分子ATP和一分子NADH。因为糖酵解第一阶段产生2个3C糖,所以糖酵解最终产生4个ATP和2个NADH。

2 糖酵解途径的教学研究

2.1 糖酵解的“己糖等分法”教学大纲

- (a) 教学的目的和意义 (文件S1)
- (b) 概念:糖酵解是一分子葡萄糖裂解为两分子丙酮酸的过程。
- (c) 糖酵解第一阶段:关键反应是1,6-二磷酸果糖的形成。继而1,6-二磷酸果糖(C3-C4)碳链化学键断裂,等分为两个3C磷酸丙糖。这就可以理解为:从葡萄糖的活化,到6-磷酸葡萄糖、6-磷酸果糖、1,6-二磷酸果糖,这一系列步骤是实现己糖碳链等分的前提条件。首尾磷酸化的己糖变得十分不稳定,从而发生己糖碳链等分裂解,因此糖酵解第一个阶段的5个步骤也就比较容易理解和掌握了。
- (d) 糖酵解第二阶段:磷酸基团的转移。糖酵解第一阶段形成的磷酸丙糖,其磷酸基团发生转移,并产生能量分子ATP,最终生成不含磷酸基团的丙酮酸。据此,糖酵解第二阶段的5个步骤也就容易理

- 解了。
- (e) 在理解以上两个阶段的基础上,将整个糖酵解途径串起来讲一遍,形成一个连续的整体概念。其目的是阐述各反应步骤的机制,参与催化反应的酶及其结构与功能,从而实现理解和掌握糖酵解的理论及其过程。
- (f) 糖酵解过程中产生ATP的机制和计算过程 (文件S1)

2.2 糖酵解教学法评价问卷的设计、调研和分析方法

本研究在问卷设计环节采用理解程度指数、记忆程度指数、学习效果指数等来测评本科生和研究生对两种糖酵解教学法的评价情况。我们采用量表形式,5点计分,分数越高表示评价越高^[8]。

在己糖等分教学前问卷(文件S2中课堂问卷一,简称问卷一)中,首先通过三个“是/否”问题,确定被试范围,即曾经学过糖酵解途径的学生,并初步确定学过糖酵解途径的学生对这一生化过程是否还有记忆。然后通过两个计分问题,让学生评价当年通过“顺序法”学习糖酵解的理解程度和记忆情况(即写出糖酵解的化学反应式)。

在己糖等分教学后问卷(文件S2中课堂问卷二,简称问卷二)中,与问卷一的评价问题一一对应,首先通过2个计分问题,让学生评价采用“己糖等分法”学习糖酵解后的理解程度和记忆情况。然后,设计3个计分问题,让学生评价“己糖等分法”的学习效果、记忆的难易程度和应试能力(即

考试是否更容易获得好成绩)。

为了比较传统的“顺序法”和“己糖等分法”的优缺点,本研究招募研究生(只包括:中国科学院大学生命科学学院2023级研究生,简称国科大研究生)和本科生(包括两组:a.中国科学院大学生命科学学院2021级本科生,简称国科大本本科生;b.北京中医药大学大学生命科学学院2021级本科生,简称北中医本科生)作为教学调研的被试。调研方式:课堂现场直接发放问卷,填写后立即收回。另外,为了问卷获得更为真实的结果,本研究采用了无记名、无性别、无年龄问卷。在采用“己糖等分法”教学前,请同学们回答问卷一的问题,然后采用“己糖等分法”讲授糖酵解,最后请同学们回答问卷二的问题。

本研究一共收集到113份问卷,包括:国科大研究生73份(其中10份问卷一显示未学过糖酵解)、国科大本本科生21份(其中1份问卷一显示未学过糖酵解)、北中医本科生19份(均显示学过糖酵解)。排除未学过糖酵解的问卷,对余下102份有效问卷进行分析,其中研究生共63份,本科生共39份。由于在测试之前,学生被试不清楚“顺序法”和“己糖等分法”的含义,所以本研究采用当堂确认的方式进行核实。所有学生被试在当年学习糖酵解时,他们的教师均采用了“顺序法”教学方式;所有学生中无一人知晓“己糖等分法”。

