

目 录

摘要	ii
Abstract	iii
第一章 引言	1
第二章 PBPK 模型的建立	2
2.1 模型的实验与生理背景	2
2.2 模型的数学形式	3
2.3 PBPK 模型的求解	8
第三章 PBPK 模型参数反演的神经网络方法: 使用固定时间节点数据	10
3.1 参数反演的背景与网络模型的基本介绍	10
3.2 参数反演神经网络模型的数据集结构与构建	11
3.2.1 网络功能与数据集结构介绍	11
3.2.2 标签集的构建	11
3.2.3 特征集的构建	13
3.3 参数反演神经网络模型的架构	16
附录 A 代码	18
A.1 代码环境	18
附录 B PBPK 模型物理量名称-含义对照表	19
参考文献	24
致谢	26

摘 要

这是我的中文摘要.

Abstract

This is my English abstract.

Keywords: 1; 2; 3

CLC code: O24

第一章 引言

双酚类物质 (Bisphenols,BPs) 是一种工业用化学物质,被大量用于生产聚碳酸酯及环氧树脂^[1].这两种可能会含有 BPs 的高分子物质又常被投入生产食品接触材料或其他日常使用材料,例如塑料杯,奶瓶,纸币,金属涂层等^[2].在日常生活中,BPs 通过皮肤渗透与口服摄入两种主要途径进入人体内环境,参与后续的分布与代谢.双酚 A(BPA),作为最早投入工业生产的 BPs,已被证实对人体具有毒性^[3].事实上,BPA 会对人体的多个系统(如呼吸系统,神经系统,生殖系统)造成损害^[4].BPA 与双酚 S(BPS)两种 BPs 经口服进入人体后,经消化系统来到小肠,并在此分别葡萄糖醛酸化为 BPA-g 与 BPS-g,葡萄糖醛酸化后的双酚物质会进入血液循环并最终随尿液排出体外;未葡萄糖醛酸化的 BPA 或 BPS 将会进入肝脏并在此被部分磷酸化为 BPA-s 或 BPS-s,部分 BPs 在肝脏仍会被葡萄糖醛酸化,这些衍生物与未发生反应的 BPs 都会直接进入血液循环并最终随尿液排出体外^[3,5].同时,在小肠或肝脏处进入血液循环的 BPs 会随血液进入人体的各个器官,如脑,生殖腺等.若 BPs 经由皮肤渗透进入人体,将会直接进入血液循环并跟随血液到达各个器官,其中进入小肠或肝脏的部分 BPs 将会根据所处位置被葡萄糖醛酸化或是被磷酸化.为了找寻比 BPA 更安全的替代品,研究 BPS 等双酚物质在人体中的代谢过程是有必要的^[6].

生理药代动力学模型 (Physiology-Based Pharmacokinetic Model, PBPK) 是药学中定量描述化学品在人体中吸收,分布,代谢,排泄过程的经典模型,常被用于化学品生态风险评价,人类健康风险评估以及药物开发^[7].PBPK 模型将包含血浆在内的对目标化学品特异性较强的靶点组织器官抽象为一个个“房室”,以质量守恒定律和相关生化反应为基础定量计算目标化学品在各房室之间的交换与各房室之内的代谢过程^[8].当某些靶点组织器官的目标化学品含量难以实际测出时,PBTK 模型的结果能够提供一个好的预测^[7].只需要确定 PBPK 模型中重要参数的数值,就能在脱离实际人体实验的情况下给出人体吸收目标化学品后靶点组织器官的化学品含量.

Yang 等人在 2015 年首次建立了使用人类参数的 BPA 在生物体内的 PBPK 模型,该模型基于口服摄入的吸收方式,共设置了 10 个仓室,分别为血浆,肝脏,脂肪,性腺,血流丰富组织,血流缓慢组织,大脑和皮肤,剩下两个仓室分别是 BPA-g 和 BPA-s 的反应仓室^[9].Karrer 等人在 2018 年重新调整了此 PBPK 模型,提供了 BPA 的其他双酚类替代品的模型参数,并增加了通过皮肤渗透吸收 BPs 的情形^[10].Hu 等人在 2023 年对皮肤渗透模型进行了改进,在原本皮肤作为单独仓室的基础上将其分割成了五个小仓室,分别为表皮储仓,角质层,活性表皮,毛囊以及未参与渗透吸收的未暴露皮肤^[11].该文章设置了志愿者实验,利用 BPS 暴露后受试者尿液中 BPS 与 BPS-g 的含量来优化 PBPK 模型与皮肤仓室相关的三个参数,并使用敏感性与不确定性分析评估了修改后的 PBPK 模型.

Hu 等人文章的参数优化部分中使用了传统的优化算法,在计算机上运行的时间较久.本文将在其基础上利用神经网络模型对皮肤渗透吸收型 PBPK 模型内的三个目标参数做参数反演,提升获取最优参数的速度的同时提高参数的准确性;并利用数值实验来评估神经网络模型的效果.

第二章 PBPK 模型的建立

Hu 等人^[11]在 github 中共享了论文中的数据以及部分代码^[12]. 共享中包含了 PBPK 模型和参数优化所使用的受试者真实数据等, 本章内容参照了这些工作. 该模型对多种双酚类物质都适用, 本文后续只讨论双酚 S(BPS) 的情形, 且只考虑皮肤暴露途径的外源 BPS 输入.

2.1 模型的实验与生理背景

Hu^[11]等人通过使用含有氘代 BPS(BPS-d8) 的热敏纸摩擦手指的方式令受试者暴露于 BPS. 受试者接触热敏纸共 $\frac{1}{6}h$, 脱离热敏纸后再等待 $2h$, $\frac{13}{6}h$ 时彻底清洗皮肤, 清空表皮储仓内的 BPS. 在接触实验开始的 $72h$, 受试者被要求每 $4.3h$ 左右提供一次尿液样本, 以检测尿液中的 BPS 与 BPS-g 的含量 (不检测 BPS-s 的尿液含量, 因为缺少相应的检测试剂). 在另一个 BPS 人体接触实验中, Khmiri 等人^[13]同时监测了受试者的血液与尿液. 接触 BPS 起的前 $2h$ 内每 $0.25h$ 取样一次血液, 第 2 小时至第 8 小时内每 $1h$ 取样一次血液, 之后分别在 $10h$, $24h$, $48h$ 时取样一次血液. 尿液的取样节点不是固定的, 而是将接触 BPS 后 $48h$ 分成了 11 个时段. 受试者在单个时段内的所有排尿都会被收集, 作为该时段标签下的一个整体取样.

根据 Hu 等人的文章^[11], 从受试者与热敏纸接触时起, 热敏纸内的 BPS 通过手指表皮储存进入毛囊和角质层, 接着扩散进入活性表皮层, 再通过毛囊和活性表皮层与内环境的交换进入体循环, 平行分层皮肤仓室内的物质交换情况的图片形式如图 2.1. 血浆携带 BPS 通过血液交换将其送入肝脏, 脑, 脂肪, 性腺等组织器官. 部分 BPS 在肝脏反应为 BPS-g 或 BPS-s. 体内的 BPS-g 与 BPS-s 不会再反应为其他物质, 这两种物质会像始终未发生反应的 BPS 一样, 最终随血液进入肾脏, 通过尿液排出. 在只有皮肤暴露途径吸收外源 BPS 的情况下, 不考虑 BPS 的肝肠循环过程, 认为胃肠道不存在 BPS, 且小肠不发生 BPS 葡萄糖酸化为 BPS-g 的反应. 整个 PBPK 模型的仓室间 BPS, BPS-g, BPS-s 的交换情况如图 2.2 所示.

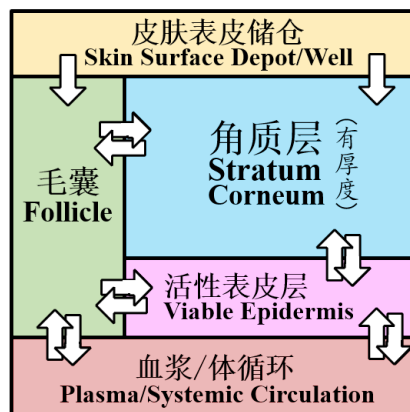


图 2.1: 平行分层皮肤仓室的简化图解 (箭头代表 BPS 的可能运输方向)

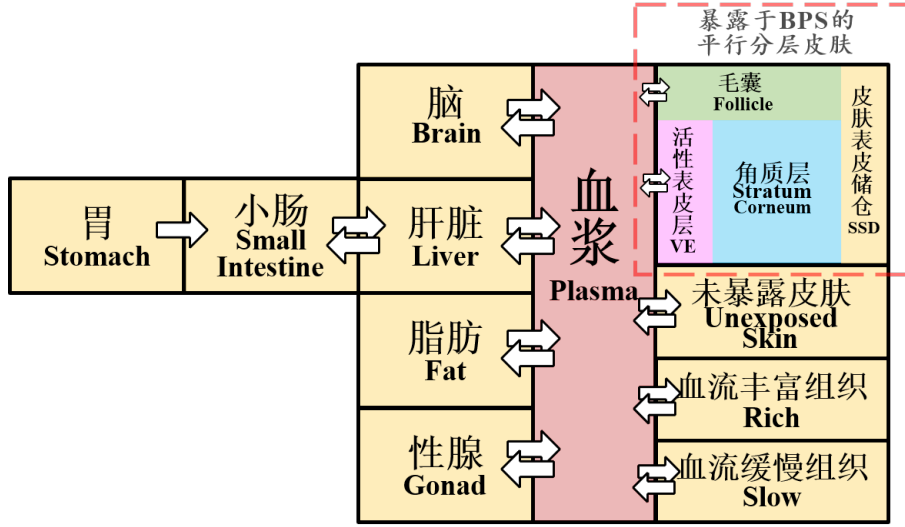


图 2.2: BPS 人体内 PBPK 模型的简化图解 (箭头代表 BPS 的可能运输方向)

2.2 模型的数学形式

本文中的 PBPK 模型共有个 14 仓室, 包括: 暴露皮肤 {皮肤表皮储仓, 角质层, 毛囊, 活性表皮层}, 胃, 小肠, 未暴露于化学品的皮肤, 血浆, 脂肪, 性腺, 肝脏, 脑, 血流丰富组织, 血流缓慢组织. 其中暴露的含义为“在实验中与 BPS 接触”. 根据各仓室之间的关系以及 BPS 在各仓室内的生化反应, 得到 19 个解关于时间 t 变化的常微分方程与 1 个偏微分方程. 这些微分方程共同构成了 BPS 的带平行分层皮肤仓室的 PBPK 模型.

