

生态系统碳汇是地球系统动态反馈的产物

（代序言）

实现碳达峰碳中和目标已成为中国的国家战略。实现碳中和的核心是碳减排和碳增汇，它们是实现碳中和的两个决定因素。其中，增加生态系统对二氧化碳的吸收（称之为“碳汇”，carbon sink），是降低大气二氧化碳浓度、减缓全球温度上升、应对气候变化、实现碳中和不可或缺的途径。因此，研究陆地生态系统碳汇及其分布是地球环境变化研究的核心议题，也是世界各国高度重视的科技领域。

地球系统是一个动态反馈系统。按照苏联学者弗拉基米尔·伊万诺维奇·维尔纳茨基（V. I. Vernadsky）的生物圈理论，以及英国科学家詹姆斯·洛夫洛克（J. E. Lovelock）和美国生物学家林恩·马古利斯（L. Margulis）的盖娅（Gaia）假说，地球是由生物圈、大气圈、水圈等圈层组成，由生命控制的完整的动态系统。地球表层大多数化学元素的循环实质上是由生物参与的生物地球化学循环。人类社会是地表系统中的一个特殊组分，人类活动已成为控制地表系统物质循环和能量流动及其演变方向的重要因素，已经并且继续改变着地球生物圈的性质。这让我想起我国已故著名古生物学家张昀先生在他的《生物进化》（北京大学出版社，1998）一书中提到的一个非常有趣的现象。他提到，自太古以来，地表温度虽然有变化，但从来没有升温到海洋干涸的程度，也从来没有降温到全球海洋全部冻结的程度。而按天体物理学家的推算，太阳辐射自太古宙至今至少增加了 30%。按物理学原理计算，这足以引起全球海洋干涸或冻结，但地质时期从未发生过这种情况。这只能归因于地球生物圈的存在和以生物圈为中心的盖娅的自我调节、控制的功能。张昀先生提到的现象对我们理解地球系统演化以及包括生态系统碳源汇问题在内的生物地球化学循环有着重要的启示作用。我想，生态系统碳汇不正是地球系统的一种典型的自我调节和反馈作用的产物吗？人类活动向大气系统释放了大量的 CO_2 ，但这些 CO_2 并非全部聚集在大气中，而相当一部分作为生态系统的碳汇，存储在陆地和海洋生物圈之中。以陆地生态系统为例，最近的研究显示，全球陆地生态系统从 20 世纪 60 年代的弱碳源（ $-0.2 \text{ Pg}^\text{①} \text{ C/a}$ ），增加到 21 世纪第一个 10 年的显著碳汇（ 1.9 Pg C/a ），说明陆地生态系统在调节大气 CO_2 浓度中的显著作用。换言之，生态系统碳汇是地球系统对人类活动大量使用化石燃料、排放 CO_2 的一种调节反馈作用。同样，全球温度变化是否也会受到地球反馈系统的最终调节呢？从这种角度去理解全球变化问题，或许能给我们带来不同的思考和新的启示。从这种角度看，碳汇研究的价值不

① $1 \text{ Pg}=10^{15} \text{ g}$; $1 \text{ Tg}=10^{12} \text{ g}$; $1 \text{ Gt}=10^9 \text{ t}=10^{15} \text{ g}$ 。

只是对实现碳中和目标有现实意义，对我们理解地球系统本身的动态反馈作用也是重要的。

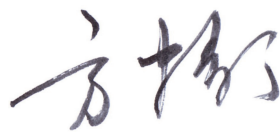
本书（《中国陆地生态系统碳汇手册》，以下简称《手册》）仅从中国陆地生态系统的角度，给出了各个类型生态系统碳汇的大小、分布以及中国县域、省域和全国尺度碳汇的估计值，希望它不仅能为读者提供我国主要生态系统及不同空间尺度的碳汇大小和分布数据，也能为读者理解我国生态系统的结构、功能及其变化提供参考。

《手册》是在国家重点研发计划项目“陆地生态系统碳源汇监测技术及指标体系”和国家自然科学基金基础科学中心项目“生态系统对全球变化的响应”等支持下，经过 8 年的努力研编完成的。研编团队成员通过整合历史数据和团队自身的研究结果，构建我国陆地生态系统碳源汇模拟系统，阐明碳源汇大小及时空格局；构建不同空间尺度生态系统碳储量和碳汇全组分的参数体系，最终研编完成《手册》。

