

地下水名著译丛



Applied Hydrogeology

(Fourth Edition)

应用水文地质学

(第四版)

【美】C. W. Fetter 著  
孙晋玉 等译



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

地下水名著译丛

# Applied Hydrogeology

(Fourth Edition)

# 应用水文地质学

(第四版)

Yingyong Shuiwen Dizhixue

[美]C. W. Fetter 著

孙晋玉 等译



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

本书献给我的妻子 Nancy Blessing Fetter, 以及我的孩子和他们的家人:

Bill, Barb, Katie 和 Sarah Fetter

Rob 和 Abby Fetter

Elizabeth Fetter

——C. W. Fetter

# 前 言

水文地质学是大学地质类与工程类课程的核心课。咨询机构、国家与各州行政管理部门以及有关公司对水文地质专业人员的需求逐步增加,环境领域也需要许多水文地质方面的工作人员。本书可供水文地质专业、环境科学专业以及工程专业的学生学习使用,也可作为高年级大学生、研究生、双学位水文地质学教材,还可用作国家注册水文工程师或注册水文地质工程师考试的参考书。同时,很多专业都可以把它作为参考资料。

读者最好具有大学数学知识,但缺少这部分内容不妨碍对本书的理解。学习水化学一章应具有大学化学知识。本书注重运用数学方法解决问题而非公式的推导。鉴于此,书中例题列出了详细的解题步骤。章节中所作的案例分析旨在加强学生对不同地质背景下地下水形成和运动的认识。书中运用的水文地质术语使本书的参考性得以增强。

本书第四版增加了新的案例以及课后习题。大多数情况下习题成对出现。书中最后给出奇数号习题的答案,偶数号习题的答案未提供。奇数号习题的解题步骤见 *Applied Hydrogeology* 主页: <http://www.appliedhydrogeology.com>。与此同时,第四版的一些章节中还增加了思考题,介绍各种电子数据表如 Microsoft Excel 等在水文地质学中的应用。

本书附带有三个地下水专业的教学版软件。这部分软件由软件发行商免费提供。本书作者与软件开发商不提供关于程序的技术支持。所附光盘有简易程序说明以及示范实例。

本书第三版的评审人员为第四版的推出提供了有益的建议,兹列如下:爱达荷州立大学 Gary S. Johnson; 克莱姆森大学 Larry Murdoch; 新泽西理查德斯托克顿学院 Claude Epstein; 加利福尼亚州立大学奇科分校 David L. Brown; 内布拉斯加大学林肯分校 F. Edwin Harvey; 伦斯勒理工学院 Edward L. Shuster; 蒙大拿大学蒙大拿技术学院 Willis D. Weight; 田纳西大学诺克斯维尔分校 Larry D. McKay; 伊利诺伊州西北大学 Laura L. Sanders; 圣克劳德州立大学 Jean Hoff; 以及堪萨斯州地质调查局 Jim Butler。加拿大阿尔伯塔大学 Carl Mendoza 博士担任第四版的同行评审,提出了宝贵的建议与修改意见。

在此感谢克莱姆森大学的 Larry Murdoch 和 Rex Hodges 指导我使用电子表格地下水流模型。特别感谢 Hydrosolve 公司的 Glenn Duffield 为我们提供了教学版的 AQTESOLV 软件,Waterloo 水文地质公司的 Pat Delaney 为我们提供的教学版 Visu-

al MODFLOW 软件, Kirk Hemker 提供的 FLOWNETLT 软件。汉密尔顿大学的 Todd Rayne 为本书完成了习题求解手册, 本课程的教师可向 Prentice Hall 出版公司的销售代表索取该手册。Prentice Hall 出版公司的地质学高级编辑 Patrick Lynch 在本书的写作过程中给予我极大的支持。