角质层内 BPS 的浓度 $\varphi(x, t)$

如 (2.1), 其中的偏微分方程本质上是一个扩散对流方程, 其解 φ 代表角质层 (Stratum Corneum) 中 BPs 含量, 自变量 x 代表角质层的深度, 自变量 t 代表时间, DSC 代表 BPS 在角质层中的有效扩散系数 (cm^2/h), u_1 代表 BPS 随脱屑向皮肤表面转移的速度 (cm/min), T_{SC} 代表角质层的深度 (um), HSC_{well} 代表角质层和皮肤表皮储仓之间的分配系数, $C_{well}(t)$ 代表皮肤表皮储仓在 t 时刻的 BPS 浓度 ($nmol/cm^3$), HSC_{VE} 代表角质层和活性表皮之间的分配系数, $C_{VE}(t)$ 代表活性表皮在 t 时刻的 BPS 浓度 ($nmol/cm^2$).

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t^2} = DSC \frac{\partial^2 \varphi(x, t)}{\partial x^2} + u_1 \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t}, & 0 \leq x \leq T_{SC}, \quad t \geq 0 \\ \varphi(0, t) = HSC_{well} \times C_{well}(t), & t \geq 0 \\ \varphi(T_{SC}, t) = HSC_{VE} \times C_{VE}(t), & t \geq 0 \\ \varphi(x, 0) = 0, & 0 \leq x \leq T_{SC} \end{cases} \quad (2.1)$$

使用空间离散化的办法, 将角质层视作一个长度为 T_{SC} 的线段, 将该线段等距分为 10 段, 共 11 个节点 $\{x_i\}_{0 \leq i \leq 10}$. 其中第一个节点 x_0 视作皮肤表皮储仓, 最后一个节点 x_{10} 视作活性表皮. x_1 至 x_9

九个节点处 BPS 浓度的一阶与二阶空间导数值通过中心差分法近似表示:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x_j, t) \approx \frac{\varphi_{j+1}(t) - 2\varphi_j(t) + \varphi_{j-1}(t)}{(\Delta x)^2} \\ \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x_j, t) \approx \frac{\varphi_{j+1}(t) - \varphi_{j-1}(t)}{2\Delta x} \end{cases} \quad (2.2)$$

整理后得到这九个节点处 BPS 浓度关于时间的一阶导数值如 (2.3), $i = 2, 3, \dots, 8$ 与 (2.4), (2.5). 其中 $SCDX = \frac{T_{SC}}{10}$, V_{well} 为暴露皮肤表面储仓沉积体积 (cm^3), $A_{well}(t)$ 为皮肤表皮储仓在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$), V_{TVE} 为暴露皮肤活性表皮层体积 (cm^3), $A_{VE}(t)$ 为活性表皮在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$). 节点 x_1 和 x_9 处的时间导数值与其他节点不同的原因是: 与它们相邻的部分涉及到皮肤的不同层室, 需要利用 BPS 在不同层室组织间的分配系数来确定两个不同层室间 BPS 的转移情况.

$$\begin{aligned} \frac{dC_{SCi}(t)}{dt} = & \left(\frac{DSC}{SCDX^2} - \frac{u_1}{2 \times SCDX} \right) C_{SCi-1}(t) - \frac{2 \times DSC}{SCDX^2} C_{SCi}(t) \\ & + \left(\frac{DSC}{SCDX^2} + \frac{u_1}{2 \times SCDX} \right) C_{SCi+1}(t). \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{SC1}(t)}{dt} = & \left(\frac{DSC \times HSC_{well}}{V_{well} \times SCDX^2} - \frac{u_1 \times HSC_{well}}{V_{well} \times 2 \times SCDX} \right) A_{well}(t) - \frac{2 \times DSC}{SCDX^2} C_{SC1}(t) \\ & + \left(\frac{DSC}{SCDX^2} + \frac{u_1}{2 \times SCDX} \right) C_{SC2}(t). \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{SC9}(t)}{dt} = & \left(\frac{DSC}{SCDX^2} - \frac{u_1}{2 \times SCDX} \right) C_{SC8}(t) - \frac{2 \times DSC}{SCDX^2} C_{SC9}(t) \\ & + \left(\frac{DSC \times HSC_{VE}}{V_{TVE} \times SCDX^2} - \frac{u_1 \times HSC_{VE}}{V_{TVE} \times 2 \times SCDX} \right) A_{VE}(t). \end{aligned} \quad (2.5)$$

接下来介绍模型中余下的 19 个解关于时间 t 变化的常微分方程, 此部分内方程中出现的变量与常量的含义详情见附录B.

毛囊内 BPS 的含量 $A_{Fo}(t)$

见 (2.6), 方程等式两端为 $A_{Fo}(t)$ 的一阶导数. 在该 PBPK 模型中, 毛囊与皮肤表皮储仓和血液之间有着直接的物质交换, 故毛囊内 BPS 含量的增减与表皮储仓或血浆中 BPS 的含量有关, BPS 在宏观上遵循着顺浓度梯度运输的规则在不同组织内交换. 同时, 毛囊内 BPS 含量的增减会受到自身的限制, 当毛囊内 BPS 浓度高于血浆或表皮储仓中 BPS 浓度时, BPS 会顺浓度梯度进入浓度小的组织.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{Fo}(t)}{dt} = & - \left(\frac{Pfo \times AEXP \times FEXP}{V_{TFo} \times HFo_{well}} + \frac{Qskin \times AEXP \times 0.25}{BSA \times V_{TFo} \times pskin} \right) A_{Fo}(t) \\ & + \frac{Pfo \times AEXP \times FEXP}{V_{well}} A_{well}(t) + \frac{Qskin \times AEXP \times 0.25}{BSA \times V_{plasma}} A_{plasma}(t). \end{aligned} \quad (2.6)$$

皮肤表皮储仓内 BPS 的含量 $A_{well}(t)$

见 (2.7), 方程等式两端为 $A_{well}(t)$ 的一阶导数. 类似 (2.6), 等式右端表现出了表皮储仓与节点 x_1 处的角质层和毛囊之间的顺浓度梯度物质交换关系. 同时, 皮肤表皮储存作为在实验中

直接和外源 BPS 接触的部位, 它要接受一个剂量为 $f_1(t)$ (单位:nmol) 的持续的外源 BPS 输入. 当 $t > Time_{add} = \frac{1}{6}h$ 时, 皮肤停止接触外源 BPS, $f_1(t) = 0$. 等式右端有一个因数 $ON(t)$, 当 $t \leq Time_{expose} = \frac{13}{6}h$ 时, $ON(t) = 1$, 皮肤处于 BPS 暴露状态; 当 $t > Time_{expose}$ 时, $ON(t) = 0$, 暴露过 BPS 的皮肤被彻底清洗, 表皮储仓清空, 后续 $A_{well}(t)$ 的值与一阶导数值都为 0.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{well}(t)}{dt} = & \left(\frac{DSC \times AEXP \times (1 - FEXP)}{SCDX} C_{SC1}(t) - \frac{Pfo \times AEXP \times FEXP}{V_{TFO} \times HFO_{well}} A_{Fo}(t) \right. \\ & - \left(\left(\frac{DSC \times HSC_{well}}{V_{well} \times SCDX} - \frac{u_1 \times HSC_{well}}{V_{well}} \right) \times AEXP \times (1 - FEXP) \right. \\ & \left. \left. - \frac{Pfo \times AEXP \times FEXP}{V_{well}} \right) A_{well}(t) + f_1(t) \right) \times ON(t). \quad (2.7) \end{aligned}$$

活性表皮层内 BPS 的含量 $A_{VE}(t)$

见 (2.8), 方程等式两端为 $A_{VE}(t)$ 的一阶导数. 类似 (2.6), 等式右端表现出了活性表皮层与节点 x_9 处的角质层, 毛囊和血浆之间的顺浓度梯度物质交换关系.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{VE}(t)}{dt} = & \frac{DSC \times AEXP \times (1 - FEXP)}{SCDX} C_{SC9}(t) + \left(\left(\frac{-DSC \times HSC_{VE}}{V_{TVE} \times SCDX} - \frac{u_1 \times HSC_{VE}}{V_{TVE}} \right) \times \right. \\ & \left. AEXP \times (1 - FEXP) - \frac{Qskin \times AEXP \times 0.75}{BSA \times V_{TVE} \times pskin} \right) A_{VE}(t) + \frac{Qskin \times AEXP \times 0.75}{BSA \times V_{plasma}} A_{plasma}(t). \quad (2.8) \end{aligned}$$