采用问卷表面直观判断和计算选项分值两种方式相结合对每份问卷进行检阅^[8]。a.对问卷一和问卷二各问题答案选项所占总数的百分比进行计算并作图。b.对各问题的答案选项1~5分别赋分值为1~5,计算所有选项的平均值(mean)和标准差(SD),然后进行组间比较。使用软件Microsoft Excel进行数据录入和处理,使用软件GraphPad Prism中的unpaired *t* test进行统计学分析。

2.3 己糖等分教学前问卷结果

问卷一的调查结果显示,被试均在生物化学课程中学习过糖酵解(问卷一第1题,个别未学过糖酵解的问卷已排除,不参加统计分析)。74.53%的同学回答在考试中遇到过糖酵解相关的考题,但81.18%的同学不记得当年考题(问卷一第2题和第3题)。在教学试验前,询问每一位被试,是否能够回忆起“糖酵解”过程的化学反应步骤。回答显示,他们几乎或者全部忘记了糖酵解的生化反应步骤。采用询问是为了防止问卷出现假阳性。如果有学生回答还记得,教师会追问,让其回答反应

步骤。

问卷一询问了学生当年学习糖酵解后,对整个过程的理解程度(第4题)。结果显示,102份问卷中,认为非常困难和困难的有7.8%和30.4%,这两组之和为38.2%(图3d),在北中医本科生中,认为非常困难和困难的两组之和为42.1%(图3a),在国科大本本科生中,这一比例是45.0%(图3b),国科大研究生为35.0%(图3c)。在所有学生中,认为一般的有50.0%,在北中医本科生中是52.6%,在国科大本本科生和研究生中分别是45.0%和50.8%;而所有学生中认为容易和很容易的分别为9.8%和2.0%(图3d)。这说明当年通过“顺序法”学习后,35%~45%的学生认为真正理解“糖酵解”是比较困难的,认为容易的不到15%。

对糖酵解理解程度各选项得分的统计分析显示,本科生的平均得分分别是 2.53 ± 0.75 和 2.50 ± 0.87 ,研究生是 2.78 ± 0.83 ,两两之间比较均没有统计学显著性(图3e),将所有本科生放在一起分析,与所有研究生相比也没有统计学显著性($P=0.1161$,图3f)。与各选项占比的分析结果(图3d)一致,当年通过“顺序法”学习糖酵解后,研究生虽然经过了两三年的沉淀,但仍然认为真正理解“糖酵解”不容易,与刚刚学过一年的本科生相比没有显著差别。

问卷一还询问当年学习糖酵解后的记忆程度,即是否能写出化学反应式(第5题)。结果显示,102份问卷中,认为非常困难和困难的有38.2%和27.5%,这两组之和为65.7%(图4d),在北中医本科生中,认为非常困难和困难的两组之和达到89.5%之多(图4a),在国科大本本科生中,这一比例是75.0%(图4b),而研究生为55.6%(图4c)。而所有学生中认为容易和很容易的分别为10.8%和4.9%(图4d)。这说明当年通过“顺序法”学习后,大部分学生认为写出“糖酵解”的化学反应式是困难的,这一表现在本科生中更明显。

对糖酵解记忆程度各选项得分的统计结果显示,本科生的平均得分分别是 1.47 ± 0.82 和 1.85 ± 0.79 ,研究生是 2.48 ± 1.27 。我们发现了一个有趣的现象:与国科大研究生相比,不管是北中医本科生($P=0.0018$)还是国科大本本科生($P=0.0412$),都认为当年写出“糖酵解”化学反应式更为困难,而本科生之间没有统计学显著性的差别($P=0.1530$,图4e)。将所有本科生问卷放在一起统计,与所有研究生相比,认为当年通过“顺序法”学习后写出