C. W. Fetter

C. W. Fetter, Jr. 水文地质名誉教授及顾问  
威斯康星大学 Oshkosh 校区

# 目 录

<b>第 1 章 水</b> .....	1
1.1 水 .....	1
1.2 水文学与水文地质学 .....	3
1.3 水循环 .....	3
1.4 能量转换 .....	6
1.5 水均衡方程 .....	7
实例:Mono 湖 .....	7
1.6 水文地质工作者 .....	9
1.7 应用水文地质学 .....	9
1.8 水文地质工作的内容 .....	10
1.8.1 水文地质学与人类的关系 .....	10
1.8.2 水文地质工作的报酬 .....	12
1.8.3 水文地质工作的职业道德 .....	12
1.9 水文地质资料 .....	13
1.10 美国材料与试验协会标准 .....	15
1.11 习题说明 .....	15
1.12 电子表格简介 .....	17
符号 .....	18
思考题 .....	18
习题 .....	18
<b>第 2 章 水循环要素</b> .....	20
2.1 蒸发 .....	20
2.2 蒸腾 .....	23
2.3 蒸散 .....	23
2.4 凝结 .....	25
2.5 降雨的形成 .....	26
2.6 降雨和降雪的测量 .....	26
2.7 有效降水深度 .....	27
2.8 降水过程 .....	30

2.9 河川水文过程线 .....	34
2.9.1 基流退水 .....	34
2.9.2 暴雨过程线 .....	36
2.9.3 盈水河与渗失河 .....	37
2.10 降雨-径流关系 .....	39
2.11 历时曲线 .....	41
2.12 根据基流确定地下水的补给量 .....	42
2.12.1 退水曲线法(Meyboom 法) .....	42
2.12.2 退水曲线位移法(Rorabaugh 法) .....	43
2.13 流速及流量的测量 .....	45
2.13.1 流速测量 .....	45
2.13.2 堰流 .....	47
2.14 曼宁公式 .....	47
符号 .....	48
思考题 .....	49
习题 .....	50
<b>第3章 含水层的性质 .....</b>	<b>54</b>
3.1 物质与能量 .....	54
3.2 岩土体的孔隙度 .....	56
3.2.1 孔隙度的定义 .....	56
3.2.2 沉积物的孔隙度与分类 .....	57
3.2.3 沉积岩的孔隙度 .....	61
3.2.4 深成岩与变质岩的孔隙度 .....	62
3.2.5 火山岩的孔隙度 .....	63
3.3 给水度 .....	63
3.4 岩土体的渗透系数 .....	66
3.4.1 达西试验 .....	66
3.4.2 渗透系数 .....	67
3.4.3 沉积物的渗透率 .....	69
实例:冰水沉积物的渗透系数 .....	71
3.4.4 岩石的渗透率 .....	72
3.5 渗透仪 .....	73
3.6 潜水面 .....	75
3.7 含水层 .....	77
3.8 潜水等水位线图与承压水等水压线图 .....	79
3.9 含水层的特征 .....	81
3.10 压缩系数与有效应力 .....	83
3.11 均质性与各向同性 .....	84
3.12 等势面的水力梯度 .....	86

符号 .....	87
思考题 .....	88
习题 .....	89
<b>第 4 章 地下水运动原理 .....</b>	<b>92</b>
4.1 引言 .....	92
4.2 机械能 .....	92
4.3 水头 .....	94
4.4 变密度流体的水头 .....	96
4.5 力势与水头 .....	98
4.6 达西定律 .....	99
4.6.1 水头、势能与达西定律 .....	99
4.6.2 达西定律的适用范围 .....	99
4.6.3 单位流量与平均线性流速 .....	101
4.7 地下水运动方程 .....	101
4.7.1 承压含水层 .....	101
4.7.2 非承压含水层 .....	104
4.8 地下水运动方程的解 .....	104
4.9 水头梯度 .....	105
4.10 地下水运动方向与水头梯度的关系 .....	106
4.11 流线与流网 .....	106
4.12 流线的折射 .....	109
4.13 承压含水层中的稳定流 .....	110
4.14 非承压含水层中的稳定流 .....	112
符号 .....	116
思考题 .....	117
习题 .....	118
<b>第 5 章 地下水向井的运动 .....</b>	<b>121</b>
5.1 引言 .....	121
5.2 基本假设 .....	122
5.3 径向流 .....	122
5.4 抽水引起的降深 .....	123
5.4.1 承压完整井 .....	123
5.4.2 越流承压含水层中的井流 .....	125
5.4.3 非承压含水层中的井流 .....	131
5.5 由时间-降深数据确定含水层的参数 .....	133
5.5.1 引言 .....	133
5.5.2 稳定流 .....	133
5.5.3 非稳定流 .....	135
5.5.4 考虑弹性释水的越流含水层的非稳定流 .....	146