胃部 BPS 的含量 $A_{ST}(t)$

见 (2.9), 方程等式两端为 $A_{ST}(t)$ 的一阶导数. 等式右端的第一个加数代表胃部 BPS 向肝脏和小肠转移的过程, 第二个加数是剂量为 $f_2(t)$ (单位:nmol) 的通过口服吸收的外源 BPS. 但由于本文不考虑口服吸收 BPS 的情形, $f_2(t) \equiv 0$, 可认为胃部内始终不含有 BPS 或它的衍生物.

$$\frac{dA_{ST}(t)}{dt} = -(k_0 + ge)A_{ST}(t) + f_2(t). \quad (2.9)$$

未暴露于 BPS 的皮肤, 脂肪, 性腺, 脑部, 血流丰富组织, 血流缓慢组织的 BPS 的含量

见 (2.10) 至 (2.15), 各方程的等式两端为小标题中组织器官内 BPS 含量的一阶导数. 这些等式的右端一致地代表了对应组织器官与血浆之间的顺浓度梯度物质交换关系.

$$\frac{dA_{skin}(t)}{dt} = \frac{-Qskin \times (1 - \frac{AEXP}{BSA})}{(V_{skin} - V_{TSC} - V_{TVE} - V_{TFO}) \times pskin} A_{skin}(t) + \frac{Qskin \times (1 - \frac{AEXP}{BSA})}{V_{plasma}} A_{plasma}(t). \quad (2.10)$$

$$\frac{dA_{fat}(t)}{dt} = \frac{-Qfat}{V_{fat} \times pfat} A_{fat}(t) + \frac{Qfat}{V_{plasma}} A_{plasma}(t). \quad (2.11)$$

$$\frac{dA_{gonad}(t)}{dt} = \frac{-Qgonad}{V_{gonad} \times pgonad} A_{gonad}(t) + \frac{Qgonad}{V_{plasma}} A_{plasma}(t). \quad (2.12)$$

$$\frac{dA_{brain}(t)}{dt} = \frac{-Qbrain}{V_{brain} \times pbrain} A_{brain}(t) + \frac{Qbrain}{V_{plasma}} A_{plasma}(t). \quad (2.13)$$

$$\frac{dA_{rich}(t)}{dt} = \frac{-Q_{rich}}{V_{rich} \times prich} A_{rich}(t) + \frac{Q_{rich}}{V_{plasma}} A_{plasma}(t). \quad (2.14)$$

$$\frac{dA_{slow}(t)}{dt} = \frac{-Q_{slow}}{V_{slow} \times pslow} A_{slow}(t) + \frac{Q_{slow}}{V_{plasma}} A_{plasma}(t). \quad (2.15)$$

血浆内的 BPS 的含量

见 (2.16), 方程等式两端为血浆内 BPS 含量的一阶导数. 血浆是体循环的重要组成部分, 该 PBPK 模型内的各仓室由血浆连接起来, 几乎每个仓室都与血浆有直接的物质交换, BPS 从组织器官内进入血浆, 血浆又携带着 BPS 进入各个组织器官. 等式的右端代表了血浆与毛囊, 活性表皮层, 未直接暴露于 BPS 的皮肤组织, 脂肪, 性腺, 脑部, 血流丰富组织, 血流缓慢组织, 肝脏之间的顺浓度梯度物质交换关系. 等式右端除了 $A_{plasma}(t)$ 项外每一项都有因数 $Qc - Kurinebps$, 其中 Qc 是心脏血流速度 (L/h), $Kurinebps$ 是 BPS 的尿液排泄参数 (L/h), 它们相减代表了每轮血液循环净剩的携带了 BPS 的血浆量.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{plasma}(t)}{dt} = & \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{skin} \times \frac{AEXP}{BSA} \times 0.25}{Qc \times V_{TFo} \times pskin} A_{Fo}(t) \\ & + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{skin} \times \frac{AEXP}{BSA} \times 0.75}{Qc \times V_{TVE} \times pskin} A_{VE}(t) \\ & + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{skin} \times (1 - \frac{AEXP}{BSA})}{Qc \times (V_{skin} - V_{TSC} - V_{TVE} - V_{TFo}) \times pskin} A_{skin}(t) \\ & + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{fat}}{Qc \times V_{fat} \times pfat} A_{fat}(t) + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{gonad}}{Qc \times V_{gonad} \times pgonad} A_{gonad}(t) \\ & - \frac{Qc}{V_{plasma}} A_{plasma}(t) + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{brain}}{Qc \times V_{brain} \times pbrain} A_{brain}(t) \\ & + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{rich}}{Qc \times V_{rich} \times prich} A_{rich}(t) + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{slow}}{Qc \times V_{slow} \times pslow} A_{slow}(t) \\ & + \frac{(Qc - Kurinebps) \times Q_{liver}}{Qc \times V_{liver} \times pliver} A_{liver}(t). \end{aligned} \quad (2.16)$$

胃肠部的 BPS-g 的含量 $A_{GIBPSg}(t)$ 与胃肠部的 BPS-s 的含量 $A_{GIBPSs}(t)$

见 (2.17), 方程等式两端为胃肠部的 BPS-g 的含量的一阶导数. 等式右端的第二个加数代表了小肠内的 BPS 葡萄糖酸化为 BPS-g 的过程, 第一个加数代表了 BPS-g 从胃肠部进入血液的过程. 在本文中, 没有口服吸收途径, 认为胃肠部不存在 BPS-g 或 BPS-s. 对于 (2.18) 有类似的说明, 不同在于小肠内几乎不发生 BPS 硫酸盐化为 BPS-s 的反应.

$$\frac{dA_{GIBPSg}(t)}{dt} = -kGIing \times A_{GIBPSg}(t) + \frac{Vmaxgutg \times A_{SI}(t)}{enterocytes \times Kmgutg + A_{SI}(t) + \frac{A_{SI}(t)^2}{enterocytes \times Ksigutg}}. \quad (2.17)$$

$$\frac{dA_{GIBPSs}(t)}{dt} = -kGIins \times A_{GIBPSs}(t) + \frac{Vmaxguts \times A_{SI}(t)}{enterocytes \times Kmguts + A_{SI}(t)}. \quad (2.18)$$

小肠的 BPS 的含量 $A_{SI}(t)$

见 (2.19), 方程等式两端为小肠的 BPS 的含量的一阶导数. 等式右端的第一个加数代表了口服 BPS 时胃部 BPS 进入小肠的过程, 第二个加数代表了小肠内部分 BPS 进入肝脏的过程, 后两个加数代表了部分 BPS 在小肠内葡萄苷酸化为 BPS-g 与硫酸盐化为 BPS-s 的反应过程 (小肠内几乎不发生 BPS 磷酸盐化反应, 此处对应的最大反应速率 $Vmaxguts$ 非常小). 在本文中, 没有口服吸收 BPS 的途径, 认为小肠内不存在 BPS 及其衍生物.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{SI}(t)}{dt} = & ge \times A_{ST}(t) - k1 \times A_{SI}(t) - \frac{Vmaxgutg \times A_{SI}(t)}{enterocytes \times Kmgutg + A_{SI}(t) + \frac{A_{SI}(t)^2}{enterocytes \times Ksigutg}} \\ & - \frac{Vmaxguts \times A_{SI}(t)}{enterocytes \times Kmguts + A_{SI}(t)}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

肝脏的 BPS 的含量 $A_{liver}(t)$

见 (2.20), 方程等式两端为肝脏的 BPS 的含量的一阶导数. 等式右端的前两个加数分别代表了口服 BPS 时胃部和小肠内 BPS 进入肝脏的过程, 第三第四个加数代表了肝脏与血浆之间的顺浓度梯度物质交换关系, 第五第六个加数代表了 BPS-g 与 BPS-s 引起肝脏内部分 BPS 发生肝肠循环的过程, 后两个加数代表了部分 BPS 在肝脏内葡萄苷酸化为 BPS-g 与硫酸盐化为 BPS-s 的反应过程.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{liver}(t)}{dt} = & k0 \times A_{ST}(t) + k1 \times A_{SI}(t) + \frac{Qliver}{V_{plasma}} A_{plasma}(t) - \frac{Qliver}{V_{liver} \times pliver} A_{liver}(t) \\ & + kenterobpsg \times A_{BPSg_delay}(t) + kenterobpss \times A_{BPSs_delay}(t) \\ & - \frac{Vmaxliverg \times A_{liver}(t)}{V_{liver} \times pliver \times Kmliverg + A_{liver}(t)} - \frac{Vmaxlivers \times A_{liver}(t)}{V_{liver} \times pliver \times Kmlivers + A_{liver}(t)}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

发生肝肠循环/小肠内的 BPS-g/BPS-s 的量 $A_{BPSg_delay}(t)/A_{BPSs_delay}(t)$

见 (2.21), 方程等式两端为发生肝肠循环的 BPS-g 的量的一阶导数. 等式右端的第一个加数代表了胃肠道 BPS-g 进入血浆后再进入肝肠循环的过程, 第二个加数代表了肝肠循环中的 BPS-g 进入血液循环的过程, 最后一个加数代表了肝脏中 BPS 新转化成的 BPS-g 进入肝肠循环的过程. 对于发生肝肠循环的 BPS-s 的量的方程 (2.22), 有着完全一致的描述.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{BPSg_delay}(t)}{dt} = & met2g \times kGIing \times A_{GIBPSg}(t) \\ & - (kentero + k4_{IV} + kenterobpsg) \times A_{BPSg_delay}(t) + \frac{met2g \times Vmaxliverg \times A_{liver}(t)}{V_{liver} \times pliver \times Kmliverg + A_{liver}(t)}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{BPSs_delay}(t)}{dt} = & met2s \times kGIins \times A_{GIBPSs}(t) \\ & - (kentero + k4_{IV} + kenterobpss) \times A_{BPSs_delay}(t) + \frac{met2s \times Vmaxlivers \times A_{liver}(t)}{V_{liver} \times pliver \times Kmlivers + A_{liver}(t)}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