《手册》的主要目的是为读者提供我国主要生态系统类型或区域碳汇大小的参考数值，但这些数值并不都是精确无误的。由于生态系统的复杂性、数据积累的不足以及作者能力的局限，要给出精确的数值几乎是不可能的，但团队成员还是克服种种困难，尽了最大努力，十易其稿，对数值进行认真且仔细的计算和核对。尽管如此，这些数值依然存在这样那样的问题，仅供读者参考。另外，我们认为，森林、草地和灌丛，尤其是它们的地上碳库和碳汇数值有更高的精确度，而对于湿地和农田，其不确定性可能更大。

在《手册》的研编过程中，参与人员和众多研究生做了大量工作。多位专家和国内外同行对项目的推进和书稿的撰写提出了宝贵意见和建议。特别是，傅伯杰院士、于贵瑞院士、孟平研究员、刘国华研究员、黄耀研究员、胡水金教授、冯晓娟研究员、刘玲玲研究员、杨元合研究员、温学发研究员、朱彪教授，以及中国 21 世纪议程管理中心的何霄嘉博士给予了极大支持和悉心指导；项目办公室朱江玲、吉成均和赵燕等做了大量项目管理、协调和保障工作；科学出版社科学生物分社编辑同志在出版过程中给予了认真编辑和校稿。在此，一并致谢。

最后，希望《手册》能为推动我国陆地生态系统碳汇研究、理解生态系统的结构和功能等发挥积极作用。对《手册》中存在的不足之处，恳请同行专家与广大读者批评指正。



中国科学院院士 方精云

2025 年 10 月 1 日

目 录

第一部分 陆地生态系统碳源汇概述及研究方法

第 1 章 大气二氧化碳浓度变化及化石燃料排放	3
1.1 二氧化碳的理化性质	3
1.2 大气二氧化碳浓度的历史变化	4
1.3 大气二氧化碳浓度的季节变化和纬度变化	6
1.4 化石燃料二氧化碳排放	8
1.4.1 方精云等测算	9
1.4.2 全球碳计划测算	12
参考文献	13
第 2 章 碳源汇的研究历史、测度及区域估算	15
2.1 碳源汇的概念和测度	15
2.2 碳源汇研究的发展阶段	16
2.2.1 碳源汇研究的萌芽时期	17
2.2.2 碳源汇研究的发展时期	17
2.2.3 碳源汇研究的兴盛时期	18
2.3 陆地碳源与碳汇之争	21
2.4 区域碳源汇估算	22
2.4.1 植物生物量的估算	22
2.4.2 土壤碳储量的估算	24
2.5 国家尺度及全球尺度碳源汇估算	26
参考文献	26
第 3 章 陆地生态系统碳源汇的研究方法	33
3.1 生态系统尺度的碳源汇测定	33
3.1.1 碳库法	33
3.1.2 净初级生产力测定法	36
3.1.3 箱式测定法	38
3.1.4 微气象学观测法	39
3.2 大尺度的碳源汇估算	39
3.2.1 清查法	40
3.2.2 遥感反演法	41

3.2.3 过程模型法.....	43
3.2.4 大气反演法.....	45
参考文献	46

第二部分 基于实测数据的中国主要生态系统类型的碳源汇参数

第4章 森林生态系统.....	53
4.1 数据及方法	53
4.1.1 引言	53
4.1.2 概念及定义.....	54
4.1.3 数据收集与整理.....	55
4.1.4 编写说明	58
4.2 中国主要森林生态系统的碳循环参数概述.....	59
4.2.1 落叶针叶林.....	59
4.2.2 常绿针叶林.....	61
4.2.3 针阔叶混交林.....	62
4.2.4 落叶阔叶林.....	63
4.2.5 常绿与落叶阔叶混交林.....	64
4.2.6 常绿阔叶林.....	65
4.2.7 雨林和季雨林.....	66
4.2.8 红树林	68
4.2.9 竹林	69
4.2.10 中国主要森林类型的碳循环参数比较.....	70
4.2.11 中国森林生物量和生产力与全球同类型森林的比较	73
4.3 落叶针叶林	74
4.3.1 落叶松林	74
4.3.2 暖性落叶针叶林.....	82
4.3.3 落叶针叶林的碳循环参数比较.....	83
4.4 常绿针叶林	83
4.4.1 云冷杉林	83
4.4.2 松林	94
4.4.3 柏类林	107
4.4.4 杉类林	112
4.4.5 南方杉松林.....	116
4.4.6 常绿针叶林的碳循环参数比较.....	117