5.5.5 非承压含水层中的非稳定流 .....	147
5.5.6 非完整井 .....	149
5.6 瞬时击水试验 .....	151
5.6.1 利用瞬时击水试验确定含水层参数 .....	151
5.6.2 瞬时击水试验的强衰减反应 .....	151
5.6.3 瞬时击水试验的不完全衰减反应 .....	159
5.6.4 瞬时击水试验讨论 .....	161
5.7 根据单位涌水量确定导水系数 .....	162
5.8 叠加原理 .....	164
5.9 水文地质边界 .....	164
5.10 含水层试验 .....	166
5.10.1 含水层的单井试验 .....	166
5.10.2 有观测井的含水层试验 .....	168
符号 .....	169
计算说明 .....	170
思考题 .....	170
习题 .....	171
<b>第6章 土的含水量与潜水的补给 .....</b>	<b>176</b>
6.1 引言 .....	176
6.2 土的孔隙度与含水量 .....	176
6.3 毛细作用与毛细上升带 .....	179
6.4 包气带中的孔隙水张力 .....	180
6.5 土壤带水 .....	181
6.6 包气带水流运动原理 .....	183
6.7 潜水的补给 .....	185
符号 .....	187
思考题 .....	188
习题 .....	188
<b>第7章 区域地下水流模式 .....</b>	<b>190</b>
7.1 引言 .....	190
7.2 非承压含水层中的稳定流 .....	190
7.2.1 补给区与排泄区 .....	190
7.2.2 均质含水层中的地下水流 .....	191
7.2.3 埋藏透镜体 .....	195
7.2.4 非均质各向异性含水层 .....	195
7.3 非稳定流 .....	197
7.4 不参与循环的地下水 .....	198
7.5 泉 .....	198
7.6 地质条件对区域地下水流模式的影响 .....	200

实例 1:大盆地(Great Basin)地区的区域水流体系 .....	201
实例 2:美国东南部沿海地区的区域水流体系 .....	204
实例 3:高原含水层的区域水流体系 .....	211
实例 4:达科他含水层 .....	215
7.7 地下水与湖泊、湿地以及河流的联系 .....	218
符号 .....	222
计算说明 .....	223
思考题 .....	223
习题 .....	224
<b>第 8 章 地下水的赋存 .....</b>	<b>226</b>
8.1 引言 .....	226
8.2 松散含水层 .....	227
8.2.1 冰成地貌 .....	227
实例:俄亥俄州 Dayton 市埋藏型含水层的水文地质条件 .....	230
8.2.2 冲积河谷 .....	232
8.2.3 构造山谷中的冲积物 .....	233
实例:San Bernardino 地区的构造河谷 .....	235
8.3 沉积岩 .....	237
实例:伊利诺伊州东北部—威斯康星州东南部的砂岩含水层 .....	237
8.3.1 复杂的地层条件 .....	240
8.3.2 褶皱与断层 .....	241
实例:断层作为含水层边界 .....	242
8.3.3 碎屑沉积岩 .....	244
实例:Newark 盆地的水文地质条件 .....	246
8.3.4 碳酸盐岩 .....	246
8.3.5 煤与褐煤 .....	253
8.4 岩浆岩与变质岩 .....	254
8.4.1 侵入岩与变质岩 .....	254
8.4.2 火成岩 .....	255
实例:火成岩高原——哥伦比亚河玄武岩 .....	255
实例:火成岩穹窿——夏威夷群岛 .....	256
8.5 永久冻土区的地下水 .....	257
实例:冲积含水层——美国阿拉斯加州 Fairbanks 地区 .....	259
8.6 沙漠地区的含水层 .....	259
实例:约旦 Azraq 盆地——沙漠地区的水文地质条件 .....	260
8.7 滨海平原含水层 .....	260
8.8 淡水与咸水的关系 .....	263
8.8.1 滨海含水层 .....	263
8.8.2 海岛 .....	266