人体内 BPS-g/BPS-s 的总含量 $A_{BPSg}(t)/A_{BPSs}(t)$

见 (2.23), 方程等式两端为人体内 BPS-g 的总含量的一阶导数. 等式右端的第一个加数代表了口服摄入 BPS 时, 胃肠部产生的 BPS-g 进入血液后未进入肝肠循环的部分 BPS-g, 第二个加数代表了正在进行肝肠循环的 BPS-g, 第三个加数代表了 BPS-g 随尿液排出人体的过程, 最后一个加数代表了 BPS 通过肝脏转化成的 BPS-g 进入血液后未进入肝肠循环的部分 BPS-g. (2.24) 与之相似.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{BPSg}(t)}{dt} = & met1g \times kGIing \times A_{GIBPSg}(t) + kentero \times A_{BPSg_delay}(t) - \frac{K_{urinebpsg}}{V_{bodyg} + 10^{-34}} A_{BPSg}(t) \\ & + \frac{met1g \times V_{maxliverg} \times A_{liver}(t)}{V_{liver} \times pliver \times K_{mliverg} + A_{liver}(t)}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{dA_{BPSs}(t)}{dt} = & met1s \times kGIins \times A_{GIBPSs}(t) + kentero \times A_{BPSs_delay}(t) - \frac{K_{urinebps}}{V_{bodyg} + 10^{-34}} A_{BPSs}(t) \\ & + \frac{met1s \times V_{maxlivers} \times A_{liver}(t)}{V_{liver} \times pliver \times K_{mlivers} + A_{liver}(t)}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

综上, 本文的 PBPK 模型的数学形式的主要部分为一个由 28 个常微分方程构成的微分方程组, 其中每个方程的解关于时间 t 变化, 且每个解的初值都是 0. 除此之外, 根据实验过程, 还需计算尿液中的 BPS 与 BPS-g 的在 t 时刻的含量 $A_{urinebps}(t)$ 与 $A_{urinebpsg}(t)$, (2.25) 与 (2.26) 给出了它们的一阶导数值. 这两个等式都不是常微分方程.

$$\begin{aligned} \frac{dA_{urinebps}(t)}{dt} = & K_{urinebps} \times \left(\frac{Q_{skin} \times \frac{AEXP}{BSA} \times 0.25}{Q_c \times V_{Tfo} \times p_{skin}} A_{Fo}(t) + \frac{Q_{skin} \times \frac{AEXP}{BSA} \times 0.75}{Q_c \times V_{TVE} \times p_{skin}} A_{VE}(t) \right. \\ & + \frac{Q_{skin} \times (1 - \frac{AEXP}{BSA})}{Q_c \times (V_{skin} - V_{TSC} - V_{TVE} - V_{Tfo}) \times p_{skin}} A_{skin}(t) \\ & + \frac{Q_{fat}}{Q_c \times V_{fat} \times p_{fat}} A_{fat}(t) + \frac{Q_{gonad}}{Q_c \times V_{gonad} \times p_{gonad}} A_{gonad}(t) \\ & + \frac{Q_{brain}}{Q_c \times V_{brain} \times p_{brain}} A_{brain}(t) + \frac{Q_{rich}}{Q_c \times V_{rich} \times p_{rich}} A_{rich}(t) \\ & \left. + \frac{Q_{slow}}{Q_c \times V_{slow} \times p_{slow}} A_{slow}(t) + \frac{Q_{liver}}{Q_c \times V_{liver} \times p_{liver}} A_{liver}(t) \right). \end{aligned} \quad (2.25)$$

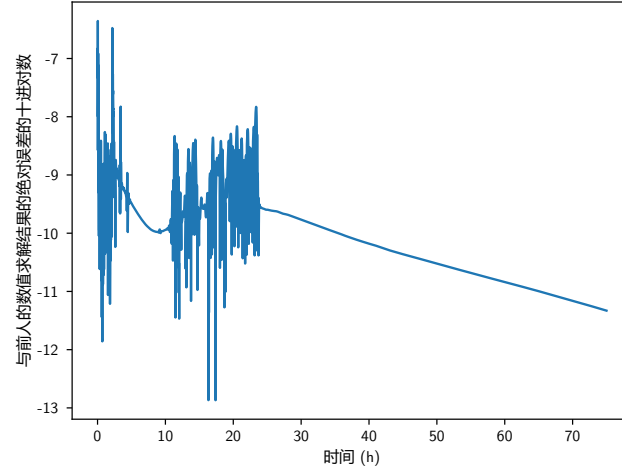
$$\frac{dA_{urinebpsg}(t)}{dt} = \frac{K_{urinebpsg}}{V_{bodyg} + 10^{-34}} A_{BPSg}(t). \quad (2.26)$$

2.3 PBPK 模型的求解

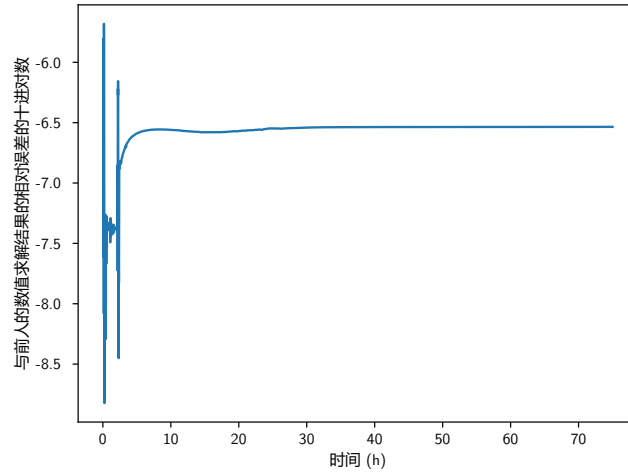
确定模型的数学形式后, 将 Hu 等人^[12]提供的数据相对应地代入至方程的各个参数, 使用 Python 中的第三方库函数 `scipy.integrate.odeint()` 对微分方程组求解, 该函数默认使用 LSODA 数值格式. LSODA 是一种高效的支持自适应步长的算法^[14], 根据设置好的误差限度, 若按照原有的预设步长来进行下一节点的数值计算, 得到的误差大于限度, 则将此步预设步长拆分为更小的多个步长, 以此来减小误差至限度以内; 若按照预设步长计算时得到的误差远小于限度, 则适当增大步

长以减小资源消耗. 同时, LSODA 同时支持刚性与非刚性问题, 处理刚性问题时, 它使用后向微分公式 (BDF), 处理非刚性问题时, 它使用 Runge-Kutta 公式.

根据 Hu 等人^[11]的实验, 每个解的初值都设置为 0, 时间网格设置为 $range(0, 75, 0.005)$, 时间步长为 $0.005h$, 共 15000 个时间节点. 每个方程的解都对应了一条人体某组织器官内 BPS(或 BPS-g, BPS-s) 的含量 ($mmol$) 或浓度 ($mmol/L$) 随时间变化的曲线.



(a) $A_{plasma}(t)$ 的相对误差的十进对数



(b) $A_{urinebps}(t)$ 的相对误差的十进对数

图 2.3: 与前人 PBPK 模型计算出的结果的相对误差

图2.3展示了本文的模型数值求解结果与参考代码^[12]中结果中 $A_{plasma}(t)$ 与 $A_{urinebps}(t)$ 的相对误差, 可以看到两种绝对误差曲线的数值都来到了 10^{-7} 这一量级附近, 说明对 Hu 等人^[11]提出的模型的求解复现效果较好. 分别运行 100 次前人模型求解代码与本文复现的模型求解代码, 取单次运行的平均, 得到本文的模型求解代码的单次平均运行时间为 $0.1086s$, 前人的代码单次平均运行时间为 $18.1621s$, 本文复现代码的运行速度约为前人速度的 167 倍.

第三章 PBPK 模型参数反演的神经网络方法：使用固定时间节点数据

本章使用了对偶学习的办法，使用 PBPK 模型正向生成的不含时间信息的数据分别训练了拟合 PBPK 模型正向求解模型的神经网络以及 PBPK 模型参数反演的神经网络，并展示了神经网络在测试数据上的效果。本章将讲解数据集的结构与构造以及网络模型的结构，训练与效果。

3.1 参数反演的背景与网络模型的基本介绍

Hu 等人^[11]在原本人体关于 BPs 的 PBPK 模型的基础上创新了平行分层仓室模型，该部分仓室模型在参数的数值确定方面还不完善，需要借助人体实验得到的真实数据对该部分参数进行反演校准。需要反演校准的与皮肤仓室有关的参数有三个，称由这三个参数的取值组成的一个数组为皮肤三参数组合，它们分别为：

$$\left| \begin{array}{ll} DSC & : \text{角质层中的有效扩散系数 } (cm^2/h) \\ u_1 & : \text{由脱屑而向皮肤表面转移的速度 } (cm/min) \\ Pfo & : \text{毛囊的渗透系数 } (cm/h) \end{array} \right|$$

如实验背景介绍中的内容，受试者在接受 BPS 的皮肤接触后，需要在实验进行的 75h 内收集每次排出的尿液^[11]。研究者需测量尿液中 BPS 与 BPS-g 的累计含量 ($mmol$)，具体做法为：对于单次排尿，首先记录排尿时间，然后测量本次排出尿液的化学品含量，对截止至本次（包括本次）的全部排尿中的化学品含量累计求和，将得到的求和数值作为本次排尿时间节点处的受试者尿液中 BPS 或 BPS-g 的累计含量，这样就得到了单次排尿的（排尿时间 t_i ，尿液累计化学品含量 A_i ）。将这样得到的所有数据点绘制在含量-时间坐标系内，可得到一幅散点图。