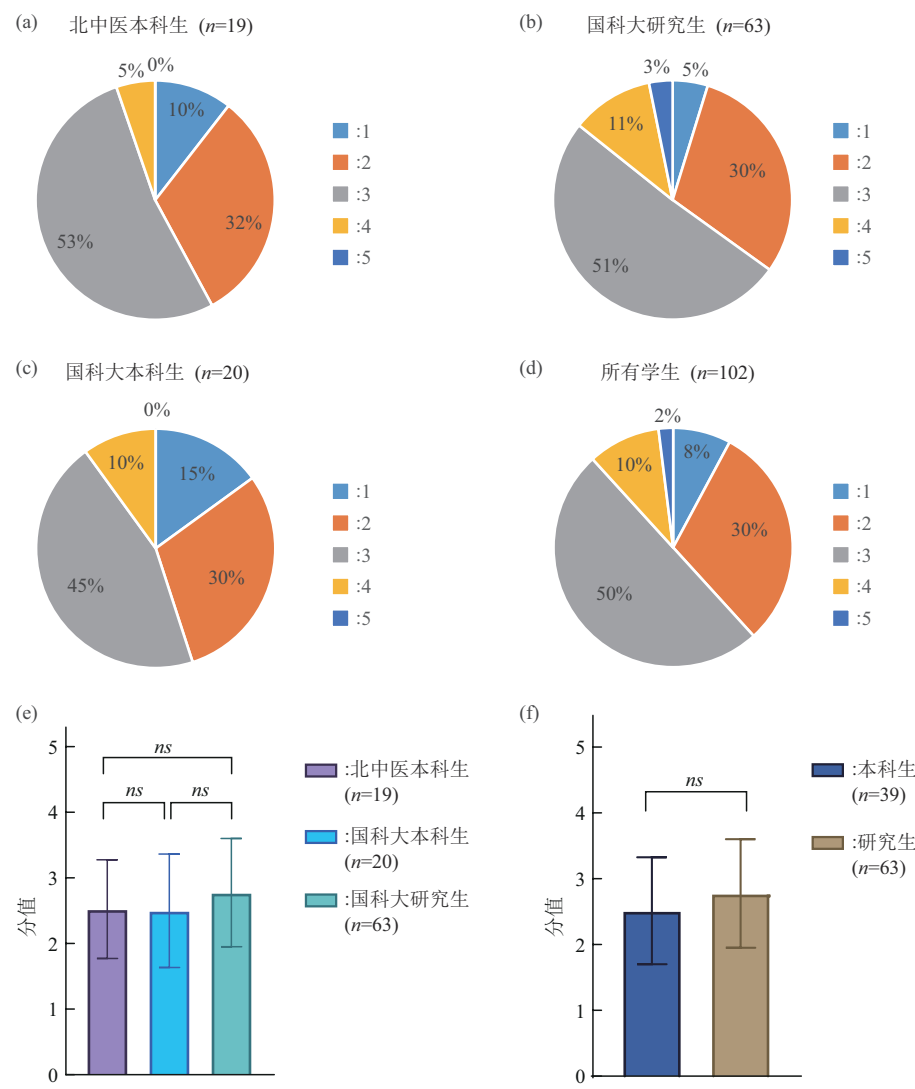


Fig. 3 Data analysis for Query 4 of the Class Survey 1:the comprehensibility in glycolysis after learning by the sequential method

图3 课堂问卷一第4题（“顺序法”学习后对糖酵解的理解程度）数据分析

(a~d) 北中医本科生、国科大本本科生、国科大研究生，以及所有学生的问卷在第4题中各选项所占比例。(e) 问题4各选项得分的统计学分析。(f) 本科生和研究生得分比较。两组之间比较使用unpaired *t* test; *ns*: 无显著差异。北中医本科生指北京中医药大学生命科学院2021级本科生；国科大本本科生指中国科学院大学生命科学院2021级本科生；国科大研究生指中国科学院大学生命科学院2023级研究生；本科生指北中医本科生与国科大本本科生的总和；研究生只代表国科大研究生。选项1~5分别代表得分1~5。e, f的分值是每组的所有问卷得分的平均值±标准差。

“糖酵解”的化学反应式也更加困难 ($P=0.0006$, 图4f)。结合第4题对“糖酵解”过程理解的难易程度, 虽然本科生与研究生在理解方面没有显著区别, 但是在写出“糖酵解”化学反应式时, 本科生比研究生更困难, 说明在专业方面经过更多时间积累, 对知识的掌握方面还是更好一些。

2.4 己糖等分教学后问卷结果

“己糖等分法”教学前的问卷结果显示, 通过传统的“顺序法”教学方式学习糖酵解后, 大多数

学生认为真正理解“糖酵解”是比较困难的, 写出“糖酵解”的化学反应式更加困难。对这些参与问卷的学生, 采用“己糖等分法”(图2)讲授糖酵解后, 我们开展了问卷二的调研。

问卷二第1题是关于对糖酵解的理解程度。结果显示, 102份问卷中, 认为“糖酵解”很容易和容易理解的有47.1%和40.2%, 这两组之和为87.3% (图5d), 在北中医本科生中, 认为很容易和容易的两组之和达到94.8% (图5a), 在国科大

