

第一章 概 论

抗体研究已有百余年历史,关于抗体形成是由遗传决定的还是后天获得的曾有过激烈的争论。现代研究证明,在接受抗原刺激以前机体所具有的抗体多样性是由遗传决定的,但抗体的亲和力成熟及类别转换则是在抗原刺激之后发生的,因而片面强调遗传的决定性或抗原的关键作用均有失偏颇。抗体产生技术在 20 世纪的最后 25 年内发生了革命性的变化,由单克隆抗体,基因工程改造的抗体,直至全人源抗体,从一个侧面反映了生命科学由整体水平、细胞水平到基因水平的进展,同时也为抗体作为生物技术产业的重要支柱奠定了基础。

抗体是机体免疫系统中最重要效应分子,具有结合抗原、结合补体、中和毒素、介导细胞毒、促进吞噬和通过胎盘等功能,发挥抗感染、抗肿瘤、免疫调节与监视等作用。目前抗体在同种异体免疫排斥、自身免疫反应抑制、抗血小板治疗、癌症治疗、感染性疾病治疗等方面应用最为广泛,展现了诱人的市场前景。据报道,目前处于临床前期、临床 I 期与临床 II 期研究与开发的各类生物技术药物中,单抗药物的品种数量位居前列。本章以抗体的发展为主线,主要介绍抗体研究的简史、研究现状及发展趋势等。

第一节 抗体研究的简史

一、抗体的发现及结构研究

在免疫学发展的早期,人们应用细菌或其外毒素给动物注射,经一定时期后用体外实验证明,在其血清中存在一种能特异中和外毒素的组分,称之为抗毒素,或能使细菌发生特异性凝集的组分,称之为凝集素。其后将血清中这种具有特异性反应的组分称为抗体(antibody, Ab),而将能刺激机体产生抗体的物质称为抗原(antigen, Ag),由此建立了抗原和抗体概念。

1937 年, Tiselius 和 Kabat 用电泳鉴定,证明抗体是 γ -球蛋白。动物在免疫后,血清中 γ -球蛋白显著增高,此部分有抗体活性,从而可将抗体从血清中分离出来,抗体主要存在于 γ -球蛋白中。

1959 年, Porter 和 Edelman 对抗体结构进行了研究,证明它是由四肽链组成,借二硫键连接在一起。抗体的氨基端结合抗原,决定抗原结合的特异性,称 F(ab)₂ 段;抗体羧基端不能结合抗原,但具有抗体的其他功能,此段易产生结晶,称 Fc 段,从而在分子水平阐明了抗体的结构。这一发现具有重大的意义:在应用上,经酶解获得抗体的 F(ab)₂ 段,可减少使用中的超敏反应;在理论上,将抗体特异性的研究集中于分析 F(ab)₂ 段的氨基酸组成特点,导致以后的抗体可变区及其抗原结合部位的发现。

进入 20 世纪 60 年代,国际上统一了抗体的名称和分类: IgG, IgM, IgA, 并发现了 IgD 和 IgE。

20 世纪 70 年代,日本的利根川进等应用分子杂交技术证明并克隆出 Ig 分子 V 区和 C 区基因。同时应用克隆 cDNA 片段作为探针,证明了 B 细胞在分化发育过程中编码 Ig 的基

因结构，阐明了 Ig 抗原结合部位多样性的起源，以及遗传和体细胞突变在抗体多样性形成中的作用，因此获得 1987 年诺贝尔医学奖。

此后随着分子生物学的兴起，从基因水平揭示了抗体多样性产生的机制。基因重排现象被发现后，1978 年，Tonegawa 应用基因重排技术发现了免疫球蛋白编码基因的重排。重排后，形成由不同基因节段组成的功能基因编码不同氨基酸序列的蛋白，从而产生了不同特异性的抗体。

二、抗体相关理论研究

20 世纪上半叶，对抗体的分子结构及其功能的研究非常详尽，与此同时，对抗体的形成也提出了不少学说。

1900 年，Ehrlich 提出抗体生成的侧链学说，他认为抗毒素分子是细胞表面的一种受体，外毒素进入机体后与之结合，刺激细胞产生更多的抗毒素分子，这些分子自细胞表面脱落进入血流，即是抗体。由于这一学说证据不足而长期被束之高阁。