为了校准模型参数，需要使 PBPK 模型计算出的尿液中 BPS 与 BPS-g 含量之和的曲线拟合散点图中的散点。Hu 等人^[11]设置损失函数为真实受试者尿液化学品含量与 PBPK 模型结果中的尿液化学品含量之间的 MSE ，以三个待优化的参数为目标，利用 R 语言中的优化函数 `optim()` 最小化损失函数。函数的输出即为参数的校准值。

另外，根据 Khmiri 等人^[13]的研究，对受试者在固定时间节点采集血浆样本，并分析其中的 BPS 含量，将损失函数设置为真实受试者血药含量与 PBPK 模型结果中的血药含量之间的 MSE ，也是一种参数校准的手段。相对于人体其他组分，血浆或尿液更容易获取与分析化学性质。两种手段都以 PBPK 模型的输出类型之一为参照物，通过实验获得真实数据，与模型输出数据进行对比，以此来指导模型内部分参数的校准。

给定血药含量或尿药含量关于时间变化曲线上的散点，反演得到模型内的三个参数。基于这样的参数反演流程，本文使用了神经网络模型来辅助 PBPK 模型的参数校准，在传统优化算法之外提供了一种更有效且更快速的方法。本章介绍的是基于 Hu 等人^[11]提出的 PBPK 模型与模型参数数值，使用固定时间采样点数据训练的皮肤三参数反演神经网络模型。其中固定时间采样点的意思

是, 假设在理想情况下, 研究者能严格按照某组合理的预设时间节点采集受试者的血液与尿液. 该神经网络模型可以接收在固定时间点处采集的血浆和尿液中的 BPS 或 BPS-g 的含量, 也可以接收 PBPK 模型输出的血药含量, 尿药含量曲线在固定时间点处的采样点, 网络模型输出反演后的皮肤三参数组合. 该网络的数据集结构并未完全参考 Hu 等人^[11]的参数校准过程, 利用真实数据校准参数的网络模型将会在下一章介绍.

3.2 参数反演神经网络模型的数据集结构与构建

3.2.1 网络功能与数据集结构介绍

数据集的结构直接决定了网络的输入与输出数据的形状, 间接决定了网络的功能与效果, 同时网络功能的实现又需要设计合适的数据集结构, 故在此一齐介绍.

首先, 认为 PBPK 模型中除了皮肤三参数组合外的其他参数都已确定为常数, 并固定求解模型中微分方程组的时间格点与初值, 设置皮肤三参数组合为 PBPK 模型的求解模型的唯一输入, 将整个 PBPK 模型的求解模型抽象为一个函数, 如 (3.1) 所示, $\vec{\alpha}$ 代表皮肤三参数组合, \vec{A}_{BPS} 代表某一组分中的 BPS 含量在给定固定时间节点上的数值, 相应地, n 是时间节点组的节点数量,

$$f : (\mathbb{R}^3)^+ \rightarrow (\mathbb{R}^n)^+, \quad \vec{\alpha} \mapsto \vec{A}_{BPS}. \quad (3.1)$$

本章内介绍的参数反演神经网络的功能就是拟合 (3.1) 的反函数, 输入固定节点处血浆与尿液内 BPS 或 BPS-g 的含量数值构成的向量 $(A(t_1), A(t_2), \dots, A(t_n))$, 网络模型会输出一组近似的与输入对应的皮肤三参数组合 $\vec{\alpha}^*$.

数据集由特征 (feature) 与标签 (label) 构成, 特征是神经网络模型的输入, 标签是网络模型输出的对照物, 网络模型的输出是对标签的拟合. 一条数据包含一条特征和一条标签, 二者之间是绑定关系. 在本章的参数反演神经网络模型的数据集中, 一条特征是一个含有 n 个元素的一维数组, 实际含义是 PBPK 模型输出的 $A_{plasma}(t)$, $A_{urinebps}(t)$, $A_{urinebpsg}(t)$ 在固定时间节点 $\{t_i^{plasma}\}_{1 \leq i \leq n_1}$, $\{t_i^{urine}\}_{1 \leq i \leq n_2}$ 上的取样值. 一条标签是一个含有 3 个元素的一维数组, 实际含义是与代表 PBPK 模型输出的特征对应的皮肤三参数组合 $\vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$. 整个数据集由大量数据组成, 设置数据条数为 N , 则整个特征集是一个形状为 $N \times n$ 的二维数组, 通常记为 X ; 与之对应的标签集是一个形状为 $N \times 3$ 的二维数组, 通常记为 y .

3.2.2 标签集的构建

标签集, 一个 $N \times 3$ 的二维数组, 由 N 条皮肤三参数组合组成. 由于 DSC , u_1 , Pfo 这三个参数的数量级较小, 为了更方便地表示其数值, 将标签 $\vec{\alpha}$ 设置如下: 在原参数数值前乘以一个系数, 使得调整后的参数数量级处在 10^0 或 10^1 ,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= DSC \times 10^9, \\ \alpha_2 &= u_1 \times 10^5, \\ \alpha_3 &= Pfo \times 10^5. \end{aligned}$$

本文使用了两种方式得到大量不同的皮肤三参数组合 $\vec{\alpha}$ 数据, 分别是依概率分布随机取样以及稀疏网格法 (Sparse Grids). 之后将两种方法得到的数据合并在一起, 构成本章神经网络使用的标签集. 以下是两种构建方法的具体介绍.

截断正态分布取样

Hu 等人^[11]提出了该种取样方法, 并提供了皮肤三参数 α_i 的平均值 $mean_i$, 并设定每个参数的变异系数 $CV_i = 0.3$, 通过公式 $std = CV \times mean$ 可得到三个参数的标准差 std_i . 分别建立三个参数的截断正态分布, 分布的平均值为 $mean_i$, 标准值为 std_i , 左截断点为 $lb_i = mean_i - 1.96 \times std_i$, 右截断点为 $ub_i = mean_i + 1.96 \times std_i$. 确定截断正态分布后, 使用 Python 第三方库函数 `scipy.stats.truncnorm()` 根据三种概率分布对三个参数进行独立的采样, 采样 α_1 共 32 个, α_2 共 28 个, α_3 共 28 个. 接下来取它们的笛卡尔积, 得到 $32 \times 28 \times 28 = 25,088$ 组皮肤三参数组合 $\vec{\alpha}$.

稀疏网格法

稀疏网格法^[15-16]是一种可用于在高维参数空间取样的高效方法. 以 m 维参数空间下的同维度等距的网格为例, 有如下的稀疏网格生成迭代步骤:

1. 设置复杂度 $k \in \mathbb{N}^+$, 设置参数取样的平均值或中心点 $\bar{x} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m)$ 以及每个维度取样的上下界 $\{u_i, l_i\}_{1 \leq i \leq m}$ (应满足 $\frac{u_i + l_i}{2} = \bar{x}_i$). 第 i 个维度的网络格点间距 $\Delta x_i = (u_i - l_i) \times 2^{-k}$. 如此, 便得到了一个 m 维空间上含有 $(2^k + 1)^m$ 个格点的网格, 称该网格为密网格.
设置迭代步 p , 初始 $p = 1$. 初始状态下稀疏网格只有中心点 \bar{x} 一个点, 设置 \bar{x} 为起点 x_{start} , 加入至起点集 S .
2. 若 $2^{k-p} - 1 < 1$, 则取样结束. 否则, 向下执行.
3. $\forall x_{start} \in$ 起点集 S , 从该点出发, 向每个维度的正负方向共 $2 \times m$ 个方向上分别以 $2^{(p-1)} \cdot \Delta x_i$ 为步长连续不间断地在密网络上取 $2^{k-p} - 1$ 个格点加入到稀疏网格中. 例如, 在第 i 个维度的正方向上取

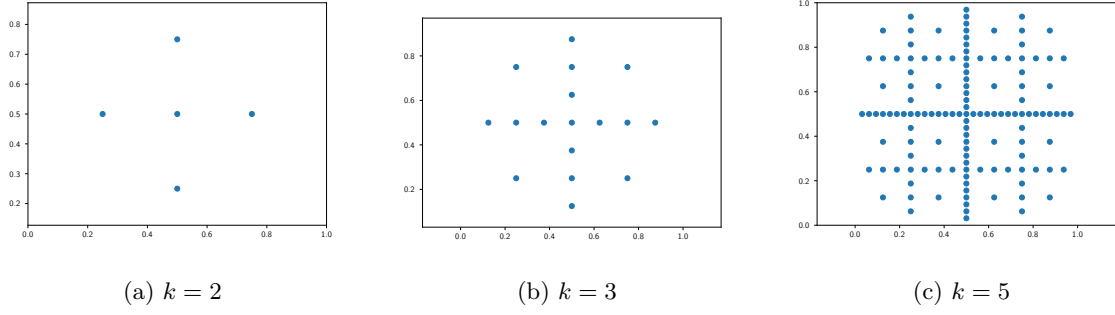
$$\{(x_{start}^1, \dots, x_{start}^{i-1}, x_{start}^i + j \cdot 2^{(p-1)} \cdot \Delta x_i, x_{start}^{i+1}, \dots, x_{start}^m)\}_{1 \leq j \leq 2^{k-p}-1}.$$

当迭代步数 $p \geq 2$ 时, 若密网格在 x_{start} 的某方向上 (不妨设为第 q 个维度) 有与 x_{start} 距离小于等于 $2^{(p-1)} \cdot \Delta x_q$ 的点已被加入至稀疏网格中, 则不在 x_{start} 的该方向上取点, 并称该方向为 x_{start} 的未取样方向. 在该步骤中, 会有被重复放入稀疏网格中的密网格上的点, 在稀疏网格中视作同一元素.

