

# 动力系统模型及其在实时血糖预测中的应用

刘益通

上海科技大学

June 12, 2024



上海科技大学  
ShanghaiTech University

# 目录

- 1 研究背景
- 2 动力系统模型
- 3 模型拟合与预测
- 4 结论与展望



上海科技大学  
ShanghaiTech University

# 目录

- 1 研究背景
- 2 动力系统模型
- 3 模型拟合与预测
- 4 结论与展望



上海科技大学  
ShanghaiTech University

WHO 数据显示，全球有 4.25 亿糖尿病患者，占全球人口的 8.5%，而且这个数字还在不断增长。糖尿病问题已经成为全球性的公共卫生问题。CGM 技术的发展为糖尿病患者提供了一种实时监测血糖的方法，但是如何利用这些数据进行血糖预测仍然是一个挑战。



目前现有的血糖预测动力系统模型大多是基于生物反馈系统的理论，这些模型并没有足够的数据支撑，本文尝试利用 CGM 采集的大量数据，进行模型拟合，以此验证模型的有效性，之后尝试使用拟合的模型进行实时血糖预测。



# 目录

- 1 研究背景
- 2 动力系统模型
- 3 模型拟合与预测
- 4 结论与展望



上海科技大学  
ShanghaiTech University

动力系统模型是描述一个系统的状态随时间演化的数学模型，主要通过一组微分方程或差分方程来描述系统的动态行为。

本文主要使用的动力系统模型是由 Best 等人提出的葡萄糖-胰岛素动力系统模型 Best et al. (1981) 以及后续发展的胰  $\beta$  细胞动力系统模型 Topp et al. (2000)。



# 葡萄糖动力系统

$$\frac{dG}{dt} = \text{Production} - \text{Uptake}, \quad (1)$$

其中  $G$  是血液中的葡萄糖浓度,  $t$  是时间,  $\text{Production}$  是葡萄糖生成速率,  $\text{Uptake}$  是葡萄糖摄取速率 (也可以理解为血液中葡萄糖的消耗速率)。





因此, 我们可以将葡萄糖产生和摄取速率表示为Best et al. (1981):

$$\text{Production} = P_0 - (E_{G0P} + S_{IP} \times I) \times G, \quad (2)$$

$$\text{Uptake} = U_0 + (E_{G0U} + S_{IU} \times I) \times G, \quad (3)$$

其中  $P_0$  和  $U_0$  是零葡萄糖时的葡萄糖产生和摄取速率,  $E_{G0P}$  和  $E_{G0U}$  分别是产生和摄取的零胰岛素葡萄糖效力,  $S_{IP}$  和  $S_{IU}$  分别是产生和摄取的胰岛素敏感性,  $I$  代表血胰岛素浓度。



将方程 (2) 和 (3) 代入方程 (1), 我们得到

$$\frac{dG}{dt} = R_0 - (E_{G0} + S_I \times I) \times G, \quad (4)$$

其中  $R_0 (= P_0 - U_0)$  是零葡萄糖时葡萄糖的净产生速率,  $E_{G0} (= E_{G0p} + E_{G0U})$  是零胰岛素时的总葡萄糖效力,  $S_I (= S_{IP} - S_{IU})$  是总胰岛素敏感性。



类似的，我们可以通过以下微分方程来描述胰岛素动力系统：

$$\frac{dl}{dt} = \text{Secretion} - \text{Clearance}, \quad (5)$$

其中 Secretion 表示胰岛素分泌速率, Clearance 表示胰岛素清除速率。



# 胰岛素动力系统

我们得到：

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\beta \sigma G^2}{(\alpha + G^2)} - kl. \quad (6)$$

其中  $k$  是代表肝脏、肾脏和胰岛素受体中胰岛素摄取的清除常数， $\beta$  是胰  $\beta$  细胞的质量。所有  $\beta$  细胞被假定以相同的最大速率  $\sigma$  分泌胰岛素。 $\alpha$  是控制 S 形函数的参数 Topp et al. (2000)。