4.5 针阔叶混交林	117
4.5.1 温性针阔叶混交林	117
4.5.2 亚热带针阔叶混交林	121
4.5.3 针阔叶混交林的碳循环参数比较	122
4.6 落叶阔叶林	122
4.6.1 落叶栎类林	122
4.6.2 杨桦林	129
4.6.3 水青冈林	139
4.6.4 刺槐林	140
4.6.5 栲木林	141
4.6.6 其他落叶阔叶林	143
4.6.7 落叶阔叶林的碳循环参数比较	144
4.7 常绿与落叶阔叶混交林	144
4.7.1 北亚热带常绿与落叶阔叶混交林	144
4.7.2 亚热带山地常绿与落叶阔叶混交林	145
4.7.3 常绿与落叶阔叶混交林的碳循环参数比较	146
4.8 常绿阔叶林	147
4.8.1 青冈林	147
4.8.2 锥类林	148
4.8.3 木荷林	151
4.8.4 樟树林	152
4.8.5 金合欢林	153
4.8.6 木麻黄林	154
4.8.7 橡胶树林	155
4.8.8 硬叶常绿阔叶林	156
4.8.9 其他常绿阔叶林	159
4.8.10 常绿阔叶林的碳循环参数比较	160
4.9 雨林和季雨林	161
4.9.1 低地雨林和季雨林	161
4.9.2 山地雨林	162
4.9.3 雨林和季雨林的碳循环参数比较	163
4.10 竹林	163
4.10.1 毛竹林	164
4.10.2 竹阔混交林	165
4.10.3 竹针混交林	166

4.10.4 竹针阔混交林.....	167
4.10.5 竹林的碳循环参数比较.....	168
参考文献	168
第5章 灌丛和灌木荒漠生态系统.....	171
5.1 数据及方法	171
5.1.1 引言	171
5.1.2 概念及定义.....	172
5.1.3 数据收集与整理.....	172
5.1.4 编写说明	173
5.2 中国主要灌丛及灌木荒漠生态系统的碳循环参数概述.....	173
5.2.1 常绿针叶灌丛.....	173
5.2.2 常绿阔叶灌丛.....	174
5.2.3 落叶阔叶灌丛.....	175
5.2.4 灌木荒漠	176
5.2.5 中国主要灌丛及灌木荒漠的碳循环参数比较.....	177
5.3 常绿针叶灌丛	178
5.3.1 柏类灌丛	178
5.3.2 地盘松灌丛.....	179
5.4 落叶阔叶灌丛	180
5.4.1 牡荆灌丛	180
5.4.2 榛子灌丛	183
5.4.3 白栎灌丛	184
5.4.4 绣线菊灌丛.....	185
5.4.5 锦鸡儿灌丛.....	186
5.4.6 白刺花灌丛.....	190
5.4.7 马桑灌丛	191
5.4.8 虎榛子灌丛.....	192
5.4.9 柳灌丛	193
5.4.10 砂生槐灌丛.....	194
5.4.11 金露梅灌丛.....	195
5.4.12 山杏灌丛.....	196
5.4.13 蔷薇灌丛.....	197
5.4.14 盐肤木灌丛.....	198
5.4.15 黄栌灌丛.....	199
5.4.16 岗松灌丛.....	200

5.4.17	沙棘灌丛.....	201
5.4.18	枸杞灌丛.....	202
5.4.19	胡枝子灌丛.....	203
5.4.20	叶下珠灌丛.....	204
5.4.21	怪柳灌丛.....	205
5.4.22	竹叶花椒灌丛.....	206
5.4.23	鲜卑花灌丛.....	207
5.4.24	红背山麻秆灌丛.....	208
5.4.25	化香树灌丛.....	209
5.4.26	酸枣灌丛.....	210
5.4.27	珍珠梅灌丛.....	211
5.4.28	木姜子灌丛.....	212
5.4.29	茅栗灌丛.....	213
5.4.30	山胡椒灌丛.....	214
5.4.31	其他落叶阔叶灌丛.....	215
5.5	常绿阔叶灌丛	216
5.5.1	杜鹃灌丛	217
5.5.2	高山栎-矮高山栎灌丛	223
5.5.3	柃木灌丛	224
5.5.4	南烛-矮杨梅灌丛	225
5.5.5	桃金娘灌丛.....	226
5.5.6	铁仔灌丛	227
5.5.7	肉质多刺灌丛.....	228
5.5.8	山茶灌丛	229
5.5.9	竹灌丛	230
5.5.10	火棘灌丛.....	231
5.5.11	其他热带亚热带常绿阔叶灌丛.....	232
5.6	灌木荒漠	233
5.6.1	白刺荒漠	233
5.6.2	怪柳荒漠	234
5.6.3	麻黄荒漠	235
5.6.4	红砂荒漠	236
5.6.5	合头草荒漠.....	237
5.6.6	盐穗木荒漠.....	238
5.6.7	盐爪爪荒漠.....	239