8.9	潮汐效应 .....	268
8.10	美国地下水分区 .....	269
8.10.1	西部山区 .....	270
8.10.2	冲积盆地区 .....	270
8.10.3	哥伦比亚熔岩高原区 .....	271
8.10.4	科罗拉多高原与怀俄明盆地区 .....	271
8.10.5	高原区 .....	271
8.10.6	中部非冰川区 .....	272
8.10.7	中部冰川区 .....	272
8.10.8	皮德蒙特—蓝岭区 .....	273
8.10.9	东北高地与苏必利尔高地区 .....	273
8.10.10	大西洋和海湾的滨海平原区 .....	273
8.10.11	东南滨海平原区 .....	274
8.10.12	冲积河谷区 .....	274
8.10.13	夏威夷岛 .....	274
8.10.14	阿拉斯加区 .....	274
8.10.15	波多黎各和维尔京群岛区 .....	274
	符号 .....	275
	习题 .....	275
<b>第9章</b>	<b>水化学 .....</b>	<b>277</b>
9.1	引言 .....	277
9.2	计量单位 .....	277
9.3	水中的化学反应类型 .....	278
9.4	质量作用定律 .....	279
9.5	同离子效应 .....	280
9.6	化学活度 .....	281
9.7	水与弱酸的电离常数 .....	283
9.8	碳酸盐平衡 .....	285
9.8.1	碳酸盐反应 .....	285
9.8.2	CO <sub>2</sub> 分压不变时的碳酸盐平衡 .....	287
9.8.3	pH 对碳酸盐平衡的影响 .....	289
9.9	热力学关系 .....	290
9.10	氧化电位 .....	291
9.11	离子交换作用 .....	294
9.12	同位素水文学 .....	296
9.12.1	稳定同位素 .....	296
9.12.2	放射性同位素测年 .....	298
9.13	主要离子化学 .....	299
9.14	化学分析结果的表达 .....	300

9.14.1	Piper 图 .....	300
9.14.2	Stiff 图 .....	302
9.14.3	Schoeller 半对数图 .....	302
	实例:美国佛罗里达含水层系统的水文地球化学特征 .....	303
	符号 .....	306
	思考题 .....	306
	习题 .....	307
<b>第 10 章</b>	<b>地下水水质与污染 .....</b>	<b>310</b>
10.1	引言 .....	310
10.2	水质标准 .....	312
10.3	水样的采集 .....	313
10.4	地下水水质监测 .....	314
10.4.1	地下水水质监测规划 .....	314
10.4.2	地下水监测井的安装 .....	315
10.4.3	监测井取样 .....	317
10.5	包气带污染监测 .....	319
10.6	溶质迁移 .....	320
10.6.1	引言 .....	320
10.6.2	扩散 .....	320
10.6.3	对流 .....	321
10.6.4	机械弥散 .....	321
10.6.5	水动力弥散 .....	322
10.6.6	延迟效应 .....	325
10.6.7	有机物的降解 .....	333
10.7	地下水污染 .....	334
10.7.1	引言 .....	334
10.7.2	化粪池与污水池 .....	336
10.7.3	垃圾填埋场 .....	336
10.7.4	化学溢出物与地下存储罐的泄漏 .....	340
10.7.5	采矿 .....	342
	实例:铀矿尾矿的污染 .....	342
10.7.6	其他地下水污染源 .....	343
10.8	地下水恢复 .....	344
10.8.1	基于风险的纠正措施 .....	344
10.8.2	污染源控制措施 .....	344
10.8.3	污染羽的处理 .....	345
10.8.4	自然与强化生物修复 .....	346
10.9	实例:某超级基金场地的地下水污染 .....	346
10.9.1	背景 .....	346

10.9.2	地质条件	346
10.9.3	水文地质条件	348
10.9.4	地下水污染	349
10.9.5	场地修复	351
10.10	捕获带分析	352
	符号	355
	思考题	355
	习题	356
<b>第 11 章</b>	<b>地下水开发与管理</b>	<b>357</b>
11.1	引言	357
11.2	含水层的动态平衡	357
	实例:美国伊利诺伊州东北部的深层砂岩含水层	358
11.3	地下水均衡	359
11.4	地下水的管理潜力	360
11.5	安全开采量之感	362
11.6	水资源法	363
11.6.1	法律基础	363
11.6.2	地表水水量管理法	364
11.6.3	地下水水量管理法	366
	实例:美国亚利桑那州地下水规范	368
11.6.4	地下水水质管理法	368
	实例:美国威斯康星州地下水保护法	371
11.7	人工补给	372
11.8	地下水水质保护	373
11.9	地下水开采与循环储量	375
11.10	地表水与地下水的联合利用	376
11.11	全球水问题	377
	思考题	379
<b>第 12 章</b>	<b>野外工作方法</b>	<b>380</b>
12.1	引言	380
12.2	断层形迹分析	380
12.3	地表地球物理勘测方法	385
12.3.1	直流电阻率法	385
12.3.2	电磁传导率法	388
12.3.3	地震法	391
12.3.4	探地雷达与磁法勘探	396
12.3.5	重力法和航空磁测法	396
12.4	地球物理测井	397
12.4.1	井径测井	400