1930 年，Breinl 和 Haurowitz 提出模板学说，认为抗原分子是模板，抗体是直接按抗原分子的特点形成的。

1940 年，Pauling 根据抗体是 γ -球蛋白的知识，提出可变折叠学说，即抗体是 γ -球蛋白多肽按抗原分子特点进行结构互补折叠形成。

1955 年，Jerne 提出了天然抗体选择学说，认为在机体循环内存在着很低浓度的针对各种抗原的抗体，当机体接触某一抗原时，此抗原即与相应的特异抗体反应，形成的抗原-抗体复合物可刺激更多细胞产生针对该抗原的特异性抗体。

1957 年，澳大利亚的 Burnet 综合 Ehrlich 的侧链学说和 Jerne 的自然选择学说两学说的关键(细胞抗原受体和抗原抗体选择性结合)，提出了抗体生成的克隆选择学说。其要点是：①机体内存在识别多种抗原的细胞系，其细胞表面具有识别抗原的受体。②抗原进入体内后，选择相应受体的免疫细胞使之活化、增殖，形成抗体产生细胞及免疫记忆细胞。③胎儿期免疫细胞与自身抗原相接触则可被破坏，形成耐受状态。④免疫细胞系可突变，产生出同自身抗原发生反应的细胞因子，从而形成自身免疫。此学说不仅阐明了抗体产生的机制，同时对许多重要免疫生物学现象都做了解答，如对抗原的识别、免疫记忆的形成、自身耐受的建立以及自身免疫的发生等现象。但由于受当时科学水平的限制，尚未发现 T 细胞、B 细胞、组织相容性抗原(MHC)的自身限制等。

到了 20 世纪 70 年代，发现了抗体独特基因型。1974 年，Jerne 提出免疫网络学说，认为机体免疫系统是一个建立在识别自身抗原基础上来识别外来抗原的系统，抗体分子的可变区(V)结构域具有双重特性，它通过抗原结合部位与抗原结合，又借助于独特型决定簇引发免疫应答。其主要内容为：抗原刺激发生之前，机体处于一种相对的免疫稳定状态；抗原进入机体后，打破了这种平衡，产生特异性抗体分子；当抗体达到一定量时，将引起抗抗体分子独特型的免疫应答，即抗独特型抗体，使受增殖的克隆受到抑制，而不是无休止地增殖，借以维持免疫应答的稳定平衡。这一学说把免疫应答看成是免疫细胞和抗体分子相互作用的网络调节的结果，从一个新的角度解释了免疫耐受、自身免疫和变态反应等免疫现象。

三、抗体技术的发展

抗体技术领域的进展大致可分为三个阶段：

- ① 以 1890 年 Behring 和 Kitasato 发现白喉抗毒素为代表，其特点是用抗原免疫动物来获得多克隆抗体。
- ② 以 1975 年 Kohler 和 Milstein 创建杂交瘤技术制备单克隆抗体为代表。
- ③ 以 1994 年 Winter 采用基因工程方法制备抗体为代表。这是抗体研究领域出现的又一次技术革命，在此基础上发展成为抗体工程。

(一) 多克隆抗体

1888 年，Emile Roux 和 Yersin 在研究白喉发病机制时，发现白喉菌能产生外毒素。在此基础上，1890 年，德国人 Behring 和日本人北里(Kitasato)将白喉外毒素注射给动物，发现在该动物血清中存在一种能中和白喉外毒素的物质，他们称之为抗毒素。将具有抗毒素的免疫血清注入正常动物体内，可使后者同样对白喉毒素有抵抗力。他们以同样的方法用这种免疫血清成功地治愈了一例患白喉病的女孩，这是第一次用人工被动免疫的方法治疗疾病。由于开创了人工被动免疫治疗疾病的方法，两位学者在 1901 年荣获诺贝尔奖。