5.6.8 盐节木荒漠.....	240
5.6.9 沙拐枣荒漠.....	241
5.6.10 梭梭荒漠.....	242
5.6.11 假木贼荒漠.....	243
5.6.12 其他灌木荒漠.....	244
参考文献	245
第6章 草地生态系统	247
6.1 数据及方法	247
6.1.1 引言	247
6.1.2 数据收集与整理.....	247
6.1.3 编写说明	249
6.2 中国主要草地生态系统的碳循环参数概述.....	250
6.2.1 荒漠草原	250
6.2.2 典型草原	251
6.2.3 草甸草原	251
6.2.4 高寒草原	252
6.2.5 典型草甸	253
6.2.6 高寒草甸	254
6.2.7 沼泽草甸	255
6.2.8 盐生草甸	255
6.2.9 温带草丛	256
6.2.10 亚热带/热带草丛	257
6.2.11 灌草丛.....	257
6.3 中国主要草地类型碳循环参数与全球草地的比较.....	258
6.3.1 中国主要草地类型碳循环参数的比较.....	258
6.3.2 中国草地与全球草地的比较.....	259
参考文献	260
第7章 农田生态系统	262
7.1 概述	262
7.1.1 农田生态系统与碳循环.....	262
7.1.2 数据及方法.....	264
7.2 我国主要农作物.....	264
7.2.1 粮食作物	264
7.2.2 油料作物	266
7.2.3 纤维作物	267

7.3 不同轮作制度下的土壤碳循环参数.....	267
7.3.1 小麦单作	268
7.3.2 玉米单作	269
7.3.3 水稻单作	270
7.3.4 花生单作	271
7.3.5 大豆单作	272
7.3.6 棉花单作	273
7.3.7 水稻—水稻连作.....	274
7.3.8 小麦—玉米轮作.....	275
7.3.9 水稻—小麦轮作.....	276
7.3.10 玉米—大豆轮作.....	277
7.3.11 小麦—大豆轮作.....	278
7.3.12 油菜—水稻轮作.....	279
7.3.13 其他一年两熟轮作.....	280
7.3.14 一年三熟轮作.....	281
7.4 不同省份农田土壤碳循环参数.....	282
7.4.1 辽宁省	282
7.4.2 吉林省	283
7.4.3 黑龙江省	284
7.4.4 河北省	285
7.4.5 北京市	286
7.4.6 天津市	287
7.4.7 山西省	287
7.4.8 内蒙古自治区.....	288
7.4.9 山东省	289
7.4.10 河南省	290
7.4.11 江苏省.....	291
7.4.12 上海市	292
7.4.13 浙江省	293
7.4.14 安徽省	294
7.4.15 福建省	295
7.4.16 江西省	296
7.4.17 陕西省	297
7.4.18 甘肃省	298
7.4.19 青海省	299

7.4.20	宁夏回族自治区	300
7.4.21	新疆维吾尔自治区	301
7.4.22	湖北省	301
7.4.23	湖南省	302
7.4.24	广东省	303
7.4.25	广西壮族自治区	304
7.4.26	海南省	305
7.4.27	四川省	305
7.4.28	重庆市	306
7.4.29	贵州省	307
7.4.30	云南省	308
7.4.31	西藏自治区	309
7.5	不同省份农田生物量碳和土壤碳	310
7.5.1	农田生态系统生物量碳	311
7.5.2	农田生态系统土壤碳	311
	参考文献	314
第8章	湿地生态系统	316
8.1	数据及方法	316
8.1.1	数据来源	316
8.1.2	碳循环参数数据库构建	317
8.1.3	沼泽湿地地理区划	318
8.2	沼泽湿地生态系统碳循环参数	320
8.2.1	陆地尺度碳循环参数特征	320
8.2.2	不同区域沼泽湿地群落碳循环参数	321
	参考文献	333
第9章	城市生态系统	335
9.1	数据及方法	335
9.1.1	引言	335
9.1.2	城市植被碳库	336
9.1.3	城市土壤碳库	339
9.1.4	城市建筑物及家具碳库	340
9.1.5	城市垃圾填埋场碳库	341
9.1.6	城市生态系统碳库	344
9.2	城市植被碳库及动态	345
9.3	城市土壤碳库及动态	348