4. 当 $p = 1$ 时, $\forall 1 \leq i \leq m$, 将中心点 \bar{x} 在第 i 维度正负两个方向上与之距离为 $(u_i - l_i) \times 2^{-(p+1)}$ 的两个点加入至起点集中 S , 共有 $2 \times m \times 2^{m \times (p-1)}$ 个新的起点被加入至起点集 S 中, 删去起点集中除了新起点外的起点.

当 $p \geq 2$ 时, $\forall x_{start} \in$ 起点集 S , 从该点出发, 找到并记录稀疏网格在 x_{start} 除未取样方向的方向上与之距离为 $(u_i - l_i) \times 2^{-p}$ 的点, 加入至分形中心点集 M . 在此过程中, 会有被重复放入 M 的密网格上的点, 在 M 中视作同一元素. 接下来, $\forall x_{middle} \in$ 分形中心点集 M , 从该点出发, 找到并记录稀疏网格在 x_{middle} 在每个维度正负两个方向共 $2 \times m$ 个方向上与之距离为 $(u_i - l_i) \times 2^{-(p+1)}$ 的点, 加入至起点集 S 中. 共有 $2 \times m \times 2^{m \times (p-1)}$ 个新的起点被加入至起点集 S 中, 删去起点集中除了新起点外的起点.

5. $p = p + 1$, 并跳转至步骤 2.

图 3.1: 不同复杂度 k 下的二维稀疏网络

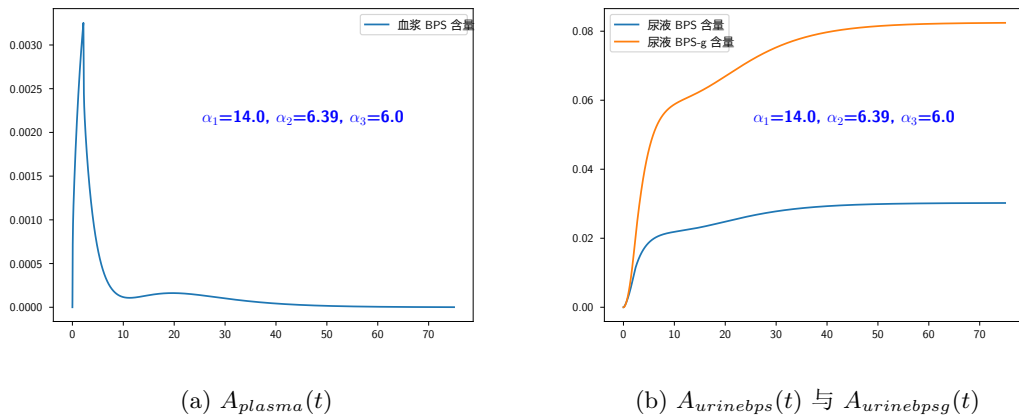
该部分标签集的构造使用了复杂度 $k = 9$ 的三维稀疏网格法, 其中中心点为 $(mean1, mean2, mean3)$, $u_1 - l_1 = 14$, $u_2 - l_2 = 10$, $u_3 - l_3 = 9$, 这些数值的设定参考了截断正态分布取样法. 通过稀疏网格法共得到了 18943 条皮肤三参数组数据. 两种方法得到的标签集拼接起来共 44031 条数据, 整个标签集的形状为 44031×3 .

3.2.3 特征集的构建

一条特征和一条标签互相唯一对应, 本章中的参数反演神经网络模型使用的特征集也有 44031 条. 对于标签集矩阵的每一行的皮肤三参数组, 将其代入至 PBPK 模型的求解模型, 得到血浆中 BPS 的含量 $A_{plasma}(t)$, 尿液中 BPS 和 BPS-g 的累计含量 $A_{urinebps}(t)$, $A_{urinebpsg}(t)$ 关于时间变化的曲线. 为了适配人体实验中的真实采样数据, 模拟真实采样情景, 需要对曲线做采样. 以下介绍了两种特征集的构造, 将分别用于训练两种不同的参数反演神经网络模型.

血药含量采样 28 点 & 尿药含量采样 15 点

此小节的采样时间点设置参考了前人人体实验的设定^[11,13], 且结合了曲线的特性. 如图3.2所示, 曲线的总时间轴是 $0 \sim 75h$, 相较于其他时间段, $A_{plasma}(t)$ 在 $0 \sim 10h$ 的变化十分强烈, 需要在该时间段内取样额外多的时间点, 以更好地捕捉到曲线的特征.

图 3.2: $\vec{\alpha} = (14, 6.39, 6)$ 时 PBPK 模型输出的部分曲线图像

一条血药含量曲线上共采样 28 个时间点 (单位: h):

(0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 24, 30, 36, 42, 50, 60, 72).

两条尿药含量曲线上分别采样相同的 15 个时间点 (单位: h):

(1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 24, 30, 36, 42, 50, 60, 72).

图3.3展示了三条含量曲线的采样点的位置. 一条标签对应的三条曲线在固定时间节点处共采样了 58 个化学品含量数据, 一条特征即为含有 58 个元素的一维数组, 对应的标签为 PBPK 模型的输入皮肤三参数组, 整个特征集为形状是 44031×58 的二维数组.

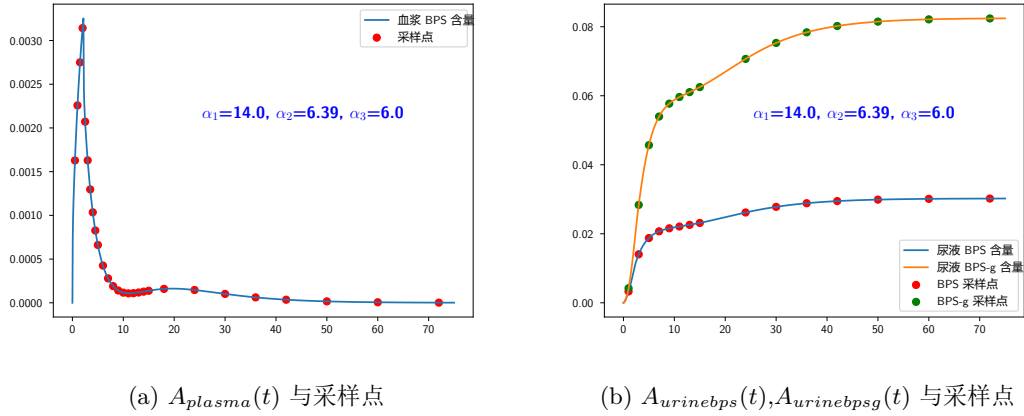


图 3.3: $\vec{\alpha} = (14, 6.39, 6)$ 时 PBPK 模型输出的部分曲线与采样点的图像 A

血药含量采样 5 点 & 尿药含量采样 5 点

该部分特征集的构建欲探究减少采样点的可行性. 如图3.2a所示, $A_{plasma}(t)$ 的图像有两个极大值和一个极小值, 第一个极大值也是最大值 MAX_{plasma} . 最大值点出现在曲线变化幅度大的时段, 三个极值点都处在非平缓的时间段. 对于标签集中每一条皮肤三参数对应的 PBPK 输出中的 $A_{plasma}(t)$, 将其图像中的三个极值点设置为采样点, 记录这三个点的位置. 另外, 为了捕捉到更多曲线变化剧烈处的特征信息, 将满足 $\underset{0 < t < \text{极小值点}}{\operatorname{argmin}} |A_{plasma}(t) - 0.5 \cdot MAX_{plasma}|$ 的两个半衰期点也设置为采样点, 记录这两个点的位置. 将标签集对应的所有血药含量曲线的五个采样点都绘制在同一图像中, 如图3.4所示:

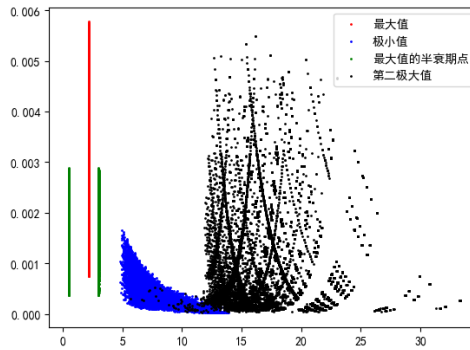


图 3.4: 所有 $A_{plasma}(t)$ 曲线的五个采样点

可以看到最大值点与两个半衰期点的位置几乎是固定的, 极小值点与第二极大值点几乎都在 $30h$ 前出现. 对于五种采样点, 计算图3.4中每种采样点位置的平均值, 将得到的五个平均值作为全局的固定采样点, 它们分别为 $(0.49, 2.165, 3.005, 8.22, 18.255)$.

对于 $A_{urinebps}(t)$ 与 $A_{urinebpsg}(t)$, 由于它们是浓度累计曲线 (如图3.2b), 难以像血浆 BPS 含量曲线一样从曲线形状来确定较少的采样点. 由于 $A_{urinebps}(t)$ 是数值求解的结果, 本质上是一个离散的数组, 故可以对其做一阶差分, 得到某个 $A_{urinebps}(t)$ 的一阶差分曲线如图3.5所示:

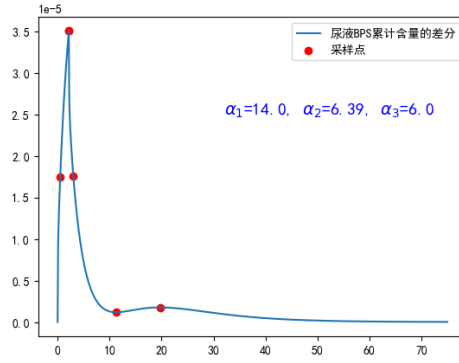


图 3.5: $\vec{\alpha} = (14, 6.39, 6)$ 时 $A_{urinebps}(t)$ 的一阶差分曲线

可以看到 $A_{urinebps}(t)$ 的一阶差分曲线有类似于 $A_{plasma}(t)$ 曲线的图像模式, 利用得到血浆曲线的五个全局固定采样点的方式可以得到两条尿液化学品累计含量曲线的五个全局固定采样点, 它们分别为 $(0.505, 2.165, 3.04, 8.265, 13.305)$. 图3.6展示了三条含量曲线的五个固定采样点的位置.