(二) 单克隆抗体

1975 年，英国剑桥的科学家 Kohler 和 Milstein 发明了杂交瘤技术。由于他们的这一卓越贡献，与丹麦人 Jerne 共获 1984 年诺贝尔生理学或医学奖。他们将小鼠骨髓瘤细胞和经绵羊红细胞(sheep red blood cell, SRBC)免疫的小鼠脾细胞在体外进行融合，结果发现部分形成的杂交细胞既能继续在体外培养条件下生长繁殖，又能分泌抗 SRBC 抗体，称这种杂交细胞系为杂交瘤(hybridoma)。这种杂交瘤细胞既具有骨髓瘤细胞能大量无限生长繁殖的特性，又具有抗体形成细胞合成和分泌抗体的能力。它们是由识别一种抗原决定簇的细胞克隆所产生的均一性抗体，故称之为单克隆抗体。应用杂交瘤技术可获得几乎所有抗原的单克隆抗体，只要这种抗原能引起小鼠的抗体应答。与多克隆抗体相比，这种用杂交瘤技术制备的单克隆抗体可视为第二代抗体。

单克隆抗体纯度高、特异性强、可以提高各种血清学方法检测抗原的敏感性及特异性，其应用大大促进了对各种传染病和恶性肿瘤诊断的准确性。单克隆抗体亦可与放射性核素、各种毒素(如白喉外毒素或蓖麻毒素)或药物通过化学耦联或基因重组制备成导向药物用于肿瘤的治疗，是一种新型免疫治疗方法，有可能提高对肿瘤的疗效。此外，单克隆抗体亦可用于对各种免疫细胞及其他组织细胞表面分子的检测，这对免疫细胞的分离、鉴定、分类及研究各种膜表面分子的结构与功能都具有重要意义。

但美中不足的是，目前绝大多数单克隆抗体是鼠源的，临床重复给药时体内产生抗鼠抗体，使临床疗效减弱或消失。因此，临床应用理想的单克隆抗体应是人源的，但人-人杂交瘤技术目前尚未突破，即使研制成功，也还存在人-人杂交瘤体外传代不稳定、抗体亲和力低及产量不高等问题。目前较好的解决办法是研制基因工程抗体以代替鼠源单克隆抗体用于临床。

(三)基因工程抗体

基因工程抗体兴起于 20 世纪 80 年代早期。这一技术是将对 Ig 基因结构与功能的了解与 DNA 重组技术相结合, 根据研究者的意图在基因水平对 Ig 分子进行切割、拼接或修饰, 甚至是人工全合成后导入受体细胞表达, 产生新型抗体, 也称为第三代抗体。基因工程抗体包括嵌合抗体、改型抗体、单链抗体、单域抗体及抗体库等。

Winter 等在 1994 年创建了噬菌体抗体库技术, 克服了人体不能随意免疫的缺点, 避开人工免疫动物和细胞融合技术, 完全用基因工程技术制备人源性抗体。该技术将抗体基因的克隆和表达融为一体, 同在一种载体上进行。将抗体基因表达在噬菌体的表面, 用固相化抗原对表达产物的载体进行淘筛, 在数日内就可筛选出阳性克隆, 从而能构建出大容量文库, 囊括全套天然抗体基因。理论上, 人们可以用基因工程的方法研制任何一种具有高度特异性的抗体, 使抗体工程的设想成为现实。

噬菌体抗体库技术的特点:

- ① 方法简单易行, 节省时间, 可通过发酵生产大量制备。
- ② 选择范围广泛, 可对百万至亿万个分子进行选择, 获得高亲和力的人源化抗体。
- ③ 可直接从未经免疫的人或小鼠的淋巴细胞中得到抗体基因或 Ig 的 V 区基因, 因此可以获得完全人源化的抗体, 克服了人杂交瘤细胞不稳定的缺点, 避开了人工免疫和杂交瘤技术。
- ④ 模拟了天然免疫系统亲和力的成熟过程, 经过多轮突变、链置换和抗原选择可创造出高亲和力的抗体。