9.4 城市建筑物和家具碳库及动态	351
9.5 城市垃圾填埋场碳库及动态	354
9.6 城市生态系统碳库及动态	356
参考文献	359

第三部分 基于遥感、模型和通量方法的中国区域尺度碳源汇参数

第 10 章 基于遥感、模型和通量方法的中国陆地生态系统碳源汇参数	367
10.1 数据及方法	367
10.1.1 引言	367
10.1.2 遥感反演	367
10.1.3 模型模拟	367
10.1.4 通量反演	369
10.1.5 数据校验	369
10.1.6 生态系统类型的划分	370
10.2 森林和灌丛生态系统	371
10.2.1 森林和灌丛生态系统 GPP	372
10.2.2 森林和灌丛生态系统 NEP	375
10.2.3 森林和灌丛生态系统 NPP	378
10.2.4 森林和灌丛生态系统土壤有机碳	381
10.2.5 森林和灌丛生态系统植被碳	383
10.3 草地和荒漠生态系统	386
10.3.1 草地和荒漠生态系统 GPP	386
10.3.2 草地和荒漠生态系统 NEP	388
10.3.3 草地和荒漠生态系统 NPP	391
10.3.4 草地和荒漠生态系统土壤有机碳	393
10.3.5 草地和荒漠生态系统植被碳	395
10.4 农田和湿地生态系统	397
10.4.1 农田和湿地生态系统 GPP	397
10.4.2 农田和湿地生态系统 NEP	400
10.4.3 农田和湿地生态系统 NPP	402
10.4.4 农田和湿地生态系统土壤有机碳	405
10.4.5 农田和湿地生态系统植被碳	407
10.5 研究方法的不确定性分析	409
10.5.1 遥感反演的不确定性	409

10.5.2	模型模拟的不确定性	409
10.5.3	通量反演的不确定性	410
	参考文献	410
第 11 章	中国县域、省域和全国尺度碳源汇主要指标	414
11.1	全国尺度陆地碳源汇的总体特征	414
11.1.1	GPP 变化特征	414
11.1.2	NPP 变化特征	416
11.1.3	NEP 变化特征	416
11.1.4	植被碳变化特征	418
11.1.5	土壤有机碳变化特征	418
11.2	省域尺度碳源汇特征	419
11.2.1	生态模型结果	419
11.2.2	遥感反演结果	421
11.2.3	基于地面实测数据的植被和土壤有机碳储量估算	422
11.2.4	不同方法估算的省域 GPP 和 NPP 比较	425
11.3	县域尺度碳源汇特征	426
11.3.1	县域尺度碳源汇指标总量	427
11.3.2	县域尺度碳源汇指标单位面积均值	427
11.3.3	县域尺度碳源汇指标人均值	430
11.4	不确定性分析	432
	参考文献	433
附表	中国县域尺度主要碳源汇指标总量、单位面积均值及人均值	435
附图	项目收集实测数据样点分布图	572

第一部分

陆地生态系统碳源汇概述及研究方法

第 1 章 大气二氧化碳浓度变化及化石燃料排放

1.1 二氧化碳的理化性质

二氧化碳（carbon dioxide）是一种空气中常见的碳氧化合物，分子式为 CO₂。CO₂ 主要来自动植物、微生物的呼吸以及有机物的分解变质或者化石燃料的燃烧等。它是植物光合作用的底物，也是生物地球化学循环中最关键的要素，与气候变化和海洋酸化等生态问题息息相关。CO₂ 在大气中占比很低（为 0.03%~0.04%）。常温常压下，它无色无味或略有酸味，密度高于空气，溶于水和一些有机试剂，化学性质不活泼，通常不能支持燃烧，与水 and 碱均可发生反应（张美华等，1982），被广泛用作制冷剂和灭火剂等。低浓度的 CO₂ 没有毒性，但在高浓度时会使动物和人中毒。