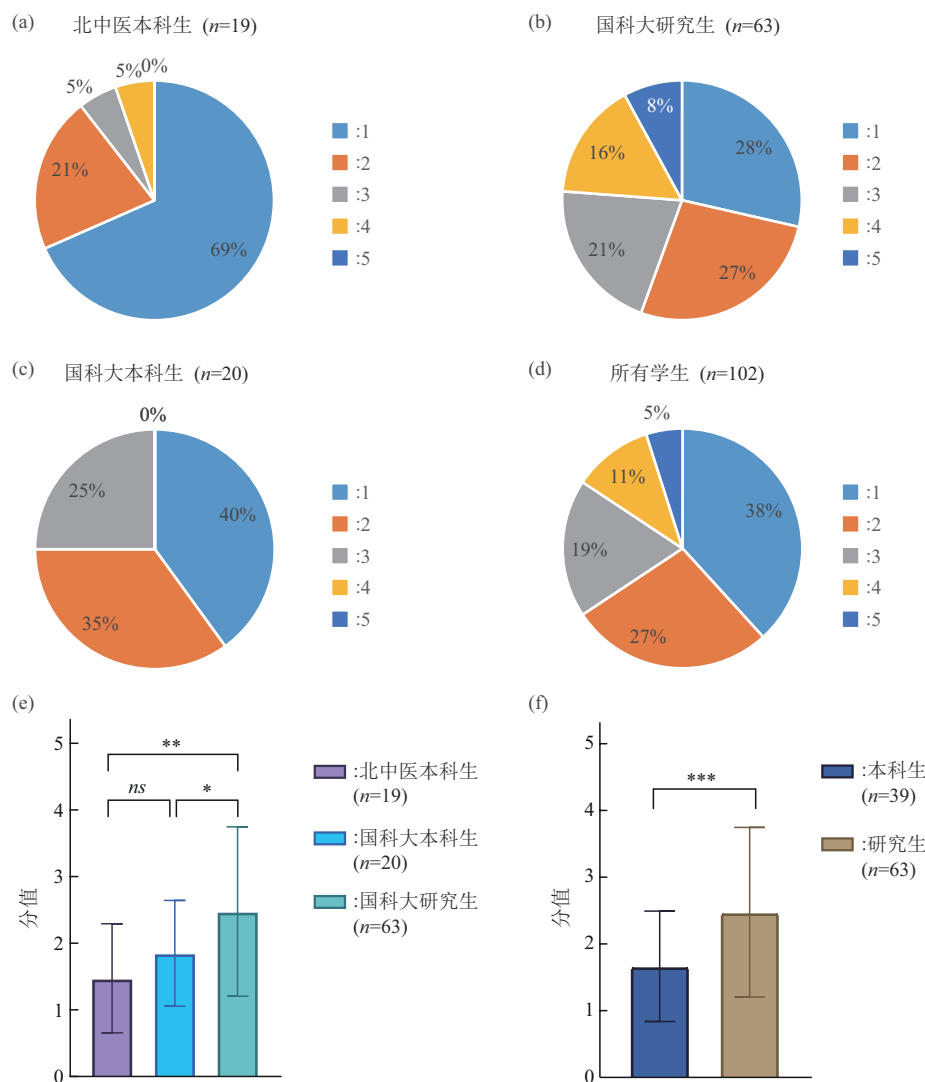


Fig. 4 Data analysis for Query 5 of the Class Survey 1: the level of memory retention in glycolysis after learning by the sequential method

图4 课堂问卷一第5题（“顺序法”学习后对糖酵解的记忆程度）数据分析

(a~d) 北中医本科生、国科大本本科生、国科大研究生，以及所有学生的问卷在第5题中各选项所占比例。(e) 问题5各选项得分的统计学分析。(f) 本科生和研究生得分比较。两组之间比较使用unpaired *t* test; **P*<0.05; ***P*<0.01; ****P*<0.001; ns: 无显著差异。图中简称同图3。选项1~5分别代表得分1~5。e, f的分值是每组的所有问卷得分的平均值±标准差。

本科生中，这一比例是80.0%（图5b），国科大研究生为87.3%（图5c）。所有学生中，认为不容易和更不容易的分别为1.0%和0%（图5d）。这说明采用“己糖等分法”教学后，绝大多数学生认为“糖酵解”容易理解了。