此后, 由于对抗体结构功能认识的深入, 发现七个重链可变区和七个轻链可变区(其中四个 κ 链、三个 λ 链)基因家族覆盖了人类抗体多样性的 95%, 2000 年报道的第一个全合成抗体库, 就是根据上述可变区基因家族, 设计 14 个通用可变区序列作为构建全合成抗体库的基本骨架, 所有互补决定区(CDR)都设计成很容易置换的盒式结构, 并考虑和预留了构建多种抗体衍生物所需元件的插入位点, 序列的设计均按大肠杆菌表达规律进行了优化。

在此基础上又采用了三联核苷酸引导的诱变(trinucleotide- directed mutagenesis, TRIM)方法进行 CDR 区的突变和随机化, 即预先合成编码所有氨基酸的三联碱基, 再以这些三联碱基为基本单位合成随机化 CDR。该方法避免了碱基随机化造成的氨基酸偏移, 保证了抗体的多样性。

噬菌体抗体库技术的建立是抗体技术领域的一项革命性进展, 它解决了人源性单抗来源困难及鼠单抗的动物源性难题, 对于肿瘤、自身免疫性疾病及感染性疾病发病机制的研究、诊断和治疗有极为重要的实验价值。虽然到目前为止已有不少成功的报道, 但噬菌体技术的全面推广仍有赖于抗体库构建技术的进一步成熟和筛选方法的进一步完善。

由多克隆抗体到单克隆抗体, 直至基因工程抗体, 由不均质的异源抗体到均质的异源性抗体, 直至人源抗体, 是抗体产生技术的三个时代, 从一个侧面反映了生命科学由整体水平、细胞水平到基因水平的进展, 同时也为抗体作为医药生物技术产业的一个重要支柱奠定了基础。

第二节 抗体研究的现状与发展趋势

抗体作为治疗剂的研究经历了比较曲折的发展过程。第一次应用单克隆抗体(单抗)治疗是在 1982 年, Karr 将一株抗独特型单抗应用于 B 细胞淋巴瘤的治疗获得成功, 治疗性抗体的研究很快成为生物制药的热点。1986 年, 美国 FDA 批准抗 CD3 单抗 OKT3 进入市场, 用于器官移植时的抗排斥反应。然而, 随着研究的广泛深入, 大量的临床实验结果背离了人们的期望, 许多单抗在临床应用中屡遭失败, 抗体的应用一度陷入低谷。此后, 随着分子生物学技术的发展, 情况有了很大的改观。自 1994 年以来, 已经有 20 株单克隆抗体通过 FDA 的批准在临床上应用于抗肿瘤、抗移植排斥、抗凝血反应以及治疗各种免疫系统疾病 (表 1-1)。目前市场上销售的治疗性抗体绝大部分为人源化抗体(嵌合或 CDR 移植抗体), 占现有制品的 80%。治疗性抗体近年得到了迅速的发展, 到目前为止, FDA 共批准了近百个治疗性抗体药物, 其已成为现代生物医药的重要组成部分。

国内治疗抗体药物起步较晚, 但进步较快, 抗体药物上市速度有较大提升。目前我国已成为抗体药物在研数量最多的国家, 先后有 200 余个抗体药物获批临床试验申请, 部分产品已完成 III 期临床试验并提交了上市注册申请。目前抗体药物研究最热门的靶点包括 PD-1/PD-L1、TNF- α 、VEGF、HER-2、CD20、EGFR 等, 此类靶点已有 9 个品种获批上市, 且有多家企业的产品处于上市审批或三期临床阶段。2018 年至今, 我国已有 13 个抗体药物 (不包括融合蛋白) 新获国家药监局 CFDA 批准上市, 其中国外进口品种 9 个, 包括“O 药”(Opdivo)、“K 药”(Keytruda)、依达赛珠单抗、依洛尤单抗、依库珠单抗、艾美赛珠单抗、帕妥珠单抗、地舒单抗; 国内药企开发品种 4 个, 包括君实生物的特瑞普利单抗、信达生物的信迪利单抗、恒瑞的卡瑞利珠单抗、复宏汉霖的利妥昔单抗生物类似药, 除复宏汉霖的单抗药物为 CD20 靶点外, 其余三家获批的品种均为 PD-1 抗体药物。