最早确定二氧化碳化学式的是法国化学家让-巴蒂斯特·安德烈·杜马（Jean-Baptiste André Dumas, 1800~1884）。1840 年，他通过含碳石墨进行燃烧实验，并用氢氧化钾溶液进行吸收，计算得到二氧化碳中氧和碳的质量分数比为 72.73：27.27（约等于 32：12=16×2：12），即氧和碳的原子个数应为 2：1，从而推测出二氧化碳的化学式为 CO₂（姜廷午，2013）。CO₂ 的主要物理化学性质见表 1-1。

表 1-1 二氧化碳的主要物理化学性质

性质指标	性质内容	性质指标	性质内容
中文名	二氧化碳	用途	灭火剂、冷冻等
别名	碳酸酐、干冰、碳酸气等	英文名	carbon dioxide
分子式	CO ₂	化学类别	非金属氧化物
饱和蒸气压	-39℃时，1013.25 kPa	分子量	44.01 g/mol
状态	常温常压下为气体，约占空气体积的 0.033%	稳定性	较稳定
颜色	大气温度和压力下，无色	分解性	在 2000℃分解产生一氧化碳
溶解性	溶于水，形成碳酸，溶于烃类等多数有机溶剂	气味	无味或有轻微刺激性气味
沸点	-78.5℃	溶解度	25℃时，为 0.2%
pH	饱和溶液在 101 kPa 时，为 3.7	熔点	527 kPa 时，为-56.6℃
相对密度	在-79℃时，为 1.56（空气为 1）	表面张力	在熔点时，为 0.0162 N/m
可燃性	不可燃	相对蒸气密度	1.53（空气为 1）
电离势	13.77 eV	标准生成焓	-393.51 kJ/mol
临界体积	2.137 cm ³ /g	临界压缩系数	0.274

资料来源：National Center for Biotechnology Information. PubChem Database. Carbon dioxide, CID=280, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/carbon-dioxide>（2020-07-28）。

CO₂ 是一种主要的温室效应气体，其对大气升温的贡献仅次于水汽（H₂O）。所谓的温室效应是指大气、云以及地表受热后释放的长波红外辐射会被温室气体吸收或重新释放，造成地表和大气升温的现象（IPCC, 2007）。主要的温室气体包括水汽、CO₂、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFC）、全氟化碳（CF₄）和六氟化硫（SF₆）。

CO₂ 是一种长寿命的温室气体，在大气中可存留 120 年，甚至可达 200 年，导致温室效应（张美华等，1982）。最早发现 CO₂ 具有温室效应的是法国化学家约瑟夫·傅里叶（Joseph Fourier）。他于 1824 年发现 CO₂ 能使地球表面温度增加。此后，瑞典化学家斯万特·阿伦尼乌斯（Svante Arrhenius, 1859~1927）于 1896 年首次定量证明了这一发现，并指出如果大气 CO₂ 浓度加倍，地球表面温度将升高 5~6℃（Weart, 2008）。

大气 CO₂ 之所以具有较强的温室效应，是因为其对地面长波辐射（尤其是波长 12~18 μm 的红外线波段）有强烈的吸收，且可吸收水蒸气无法吸收的特征波长（吴兑，2003）。研究表明，大气 CO₂ 浓度的持续增加会诱发气候变暖、氮沉降、土壤和海洋酸化等一系列问题，对人类生存环境以及生产生活产生重要影响（方精云等，2018）。自 1990 年以来，长寿命混合温室气体的辐射强迫增加了 45%；其中，CO₂ 的辐射强迫增加了 60.6%，占总增加量的 80%（图 1-1；Butler and Montzka, 2020）。由于 CO₂ 排放量占人为温室气体排放总量的 77%（IPCC, 2007），具有较强的可控性。因此，CO₂ 被视为最重要的温室气体，成为减排的主要对象。

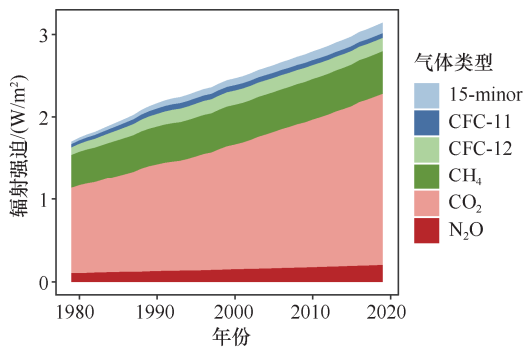


图 1-1 1979~2019 年所有长寿温室气体的全球辐射强迫

气体类型包括氧化亚氮（N₂O）、二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、二氟二氯甲烷（CFC-12）、一氟三氯甲烷（CFC-11）以及其他 15 种微量卤化气体（15-minor）