对糖酵解理解程度各选项得分的统计结果显示，本科生的平均得分分别是4.42±0.59和4.05±0.80，研究生是4.40±0.70，两两之间比较均没有统计学显著性（图5e），将所有本科生问卷放在一起分析，与所有研究生相比也没有统计学显著性

（*P*=0.2564，图5f）。与问卷一第4题相比较，当年通过“顺序法”学习后，学生感觉真正理解“糖酵解”不容易或一般，在采用本研究的“己糖等分法”学习后，认为此方法对理解“糖酵解”更容易，而且与问卷一第4题一致，本科生和研究生之间没有显著差别。

在评价采用“己糖等分法”学习糖酵解后的记忆程度（问卷二第2题）时，询问用此方法学习和复习后写出“糖酵解”每一步化学反应式的难易程度。结果显示，102份问卷中，认为很容易和容易

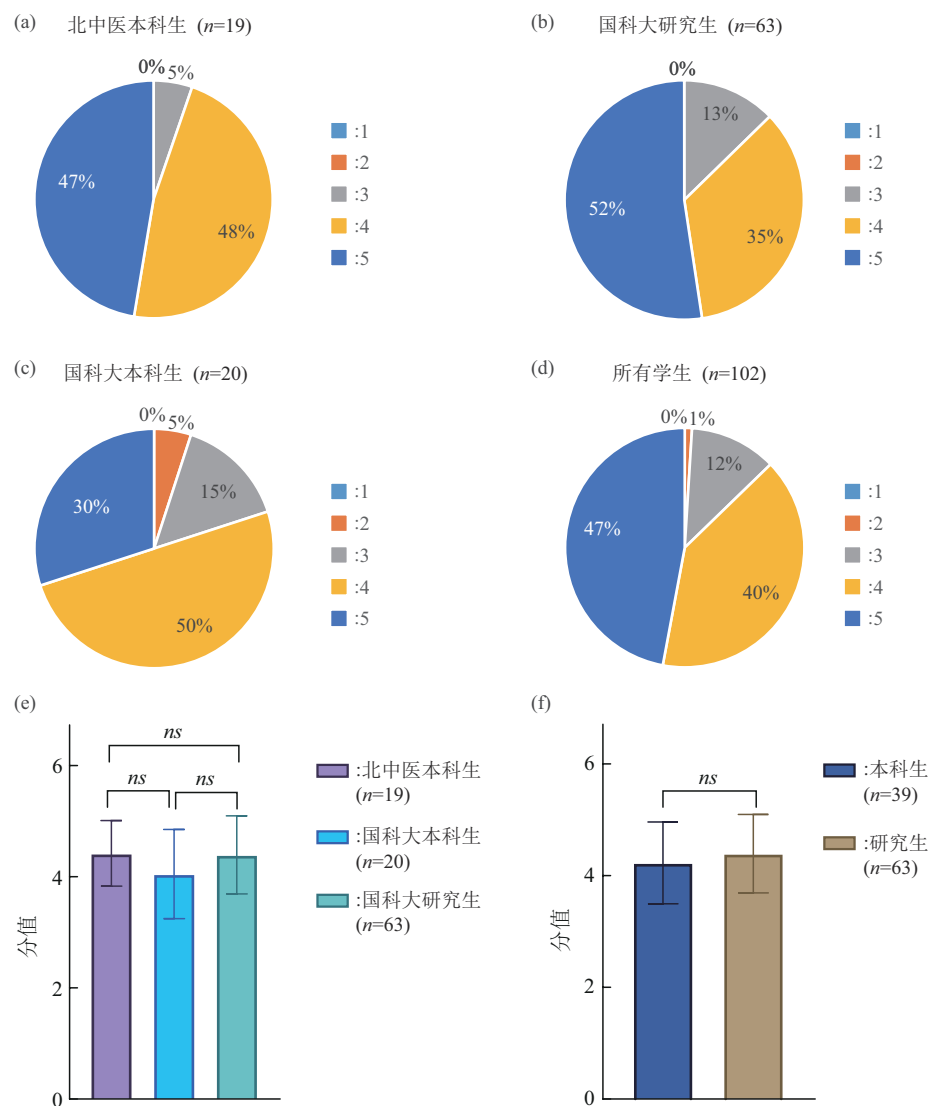


Fig. 5 Data analysis for Query 1 of the Class Survey 2:the comprehensibility in glycolysis after learning by the hexose equal division method