一、人源化抗体

人源化抗体的出现被誉为是继单克隆抗体之后, 抗体研究领域的第二个里程碑, 它使沉寂多年的治疗性抗体再次成为生物医药研究的热点。在疾病治疗中, 人源化抗体之所以优于鼠抗体, 不仅因为抗体中鼠源成分的减少降低了机体的免疫排斥反应, 还在于人抗体中的 Fc 段能够诱发机体的效应功能——募集效应因子或效应细胞, 后者对靶细胞具有杀伤作用。人抗体的另一大优点是它在体内的半衰期长。鼠抗体的半衰期不到 20 小时, 而人源化抗体可达数天甚至有时接近 21 天。

人源化抗体是从鼠源单抗到全人抗体的过渡形式。在鼠单抗的基础上, 用人抗体恒定区置换鼠抗体的相应部位, 形成人鼠嵌合抗体, 其人源化程度达到 70%左右, 在抗原特异性和亲和力方面都较好地保留了亲代抗体的特征, 而免疫原性降低至 12%左右, 在体内的半衰期和效应功能也更加接近于人抗体。现在已有五种嵌合抗体进入市场, 用于治疗癌症、风湿性关节炎、心肌梗死和移植排斥。但由于其整个 V 区都是异源的, 所以嵌合抗体的异源性还很明显, 解决 HAMA 的效果并不理想。在嵌合抗体基础上进一步减少鼠源成分, 仅保

留鼠抗体 CDR 区, 其余全部替换成人抗体相应部分, 这种改型抗体的人源成分达 90%, 即通常所指的人源化抗体。至今共有五种人源化抗体被批准上市。值得注意的是, CDR 移植常常导致亲和力下降, 而且并非对每一种鼠抗体都适用。

二、全人源抗体

由于人源化抗体(嵌合或 CDR 移植抗体)内含有 10%~30%的鼠源蛋白, 因而在临床应用时, 或多或少地存在一些免疫排斥反应, 所以治疗性抗体的发展目标是全人抗体。目前生产全人抗体的方法主要包括抗体库技术和转基因小鼠技术, 这两种主要的人抗体制备技术竞争至今, 孰优孰劣尚未可知。

(一) 抗体库技术

噬菌体抗体库技术的发展使体外不经过免疫获得抗体成为可能。由于它发生于体外, 因此, 不依赖体内抗原识别和提呈系统, 在理论上可以产生抗任何物质(包括生物体内没有免疫原性的靶)的抗体, 它还特别适合于不需要完整抗体的用途。自 1989 年美国 Scripps 研究所 Lerner 实验室首次应用噬菌体表面呈现技术成功构建噬菌体抗体库以来, 该技术在制备基因工程抗体方面发展迅速, 国内外已有人源或鼠源抗 HBV、HIV、RSV、TNF、erbB2、gp120 等噬菌体抗体的报道。但目前噬菌体抗体库技术也存在不足之处: 从未经免疫动物的抗体库获得的抗体亲和力不高; 受外源基因转化率的限制, 抗体库的库容不足以涵盖某种动物的抗体多样性。因此, 大容量抗体库是获得高亲和力抗体和针对稀有抗原抗体的关键。

最近兴起的核糖体展示技术避开了上述不足, 可制备大容量抗体库, 代表了未来抗体工程的发展趋势。该技术依赖于 mRNA、核糖体和抗体蛋白(或多肽)通过非共价结合形成三联复合物, 以类似噬菌体抗体库的筛选方式得到特异结合靶分子的复合物之后, 分离 RNA 进行 PCR 扩增, 在扩增的同时还能引入突变, 刺激亲和力成熟过程并获得包含更高亲和力的次级抗体库。1997 年, Roberts 和 Szostak 与 Nemoto 分别独立设计了另外一种与核糖体展示类似的方法, 称为 mRNA 展示技术(mRNA display)或 RNA-多肽融合技术(RNA-peptide fusion)技术。这个展示系统是利用嘌呤霉素分子将 mRNA 分子和其所编码的多肽共价结合起来, 然后用固相化的靶分子将纯化的 RNA-多肽复合物筛选出来, 像核糖体展示系统那样, 这个复合物可通过 RT-PCR 得到进一步的扩增。其他体外筛选技术还有 1999 年 Forrer 等建立的体外筛选酶活性技术(selection for enzymatic activity in vitro), 1999 年 Doi 和 Yanagawa 建立的 STABLE 技术以及 Actinova 公司的共价展示技术(covalent display)等。