资料来源：Butler and Montzka, 2020

1.2 大气二氧化碳浓度的历史变化

对于较早历史时期的大气 CO₂ 浓度，人们需通过测定冰芯中 CO₂ 浓度等间接方法获得。最著名的项目是欧洲科学家对南极洲冰芯中 CO₂ 浓度的测定（European Project for Ice Coring in Antarctica）（Lüthi et al., 2008）。根据对冰芯的测定，第四纪晚期大气 CO₂ 浓度为 172~

300 ppm^① (Lüthi et al., 2008); 在大约 66 万年前大气 CO₂ 浓度出现最低值 (约 170 ppm); 在大约 45 万年前, 大气 CO₂ 浓度低于 260 ppm; 在约 33 万年前出现最高值 298.6 ppm (图 1-2a)。在 18 世纪中叶工业革命开始前的 1 万年, 全球大气 CO₂ 浓度约为 280 ppm。

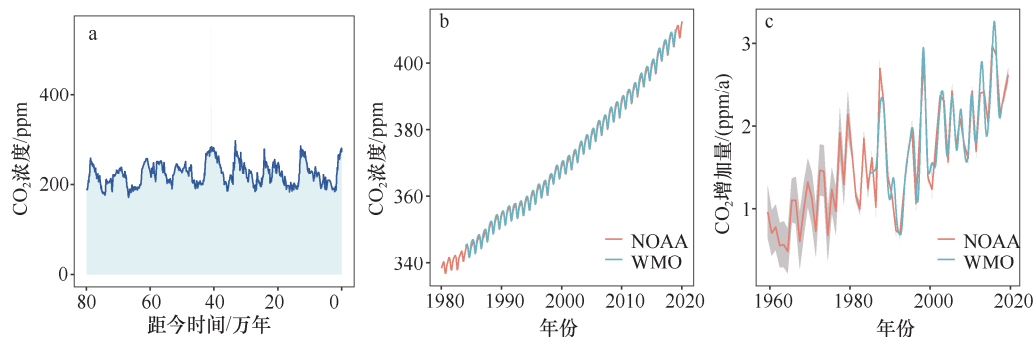


图 1-2 过去 80 万年 (距离 1980 年, a) 和 1980~2020 年大气 CO₂ 浓度的变化 (b), 以及 1959~2019 年大气 CO₂ 浓度的增加量 (c)

数据来源: NOAA Climate.gov (<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>); WMO Greenhouse Gas Bulletin, No.15, 2019. (https://gaw.kishou.go.jp/publications/global_mean_mole_fractions); National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, 2019: Trends in atmospheric carbon dioxide (https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_data.html)

美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室 (NOAA/ESRL) 和世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 监测了近期的全球大气 CO₂ 浓度。NOAA/ESRL 主要关注海洋边界层, WMO 同时关注内陆和海洋的站点。因此, WMO 的结果比 NOAA/ESRL 略高, 但得出的大气 CO₂ 浓度变化趋势是类似的 (Tsutsumi et al., 2009; WMO, 2019)。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次报告指出, 为将全球升温幅度控制在 2℃ 以内, 全球大气 CO₂ 浓度则需控制在 450 ppm 内 (沈满洪等, 2011)。工业革命以来, 人类不断地开采和利用煤、石油和天然气等化石燃料, 同时人们对合成化肥、水泥的用量也急剧增加。据 Canadell 等 (2007) 报道, 由化石燃料燃烧及土地利用方式改变排放的 CO₂ 量, 可占生物圈自然释放 CO₂ 量的 1/26~1/22, 为 9~10 Pg C (方精云等, 2011); 到 2016 年大气 CO₂ 浓度已达到 400 ppm (WMO, 2017), 2018 年达到 407 ppm, 2019 年达到 409.8 ppm (图 1-2b)。

NOAA 的数据显示, 1960 年大气 CO₂ 浓度的年绝对增加量为 0.7 ppm/a, 到 2019 年则增加到 2.6 ppm/a。WMO 的数据显示大气 CO₂ 浓度绝对增加量从 1985 年的 1.5 ppm/a 增加到 2017 年的 2.2 ppm/a (WMO, 2019) (图 1-2c)。