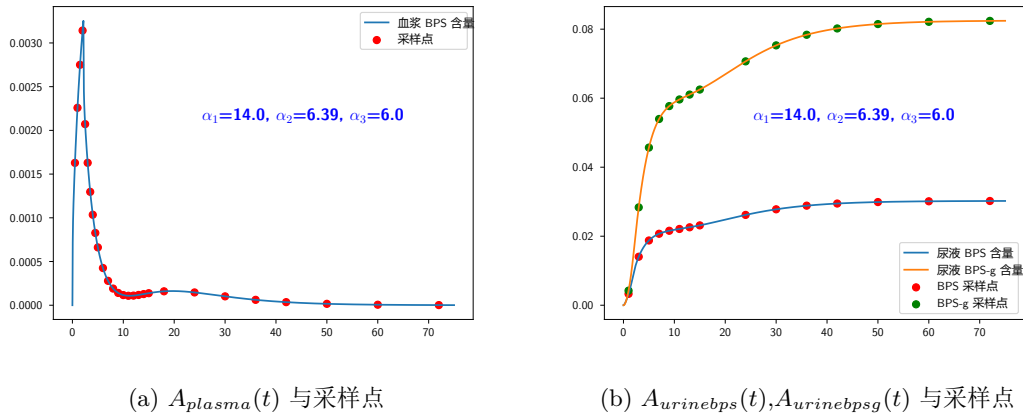


图 3.6: $\vec{\alpha} = (14, 6.39, 6)$ 时 PBPK 模型输出的部分曲线与采样点的图像 B

确定了血浆曲线与尿液曲线的全局固定采样时间点后, 便可以确定特征集. 一条标签对应的三条曲线在固定时间节点处共采样了 15 个化学品含量数据, 一条特征即为含有 15 个元素的一维数组, 对应的标签为 PBPK 模型的输入皮肤三参数组, 整个特征集为形状是 44031×15 的二维数组.

3.3 参数反演神经网络模型的架构

为了使网络模型在多全连接层的情况下的性能退化问题, 本文的神经网络模型使用了残差连接的方法, 具体实现手段为引入了一个残差网络模块. 该模块由六层构成, 第一层和第四层为全连接层, 第二层和第五层为标准化层, 第三层和第六层为激活函数层, 使用的激活函数为 $Relu()$. 图片3.7展示了该模块的架构, 其中每一层的输入和输出的二维数组的形状都是 $batchsize \times hiddensize$, 其中 $batchsize$ 是一个批次的数据条数, $hiddensize$ 是可自定义的隐藏层神经元数量.

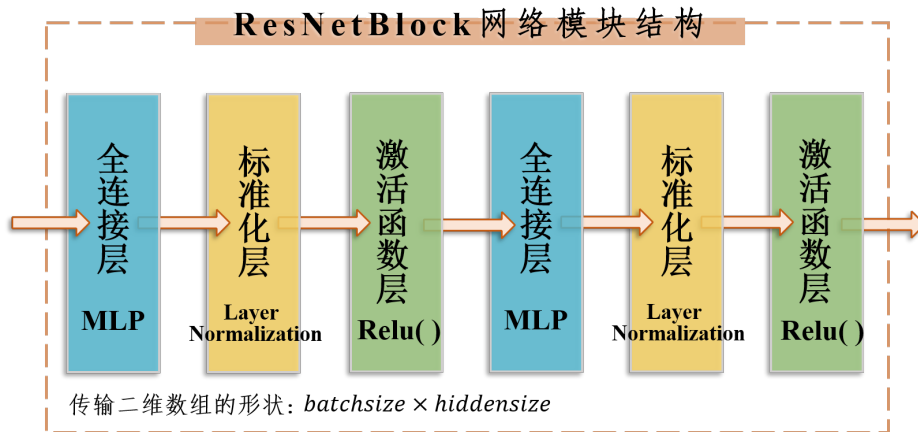


图 3.7: 残差网络模块的架构

该模块的最终输出结果是第六层的输出与第一层的输入的和, 相对于第六层输出的是期望输出和真实输出之间的残差, 这样的设定使得网络可以学习到残差映射, 同时保留了原始的输入并将其直接传输到了该模块的输出^[17-18]. 残差网络中的跳跃连接能够缓解深层网络下的性能退化与优化困难问题^[18]. 标准化层使用了层标准化手段 (layer-normlization), 使得输入数据在输出该层时能够具有零均值与单位方差的性质, 同时该标准化手段并不依赖于 $batchsize$ 的大小^[19]. 层标准化有效解决了深度网络情况下梯度爆炸与梯度消失的问题. 激活层的 $Relu()$ 的作用是对输入该层的数据逐元素取其正部. 它能够提高计算速率, 使得前向与反向传播的速度更快, 且保留正部而不是压缩数值的激活方式能够缓解梯度消失的问题^[20].

整个神经网络的架构串联拼接了 $hidden_nums$ 个残差网络模块, 并在串联组前后都添加了一层全连接网络, 输入端还额外添加了一个激活函数 $Relu()$ 层. 图片3.8展示了该模块的架构,

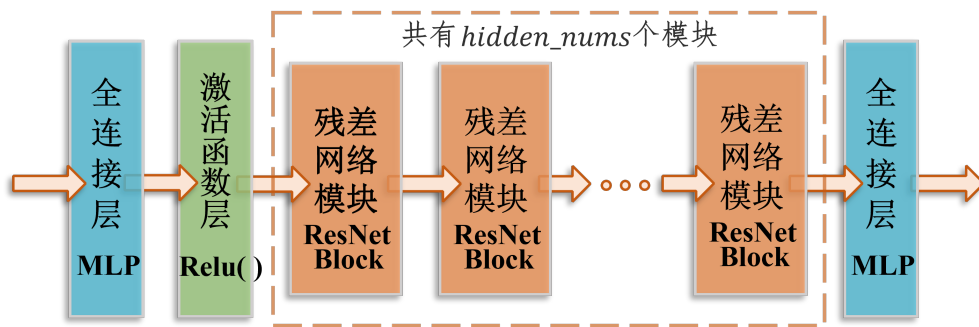


图 3.8: 本文神经网络模型的结构

附录 A 代码

1.1 代码环境

--

附录 B PBPK 模型物理量名称-含义对照表

模型中待求解变量

$C_{SCi}(t)$	暴露皮肤组织的深度为 $i \times \frac{T_{SC}}{10}$ 的角质层在 t 时刻的 BPS 浓度 ($nmol/cm^3$)
$A_{Fo}(t)$	暴露皮肤组织的毛囊在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{well}(t)$	暴露皮肤组织的表皮储仓在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{VE}(t)$	暴露皮肤组织的活性表皮在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{ST}(t)$	胃部在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{skin}(t)$	未暴露皮肤组织在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{fat}(t)$	脂肪组织在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{gonad}(t)$	性腺在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{plasma}(t)$	血浆在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{brain}(t)$	脑部在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{rich}(t)$	血流丰富组织在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{slow}(t)$	血流缓慢组织在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{GIBPSg}(t)$	胃肠道在 t 时刻的 BPS-g 含量 ($nmol$)
$A_{GIBPSs}(t)$	胃肠道在 t 时刻的 BPS-s 含量 ($nmol$)
$A_{SI}(t)$	小肠在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{liver}(t)$	肝脏在 t 时刻的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{BPSg_delay}(t)$	发生了肝肠循环的 BPS-g 的量/小肠在 t 时刻的 BPS-g 含量 ($nmol$)
$A_{BPSs_delay}(t)$	发生了肝肠循环的 BPS-s 的量/小肠在 t 时刻的 BPS-s 含量 ($nmol$)
$A_{BPSg}(t)$	整个机体在 t 时刻的 BPS-g 含量 ($nmol$)
$A_{BPSs}(t)$	整个机体在 t 时刻的 BPS-s 含量 ($nmol$)
$A_{urinebps}(t)$	人体排出的尿液在 t 时刻累计的 BPS 含量 ($nmol$)
$A_{urinebpsg}(t)$	人体排出的尿液在 t 时刻累计的 BPS-g 含量 ($nmol$)

其他变量

$\varphi(x, t)$	暴露皮肤组织的角质层深度 x 处在 t 时刻的 BPS 浓度 ($nmol/cm^3$),
$f_1(t)$	皮肤接触外源 BPS 的量 ($nmol$), 当 $t > Time_{add}$ 时, $f_1(t) = 0$
$ON(t)$	布尔值, 当 $t \leq Time_{expose}$ 时, $ON(t) = 1$, 皮肤处于 BPS 暴露状态; 当 $t > Time_{expose}$ 时, $ON(t) = 0$, 皮肤处于未暴露状态
$f_2(t)$	口服外源 BPS 的量 ($nmol$), 本文中不考虑口服情况, $f_2(t) = 0$

待反演的参数

DSC	角质层中的有效扩散系数 (cm^2/h)
u_1	由脱屑而向皮肤表面转移的速度 (cm/min)
Pfo	毛囊的渗透系数 (cm/h)