图5 问卷二第1题（“己糖等分法”学习后对糖酵解的理解程度）数据分析

(a~d) 北中医本科生、国科大本科学、国科大研究生，以及所有学生在问卷二第1题中各选项所占比例。(e) 问题1各选项得分的统计学分析。(f) 本科生和研究生得分较。两组之间比较使用unpaired *t* test, *ns*: 无显著差异。图中简称同图3。选项1~5分别代表得分1~5。e, f的分值是每组的所有问卷得分的平均值±标准差。

的有 6.9% 和 54.9%，这两组之和为 61.9%（图 6d）；在北中医本科生中，认为很容易和容易的两组之和达到 68.5%（图 6a），在国科大本科学中，这一比例是 55.0%（图 6b），研究生为 61.9%（图 6c）。所有学生中，认为困难和非常困难的分别为 10.8% 和 4.9%（图 6d）。这说明采用“己糖等分法”进行学习和复习后，大部分学生认为写出“糖酵解”的每一步化学反应式变得相对容易。

对糖酵解记忆程度各选项得分的结果显示，本科生的平均得分分别是 3.53 ± 0.94 和 3.35 ± 1.01 ，研

究生是 3.51 ± 0.92 ，两两之间进行比较，均没有统计学显著性（图 6e），将所有本科生放在一起分析，与所有研究生相比也没有统计学显著性（ $P = 0.7094$ ，图 6f）。与问卷一第 5 题进行对比分析，当年通过“顺序法”学习后，被要求写出“糖酵解”每一步化学反应式是困难的，且本科生比研究生更困难；然而，在采用“己糖等分法”学习后，写出“糖酵解”每一步化学反应式是容易的，不过本科生与研究生之间没有显著差别。这就说明“己糖等分法”既适合本科生又适合研究生，能够让学

生更容易理解糖酵解机理,且便于记忆,从而获得更好的学习效果。

问卷二第3、4、5题分别讨论的是:与传统的“顺序法”相比,“己糖等分法”是否学习效果更好,学习之后是否更容易记忆,考试是否更容易获得好成绩。根据各选项占比结果(文件S2中图S1)和得分比较(文件S2中图S2),本研究发现,大多

数学生认为“己糖等分法”效果更好,学习之后不容易忘,考试会获得更好的成绩,且各组之间进行比较没有统计学显著性。这说明不管是本科生还是研究生,都认为与传统的“顺序法”相比,采用“己糖等分法”学习“糖酵解”效果更好、更容易掌握。