上海科技大学  
ShanghaiTech University

我们可以通过以下微分方程来描述胰  $\beta$  细胞动力系统:

$$\frac{d\beta}{dt} = (-d_0 + r_1 G - r_2 G^2)\beta, \quad (7)$$

其中  $d_0$  是零血糖时  $\beta$  细胞的自然死亡率,  $r_1$  和  $r_2$  是两个常数Topp et al. (2000)。



# 目录

- 1 研究背景
- 2 动力系统模型
- 3 模型拟合与预测
- 4 结论与展望



上海科技大学  
ShanghaiTech University

- 1 预处理 CGM 数据
- 2 将动力系统模型离散化为差分方程形式

$$\begin{aligned} G_{t+1} &= G_t + 2\Delta t(a_0 - a_1 G_t - a_2 G_t l_t), \\ l_{t+1} &= l_t + 2\Delta t\left(\frac{b_1 G_t^2}{G_t^2 + b_2^2} - b_3 l_t\right), \end{aligned} \quad (8)$$

- 3 使用梯度下降法拟合模型参数



# 拟合结果

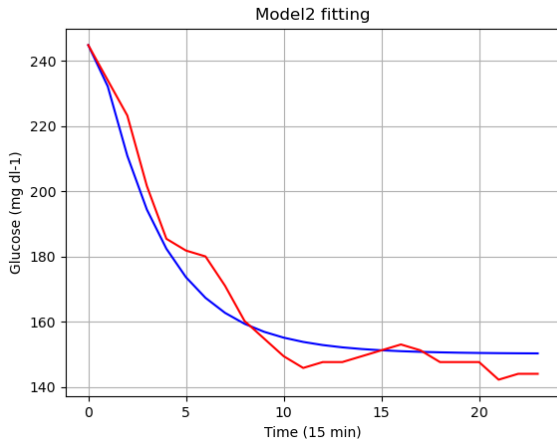


Figure: 模型拟合结果。



上海科技大学  
ShanghaiTech University



# 预测结果

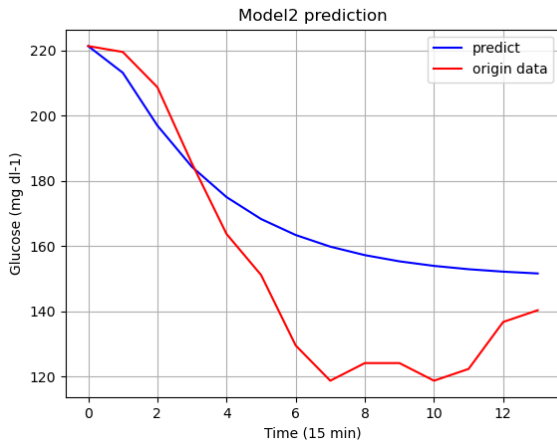


Figure: 模型预测效果。



上海科技大学  
ShanghaiTech University

# 目录

- 1 研究背景
- 2 动力系统模型
- 3 模型拟合与预测
- 4 结论与展望



上海科技大学  
ShanghaiTech University

# 结论与展望

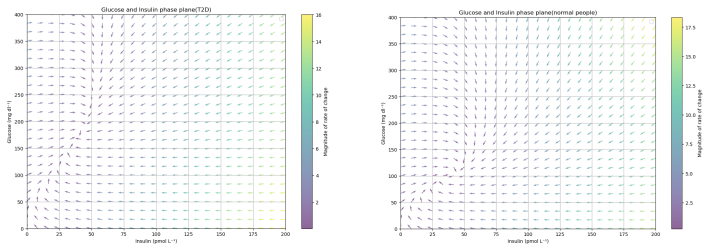


Figure: 2 型糖尿病病人与正常人拟合的模型相图差距。



上海科技大学  
ShanghaiTech University

- James D Best, Gerald J Taborsky Jr, Jeffrey B Halter, and Daniel Porte Jr. Glucose disposal is not proportional to plasma glucose level in man. *Diabetes*, 30(10):847–850, 1981.
- Brian Topp, Keith Promislow, Gerda Devries, Robert M Miura, and DIANE T FINEGOOD. A model of  $\beta$ -cell mass, insulin, and glucose kinetics: pathways to diabetes. *Journal of theoretical biology*, 206(4): 605–619, 2000.



请各位老师批评指正！



上海科技大学  
ShanghaiTech University