12.4.2	温度测井	400
12.4.3	单极电阻测井	401
12.4.4	电阻率法测井	401
12.4.5	自然电位测井	402
12.4.6	核测井	403
	实例:利用地球物理方法确定某隔水层的范围与厚度	404
12.5	场地水文地质条件评价	407
12.6	野外水文地质工作	408
12.7	水文地质报告	410
	符号	412
	习题	412
<b>第 13 章</b>	<b>地下水运动模型</b>	<b>415</b>
13.1	引言	415
13.2	地下水模型的应用	417
13.3	模型需要的数据	417
13.4	有限差分模型	419
13.4.1	有限差分网格	419
13.4.2	有限差分网格记符	420
13.4.3	边界条件	420
13.4.4	稳定流均匀网的求解方法	421
13.4.5	非稳定流的求解方法	422
13.5	有限元模型	423
13.6	常用地下水运动模型	423
13.7	MODFLOW 基本原理	425
13.8	Visual MODFLOW	427
13.9	地理信息系统	427
	思考题	428
<b>附录</b>		<b>432</b>
附录 1	泰斯井函数 $u - W(u)$ 数值表	433
附录 2	$\eta, \mu - F(\eta, \mu)$ 函数表	434
附录 3	$u - W(u, r/B)$ 函数表	435
附录 4	$H(u, \beta)$ 函数表	436
附录 5	$K_0(x)$ 函数与 $\exp(x)K_0(x)$ 函数表	437
附录 6A	潜水含水层 $W(u_A, \Gamma)$ 函数表	438
附录 6B	潜水含水层 $W(u_B, \Gamma)$ 函数表	439
附录 7	长度换算表	440
附录 8	面积换算表	441
附录 9	体积换算表	441
附录 10	时间换算表	442

---

附录 11	部分矿物与化合物的溶度积 .....	442
附录 12	天然元素的相对原子质量与原子序数 .....	443
附录 13	$\operatorname{erf}(x), \operatorname{erfc}(x)$ 函数表 .....	446
附录 14	水的密度与黏度 .....	447
附录 15	下载运行程序说明 .....	448
附录 16	渗透系数换算表 .....	450
附录 17	流量换算表 .....	451
词汇表	.....	452
习题答案	.....	466
参考文献	.....	472
索引	.....	503

# 第 1 章

# 水

在多雨年份的冬季,雨量丰沛,河中水位暴涨,汹涌的河水有时泛滥,给两岸造成洪灾。滔滔洪水淹没农田、冲毁农作物;沿途推倒仓库、农房,它四处漫流、蜿蜒而行。困在泥泞中的牛、猪、羊被卷入大海。春天姗姗来迟,河流恢复原貌,露出两岸的砂石。夏季里河水温顺地流淌。

也有干旱的年份……洪水每 30 年来一次。其间有五六年的好光景,年降雨量为 19 到 25 英寸,大地郁郁葱葱。随后的六七年降雨量为 12 到 16 英寸。之后旱季来临,年降雨量只有七八英寸。大地一片干涸……旱季一到,人们就遗忘了过去的好年头,而洪水到来时人们也会忘记干旱的景象。这种情况永远不会改变。

《伊甸园以东》,约翰·斯坦贝克,1952

## 1.1 水

约翰·斯坦贝克在 50 年前写下上面这段话,描述美国加利福尼亚州北部 Salinas 河谷的水文地质条件。这也揭示了 20 世纪早期人们对水的认识。水似乎总是唾手可得,除非受到威胁,人们从不担心水的问题。今天,人们对珍贵而有限的自然资源有了更切实的态度,意识到应当保护并维护自然资源,其中也包括水。