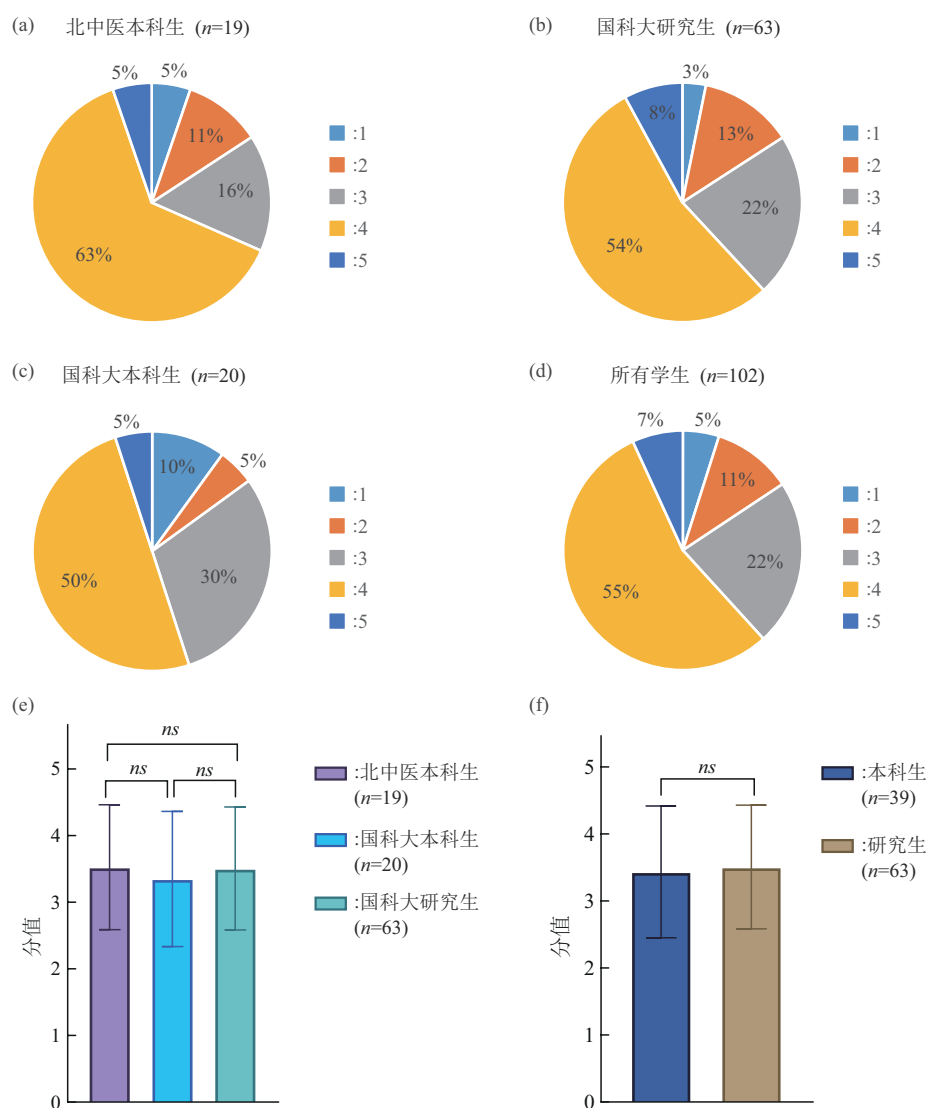


Fig. 6 Data analysis for Query 2 of the Class Survey 2:the level of memory retention in glycolysis after learning by the hexose equal division method

图6 问卷二第2题(“己糖等分法”学习后对糖酵解的记忆程度)数据分析

(a~d) 北中医本科生、国科大本本科生、国科大研究生,以及所有学生在问卷二第2题中各选项所占比例。(e) 问题2各选项得分的统计学分析。(f) 本科生和研究生得分比较。两组之间比较使用unpaired *t* test; ns: 无显著差异。图中简称同图3。选项1~5分别代表得分1~5。e, f 的分值是每组的所有问卷得分的平均值±标准差。

3 讨论

综上,通过对问卷一和问卷二的调研数据进行

分析和比较,本研究发现,与“顺序法”相比较,采用“己糖等分法”进行教学能够让学生更容易理解糖酵解机理,且便于记忆,同时此方法还有助于

启发学生自觉思考、培养主动分析的能力,从而获得更好的学习效果。

本研究需要进一步扩大被试数量,可通过线下大规模直接发放调查问卷与线上问卷调查相结合的方式,让更多曾经通过“顺序法”学习过糖酵解的在读本科生和研究生、已毕业的本科生和研究生、甚至教师,在采用“己糖等分法”学习糖酵解之前和之后进行问卷调查。通过大人群样本分析比较“顺序法”和“己糖等分法”的优缺点,进一步优化糖酵解途径的教学方法。

在未来,还可以将尚未学习过糖酵解的本科生分为两组,一组采用“顺序法”,另一组采用“己糖等分法”,分别进行教学,之后进行测试,比较两组学生的考试成绩是否存在统计学的显著差异,从而验证两种方式的教学效果。当然,这种做法需经过伦理委员会和学生的同意。

4 结 论

本研究通过对本科生和研究生的问卷研究发现,在糖酵解教学中,相比传统的“顺序法”,“己糖等分法”的教学能够让学生更容易理解和记忆糖酵解机理,在启发学生主动思考和分析的同时收获更好的学习效果。我们希望能在更多教学实践中,采用“己糖等分法”进行“糖酵解”的教与学,从而在更大样本量的基础上验证该教学法的重复性和可靠性。让更多大学生和研究生能更容易理解和掌握“糖酵解”的每一步化学反应,从而有助于未来进行糖脂代谢、核酸代谢、肿瘤代谢,以及衰老、运动等相关的代谢研究。

致谢 感谢北京中医药大学生命科学院刘纓教授在本研究招募北京中医药大学生命科学院2021级

本科生进行问卷调研过程中给予的支持和帮助。

附件 见本文网络版 (<http://www.pibb.ac.cn>, <http://www.cnki.net>):