(二) 转基因小鼠技术

在转基因动物方面, 有几种不同的途径生产人抗体, 包括人外周血淋巴细胞-严重联合免疫缺陷小鼠(hu-PBL-SCID 小鼠)、转基因小鼠和转染色体小鼠制备人抗体技术。

前者是将已产生一定免疫反应的供者或癌症患者的淋巴细胞导入严重联合免疫缺陷小鼠(SCID)或 Trimer 小鼠, 作为暂时的人免疫系统发挥有限的功能, 取鼠脾细胞与人骨髓瘤细胞杂交就可能获得分泌人抗体的杂交瘤, 但是这种系统必须依赖已产生一定免疫反应的供体, 而且不可能用预先选择的抗原进行免疫。所以, 绝大部分人们感兴趣的针对治疗性靶标

的抗体都无法用这种技术获得。

另一条生产人抗体的途径是通过基因敲除技术使小鼠自身的基因失活并导入新基因,创造出携带人抗体重、轻链基因簇而自身抗体基因失活的转基因小鼠。这种转人抗体基因小鼠(通常称为 HuMab, Human antibody mouse)所带的人 DNA 片段具有完备的功能,可以有效地进行同种型转换和亲和力成熟。1994 年,美国 Cell Genesys 公司和 Genpharm 国际公司几乎同时宣布,转基因小鼠作为生产全人源抗体的载体问世。其基本方法是:抗体生成过程不是从普通小鼠开始,而是从鼠抗体生成基因被相应的人基因所取代的小鼠开始。Mendz 等于 1997 年成功地建立了含编码人 Ig 基因位点区 10⁶bp 的大片段 DNA 的人 Ig 转基因鼠(xenomouse),即将含 1020kb 人 Ig 重链和 800kb 的人 Ig κ 轻链基因大片段克隆至酵母人工染色体(yeast artificial chromosome, YACs)内并导入已敲除 Ig 基因组的小鼠,经过三种抗原(IL-8, TNF- α , EGFR)免疫后制备了具有特异性和高亲和力的人抗体。

转基因小鼠制备人抗体的优点是,其功效优于其他生产抗正常人体蛋白单抗技术。小鼠识别抗原的抗体系统仍保持完整,容易把人体蛋白识别为异物。此外,由于抗体是体内产生的,经历了正常装配和成熟过程,从而保证成品具有较高的靶结合亲和力。但转基因小鼠也存在一些缺陷,即转基因通常有体细胞突变和其他独特的序列,导致不十分完全的人序列,而且,由于抗体是在小鼠体内装配,因而产生的单抗具有鼠的糖基化的模式,所以这些单抗最终并不是全人的。

如前所述,转基因小鼠不能携带整套人抗体基因,因而限制了一系列免疫球蛋白的产生。Tomizuka 等首先建立并利用染色体为载体成功培育了转染色体小鼠(transchromosomic mice)并制备了高亲和力的人抗体,这种小鼠携带人微小染色体,即从人第 14 号及第 2 号染色体上分离的含有全部人抗体重、轻链胚系基因簇(包括所有的 V, D, J 片段和抗体恒定区)的染色体片段。这种携带微染色体的小鼠能够提供几乎完全相同的人免疫球蛋白基因环境,并在鼠体内精确地重现了人抗体的产生过程。日本麒麟公司用基因工程技术使小鼠携带完整的人第 14 号染色体,该染色体包含了全部人抗体产生基因,但迄今尚无该技术生产的制品问世。

此外,一些公司开始研究其他的全人单抗制备方法,如 XTL 生物制药公司用一种类似于人骨髓移植的方法,先用放射线破坏动物骨髓,消除其对移植物的排斥反应,然后注入人抗体生成细胞,在其体内产生全人单抗,该动物起到了生物反应器的作用。该公司已用此法生产出一种人单抗,正在进行乙型肝炎治疗的临床试验。