理化数据中的常量

T_{SC}	角质层的深度 (um)
$SCDX$	角质层的深度的 $\frac{1}{10}$ (um)
HSC_{well}	角质层和皮肤表皮储仓之间的分配系数
V_{well}	暴露皮肤组织的表面储仓体积 (L)
HSC_{VE}	角质层和活性表皮之间的分配系数
V_{TVE}	暴露皮肤组织的活性表皮层体积 (L)
$AEXP$	暴露皮肤组织面积 (dm^2)
$FEXP$	暴露皮肤组织中毛囊的面积分数
HFO_{well}	毛囊和皮肤表皮储仓之间的分配系数
V_{TFO}	暴露皮肤组织的毛囊体积 (L)
Q_{skin}	皮肤血液流速 (L/h)
p_{skin}	皮肤-血浆分配系数
BSA	人体皮肤表面积 (dm^2)
V_{plasma}	血浆体积 (L)
k_0	口服给药时 BPS 从胃进入肝脏的系数 (h^{-1})
k_1	口服给药时 BPS 从小肠进入肝脏的系数 (h^{-1})
ge	口服给药时 BPS 由胃转移至小肠的系数 (h^{-1})
V_{TSC}	暴露皮肤组织的角质层体积 (L)
V_{skin}	皮肤组织的体积 (L)
Q_{fat}	脂肪组织血液流速 (L/h)
V_{fat}	脂肪组织的体积 (L)
p_{fat}	脂肪-血浆分配系数
Q_{gonad}	性腺血液流速 (L/h)
V_{gonad}	性腺的体积 (L)
p_{gonad}	性腺-血浆分配系数
$K_{urinebps}$	BPS 尿液排泄参数 (L/h)
Q_c	心脏血液流速 (L/h)
Q_{brain}	脑部血液流速 (L/h)
V_{brain}	脑部的体积 (L)
p_{brain}	脑部-血浆分配系数
Q_{rich}	血流丰富组织血液流速 (L/h)
V_{rich}	血流丰富组织的体积 (L)

$prich$	血流丰富组织-血浆分配系数
Q_{slow}	血流缓慢组织血液流速 (L/h)
V_{slow}	血流缓慢组织的体积 (L)
$pslow$	血流缓慢组织-血浆分配系数
Q_{liver}	肝脏血液流速 (L/h)
V_{liver}	肝脏的体积 (L)
$pliver$	肝脏-血浆分配系数
kGI_{ing}	口服给药 BPS-g 从肠到血中的系数 (h^{-1})
kGI_{ins}	口服给药 BPS-s 从肠到血中的系数 (h^{-1})
$V_{maxgutg}$	肠道中 BPS 葡萄糖酸化的最大反应速度 ($nmol/h$)
$V_{maxguts}$	肠道中 BPS 硫酸盐化的最大反应速度 ($nmol/h$)
$enterocytes$	小肠体积 (L)
K_{mgutg}	肠道中 BPS 葡萄糖酸化的米氏常数 ($nmol$)
K_{mguts}	肠道中 BPS 硫酸盐化的米氏常数 ($nmol$)
K_{sigutg}	肠道中葡萄糖酸化结合底物抑制常数 ($nmol$)
$k_{enterobpsg}$	BPS-g 肝肠循环使得 BPS 发生循环的速率 (h^{-1})
$k_{enterobpss}$	BPS-s 肝肠循环使得 BPS 发生循环的速率 (h^{-1})
$K_{mliverg}$	肝脏中 BPS 葡萄糖酸化的米氏常数 ($nmol$)
$V_{maxliverg}$	肠道中 BPS 葡萄糖酸化的最大反应速度 ($nmol/h$)
$K_{mlivers}$	肝脏中 BPS 硫酸盐化的米氏常数 ($nmol$)
$V_{maxlivers}$	肠道中 BPS 硫酸盐化的最大反应速度 ($nmol/h$)
$met1g$	肝脏中 BPS-g 进入血液中的比例
$met1s$	肝脏中 BPS-s 进入血液中的比例
$met2g = 1 - met1g$	肝脏中 BPS-g 进入肝肠循环的比例
$met2s = 1 - met1s$	肝脏中 BPS-s 进入肝肠循环的比例
k_{entero}	BPS-g 肝肠循环的速率 (h^{-1})
k_{4IV}	BPS-g 在肝肠循环中的粪便消除系数 (h^{-1})
$K_{urinebpsg}$	BPS-g 的尿液排泄参数 (L/h)
V_{bodyg}	参与 BPS-g 分布的组织体积 (L)
$K_{urinebpss}$	BPS-s 的尿液排泄参数 (L/h)
$V_{body s}$	参与 BPS-s 分布的组织体积 (L)

实验设置的常量

$Time_{add} = \frac{1}{6}h$	手指皮肤触摸热敏纸 (外源 BPS) 的时间 (h)
$Time_{expose} = \frac{13}{6}h$	手指皮肤表皮储仓内 BPS 含量大于 0 的时间 (h)

参考文献

- [1] VANDENBERG L N, HAUSER R, MARCUS M, et al. Human exposure to bisphenol a (bpa)[J/OL]. *Reproductive Toxicology*, 2007, 24(2): 139-177. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890623807002377>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2007.07.010>.
- [2] RUBIN B S. Bisphenol a: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects[J/OL]. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2011, 127(1): 27-34. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960076011001063>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>.
- [3] 张益宁周颖. 双酚 A 的生理毒代动力学 (PBTK) 模型构建研究 [J]. *食品与营养科学*, 2021.
- [4] CORBEL T, GAYRARD V, PUEL S, et al. Bidirectional placental transfer of bisphenol a and its main metabolite, bisphenol a-glucuronide, in the isolated perfused human placenta[J/OL]. *Reproductive Toxicology*, 2014, 47: 51-58. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890623814001026>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2014.06.001>.
- [5] 赫淑铭刘娴 傅建捷张爱茜 江桂斌. 双酚类化合物的生物代谢机理研究进展 [J/OL]. *环境化学*, 2024, 43: 711. <http://hjhx.rcees.ac.cn/article/id/648a6a10c59bc3243d453c96>. DOI: [10.7524/j.issn.0254-6108.2023041401](https://doi.org/10.7524/j.issn.0254-6108.2023041401).
- [6] PELCH K, WIGNALL J A, GOLDSTONE A E, et al. A scoping review of the health and toxicological activity of bisphenol a (bpa) structural analogues and functional alternatives[J/OL]. *Toxicology*, 2019, 424: 152235. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300483X18306668>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2019.06.006>.
- [7] SHUYING ZHANG J C, ZhongYu WANG. Application of physiologically based toxicokinetics models in risk assessment of chemicals[J/OL]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(35): 4139-4150. <http://www.sciengine.com/publisher/ScienceChinaPress/journal/ChineseScienceBulletin/62/35/10.1360/N972017-00886>. DOI: <https://doi.org/10.1360/N972017-00886>.
- [8] 孙晋都. 纳米银体内外动力学研究及生理毒物动力学模型 (PBTK) 构建 [D]. 南京, 江苏: 东南大学, 2017.
- [9] YANG X, DOERGE D R, TEEGUARDEN J G, et al. Development of a physiologically based pharmacokinetic model for assessment of human exposure to bisphenol a[J/OL]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2015, 289(3): 442-456. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041008X15301198>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.10.016>.
- [10] KARRER C, ROISS T, VON GOETZ N, et al. Physiologically based pharmacokinetic (pbpk) modeling of the bisphenols bpa, bps, bpf, and bpaf with new experimental metabolic param-

- eters: Comparing the pharmacokinetic behavior of bpa with its substitutes[J/OL]. *Environmental Health Perspectives*, 2018, 126(7): 077002. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/abs/10.1289/EHP2739>.
- [11] HU M, ZHANG Z, ZHANG Y, et al. Development of human dermal pbpk models for the bisphenols bpa, bps, bpf, and bpaf with parallel-layered skin compartment: Basing on dermal administration studies in humans[J/OL]. *Science of The Total Environment*, 2023, 868: 161639. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723002541>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161639>.
- [12] YINGZHOU8. Pbk[EB/OL]. 2022. <https://github.com/YingZhou8/PBK>.
- [13] KHMIRI I, Côté J, MANTHA M, et al. Toxicokinetics of bisphenol-s and its glucuronide in plasma and urine following oral and dermal exposure in volunteers for the interpretation of biomonitoring data[J/OL]. *Environment International*, 2020, 138: 105644. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019349967>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105644>.
- [14] HINDMARSH A C. Odepack: A systematized collection of ode solvers[J]. *Scientific Computing*, 1983.
- [15] GARCKE J. Sparse grids in a nutshell[C/OL]//2012. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:33937930>. DOI: 10.1007/978-3-642-31703-3_3.
- [16] BUNGARTZ H J. Sparse grids[J/OL]. *Acta Numerica*, 2004, 13: 147 - 269. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:229170630>.
- [17] ZAEEMZADEH A, RAHNAVAR N, SHAH M. Norm-preservation: Why residual networks can become extremely deep?[J/OL]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021, 43(11): 3980-3990. DOI: 10.1109/TPAMI.2020.2990339.
- [18] LIU F, REN X, ZHANG Z, et al. Rethinking skip connection with layer normalization[C/OL]// SCOTT D, BEL N, ZONG C. *Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics*. Barcelona, Spain (Online): International Committee on Computational Linguistics, 2020: 3586-3598. <https://aclanthology.org/2020.coling-main.320>. DOI: 10.18653/v1/2020.coling-main.320.
- [19] BA J, KIROUS J R, HINTON G E. Layer normalization[J/OL]. *ArXiv*, 2016, abs/1607.06450. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:8236317>.
- [20] LIU C, HUI L. Relu soothes the ntk condition number and accelerates optimization for wide neural networks[Z]. [S.l.: s.n.], 2023.

致 谢

致谢