PIBB_20240366_Table_S1.pdf

PIBB_20240366_Document_S1.PPTX

PIBB_20240366_Document_S2.pdf

参 考 文 献

- [1] Nelson D L, Cox M M. Lehninger Principles of Biochemistry (4th Ed.). New York: W.H. Freeman and Company, 2005
- [2] Nelson D L, Cox M M. Lehninger Principles of Biochemistry (7th Ed.). New York: W.H. Freeman and Company, 2017
- [3] 沈同,王镜岩.生物化学第二版上下册.2版.北京:高等教育出版社,1991
Shen T, Wang J Y. Biochemistry. Second edition. Beijing: Higher Education Press, 1991
- [4] 王镜岩,朱圣庚,徐长法.生物化学.3版.北京:高等教育出版社,2007
Wang J Y, Zhu S G, Xu C F. Biochemistry. Third edition. Beijing: Higher Education Press, 2007
- [5] 朱圣庚,徐长法.生物化学-上册.4版.北京:高等教育出版社,2017
Zhu S G, Xu C F. Biochemistry. Fourth edition. Beijing: Higher Education Press, 2017
- [6] 郑集,陈钧辉.普通生物化学.4版.北京:高等教育出版社,2007
Zheng J, Chen J H. Ordinary Biochemistry. Fourth edition. Beijing: Higher Education Press, 2007
- [7] 陈钧辉.普通生物化学.5版.北京:高等教育出版社,2015
Chen J H. Ordinary Biochemistry. Fifth edition. Beijing: Higher Education Press, 2015
- [8] 陈巧云.高校教学系统学生评价问卷编制及信效度检验.高等理科教育,2018(5): 80-86
Chen Q Y. High Educ Sci, 2018(5): 80-86

Application of Hexose Equal Division in The Teaching of Glycolysis*

ZHU Li^{1,2)**}, HE Rong-Qiao^{1,2)**}

⁽¹⁾State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁽²⁾College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Glycolysis is a fundamental topic in the biochemistry curriculum, pivotal for understanding glucose metabolism, and it stands as a challenging subject in various life science disciplines, including microbiology, marine biology, zoology, cell biology, and bioengineering. The process of glycolysis encompasses 10 successive reactions, involving numerous enzymes and intermediate metabolites, making it a complex pathway that both consumes and generates energy (ATP). Over the past decades, and continuing to the present, the standard pedagogical approach has been to explain glycolysis step by step, a method known as the sequential teaching method, which has not yielded optimal educational outcomes. In this paper, we introduce an innovative teaching strategy that frames the overall reaction of glycolysis as the division of one molecule (6C) of glucose into two molecules (3C) of pyruvate. To achieve the equal division of the hexose molecule, a phosphate group is added to both the head (C1) and tail (C6) of the hexose carbon chain, resulting in the formation of fructose 1, 6-bisphosphate. A critical chemical bond breakage at the center of the molecule (C3-C4) then occurs, yielding two molecules of phosphorylated aldose. The subsequent five reactions involve a series of steps, including the transfer of phosphate groups, culminating in the production of pyruvate from phosphorylated aldose. This novel education approach, which begins with the concept of “equal division of the hexose carbon chain”, is termed the “hexose equal division” teaching method. Graduate ($n=63$) and undergraduate ($n=39$) students were enrolled in a teaching research study where glycolysis was taught using the “hexose equal division” method, followed by a questionnaire survey. The results showed that before receiving the “hexose equal division” teaching, students found it challenging to grasp and retain the steps of glycolysis, with the reactions being prone to be forgotten after memorization. However, after employing the “hexose equal division” teaching method, the majority of graduate students reported that glycolysis steps became more comprehensible and easier to recall compared to the “sequential teaching method” used during their undergraduate studies. This same approach was applied to undergraduate students, and a statistical analysis revealed no significant difference ($P>0.05$) in outcome between the two groups. Consequently, the “hexose equal division” teaching method has been shown to enhance students' understanding of the glycolysis mechanism, aid in memorization, and encourage independent thinking, thus leading to improved learning outcomes.

Key words glycolysis, glucose, pyruvate, teaching methodology

DOI: 10.16476/j.pibb.2024.0366

* This work was supported by a grant from The National Natural Science Foundation of China (32271200).

** Corresponding author.

HE Rong-Qiao. Tel: 86-13552534019, E-mail: herq@ibp.ac.cn

ZHU Li. Tel: 86-10-64888303, E-mail: zhuli@ibp.ac.cn

Received: August 13, 2024 Accepted: September 10, 2024