虽然人们怀有保护环境的美好初衷,但许多时候我们并不知道我们的行为会有哪些后果。1990 年,美国国会通过了《清洁空气法》(Clean Air Act)。为了减少交通工具尾气中的化合物,从 1992 年开始一些城市要求使用含氧量不低于 2% 的新配方汽油。当时人们只知道两种石油添加剂:乙醇和甲基叔丁基醚(MTBE),MTBE 极易溶于水,而其对摄入者的健康危害还没有得到认识。此外,当时的许多汽油分销商使用的地下储油罐有不同程度的渗漏。

截至 1996 年,仅在美国制造配方汽油已耗用了大约 100 百万桶 MTBE(Andrews, 1998)。新配方汽油含有 10% 的 MTBE,这使城市的空气质量得到改善,但是引起一些地方地下水的 MTBE 污染。汽油中的许多化合物在地下会很快地降解,而 MTBE 不



可降解。

直到2000年美国仍然没有制定饮用水的MTBE标准；其毒性有待进一步评估。然而，十多年前的立法已然导致地下水的MTBE污染。2000年春季美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)因为地下水污染问题决定逐步减少汽油中的MTBE添加量。这一事件的教训是：虽然有时我们有良好的意愿，但是对于有限的地下水可能会造成不可预计的和不愿见到的后果。

水是生命之源；没有水就没有生命。植物的密度与分布受诸多因素的影响，但其中最重要的因素是降水。沙漠中也有一些农业区，这些地方必然有地下水源或其他水源。

人类文明的繁盛也与水密切相关——一旦水资源枯竭文明便会衰落。本书主要讲水，包括地表水和地下水。一个人每天需要3夸脱<sup>①</sup>(qt)或约3升(L)水以维持身体的基本需水量。干旱地区的居民每天的用水量根本达不到这个标准。老式抽水马桶一次冲水耗用5 gal<sup>②</sup>(19 L)水。纽约每人每天的用水量超过260 gal(1 000 L)，其中大多用于工业、制造业以及商业。就个人而言，一个美国人的日用水量为50~80 gal(200~300 L)。能源与食品制造业的用水量更高。

1995年美国从河道中取用的淡水与咸水大约为每天 $4\,020 \times 10^8$  gal( $15\,200 \times 10^8$  L)，其中不包括水电行业以及其他的河道内用水，但包括热电厂的冷却用水。1995年每天淡水用量包括地下水 $775 \times 10^8$  gal( $2\,900 \times 10^8$  L)，地表水 $2\,630 \times 10^8$  gal( $9\,950 \times 10^8$  升)(图1.1)。每天每单位产值的淡水用量为1 280 gal(4 850 L)。水的耗用量，即每天用水时产生的蒸发量为 $810 \times 10^8$  gal( $3\,000 \times 10^8$  L)(Solley, Pierce 和 Perlman, 1998)。

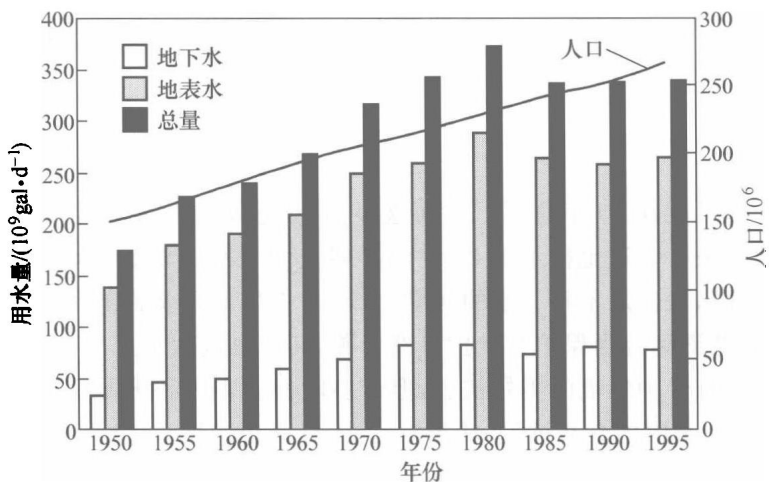


图 1.1 美国人口与淡水(包括地表水与地下水)取用量的关系  
(据 Solley, Pierce 和 Perlman, 1998)

① 1 夸脱 (qt) = 1.136 5 升。

② 1 加仑 (gal) = 4.546 09 升。