三、抗体衍生物

抗体包含两个功能域,即靶向识别(Fv 或 Fab)及效应功能(Fc 段),这两个特点是研究者偏爱将完整抗体应用于临床的原因。但并不是任何情况下都需要两个功能域同时存在,一些小分子抗体(如 Fab、scFv 等)就以其免疫原性低、分子量小、易通过血管壁渗透至病灶局部而备受青睐,如 Fab 就已经应用于临床的肿瘤治疗。结合血小板糖蛋白 IIb / IIIa 受体的抗体 Fab (Reopro),通过抑制血小板活化预防冠状动脉血管成形术的并发症。由于 Fab 在体内的半衰期很短,一般可通过耦联 PEG 加以改善。对抗 CD146 抗体进行基因工程

改造构建的一种新型三结构域单链抗体 $V_{H/\kappa}$ ，不仅能识别人肿瘤组织血管，还在鸡胚尿囊膜实验中显示出了血管抑制活性。由于该分子具有分子量小、稳定性高的特点，故而极有潜力应用于肿瘤及血管相关疾病的治疗。

靶向识别域也同时能作为一种有效的“载体”搭载毒素等到特定部位发挥效应。通常把放射性核素、毒素、药物、酶或其他效应分子与抗体耦联形成免疫复合物，或将这些功能蛋白的基因与抗体可变区基因连接形成双功能融合蛋白，用于肿瘤或其他疾病的治疗。例如，由 FDA 批准上市的 Gemtuzumab(Mylotarg)是一种抗 CD33 的抗体与 calicheamicin(加利车霉素)的耦联物，被应用于急性骨髓瘤白血病的治疗；另外，放射免疫疗法也展现出良好的发展势头与应用潜力。治疗淋巴瘤的放射性免疫耦联物 Ibritumomab(Zevalin)通过了 FDA 的认证。免疫毒素疗法与抗体导向的酶前药疗法(ADEPT)仍处于早期临床阶段。

另一类含 Fc 段的抗体融合蛋白是利用 Fc 段所特有的生物学功能与某些有黏附或结合功能的蛋白融合而成，如 2001 年，Notter 等将 B7-1 和 IgG1 的 Fc 段构建成融合蛋白，利用 Fc 段的高亲和性将融合分子定位于急性粒细胞白血病(AML)细胞表面，然后发挥 B7-1 共刺激分子的作用。实验表明，它能明显刺激 T 淋巴细胞增殖和分化。

四、展望

比尔·盖茨预言，超过他的下一个世界首富必定出自生物技术领域。抗体工程市场潜力巨大，在当前研发的生物医药中，抗体及其衍生物约占 25%，居所有医药生物技术产品之首。迄今为止，市场上共有约 711 种治疗性抗体，其中 99 种药物已经获得美国食品和药品监督管理局 (FDA) 和欧洲药品管理局 (EMA) 的上市批准。由于治疗性抗体具有高亲和力和特异性、低免疫原性以及针对一系列生物分子的能力，新一代治疗性抗体的开发也一直受到了外界的广泛关注。目前，治疗性抗体已经成为生物制药市场的主导力量。2020 年，全球单抗市场规模估计为 1435 亿美元，预计 2028 年将增长到 4518.9 亿美元，复合年增长率高达 14.1%。

值得注意的是，人源化抗体和人抗体的出现为多种疾病的治疗带来了新的希望，但人抗体是否可以解决鼠抗体临床应用中出现的所有问题，还有待大量临床检验的检验。影响抗体免疫原性的因素很多，如抗原呈递方式、信号传递系统以及患者的个体差异性等等，而抗体的人源化只能解决部分问题，其广泛应用还有赖于对抗体效应机制及机体免疫系统调节机制进行更加细致深入的研究。同样，抗体衍生物也会面临诸如免疫原性、稳定性、活性、不良反应等自身固有的问题，所以可行的发展方向是在完善人抗体技术的同时，推进治疗性小分子抗体衍生物的研究。根据临床实际设计灵活的治疗方案，使人源化抗体和抗体衍生物互为补充，达到最佳治疗效果。尽管存在诸多挑战，在可预见的未来，治疗性抗体一定将继续保持一种主导的治疗方式和市场地位。