最近 10 年 (2010~2019 年), 化石燃料燃烧和土地利用变化平均向大气排放的 CO₂ 分别为 9.4 Pg C/a 和 1.6 Pg C/a (Friedlingstein et al., 2020)。这些排放的 CO₂ 约有 46% (5.1 Pg C/a) 留存在大气中, 导致大气 CO₂ 浓度显著增加; 另有 54% 分别被陆地生态系统 (3.4 Pg C/a, 约占 31%) 和海洋生态系统 (2.5 Pg C/a, 约占 23%) 吸收 (图 1-3)。

① 1 ppm=10⁻⁶。

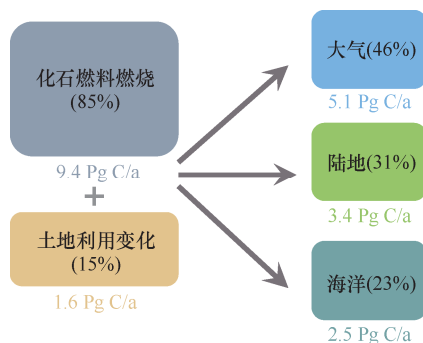
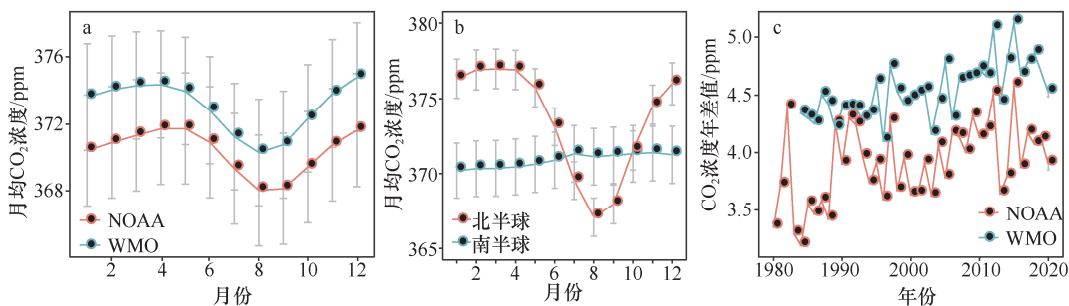


图 1-3 人类活动引起的全球碳排放及其去向示意图 (2010~2019 年)

数据来源: Friedlingstein 等 (2020), 方精云 (2021)

1.3 大气二氧化碳浓度的季节变化和纬度变化

大气 CO_2 浓度存在显著的季节波动。总体上, 大气 CO_2 浓度在冬春季节较高, 在夏季 8 月具有最低值, 约为 370 ppm (图 1-4a)。其中, 北半球大气 CO_2 浓度的季节波动与总体趋势一致, 但南半球大气 CO_2 浓度的季节变化则较为平缓 (图 1-4b)。这种南北半球的差异可能是由于北半球具有更大面积的陆地和植被, 供养了大部分的人口, 人类活动频繁。大气 CO_2 浓度的季节波动也与生物圈内碳动态的季节变化有关。因为生物圈在释放 CO_2 的同时, 也会通过植被、土壤和海洋等吸收 CO_2 (WMO, 2006)。在非生长季, 植被生长缓慢或停止, 但土壤微生物仍具有活性, 它们通过呼吸作用释放 CO_2 , 导致大气 CO_2 浓度较高; 而在生长季, 植被茂盛, 大量吸收 CO_2 , 使大气 CO_2 浓度显著降低 (郭英楠, 2019)。从 20 世纪 80 年代到 21 世纪第一个 10 年, 月均大气 CO_2 浓度的年差值为 3.2~5.1 ppm (图 1-4c)。

图 1-4 大气 CO_2 浓度的月均变化 (a, b) 和年差值随时间的变化 (c)

数据来源: WMO Greenhouse Gas Bulletin, No.15, 2019. (https://gaw.kishou.go.jp/publications/global_mean_mole_fractions/); Ed Dlugokencky and Pieter Tans, NOAA/GML (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/); World Data Centre for Greenhouse Gases (<https://gaw.kishou.go.jp/>) (站点数据)

除明显的季节变化外, 大气 CO_2 浓度也存在显著的空间差异。工业革命以后, 大气 CO_2 浓度呈现从南半球到北半球递增的趋势 (图 1-5), 这种格局在早期研究中也有报道 (Tans et al., 1990; 沈承德等, 1995), 并在 1980~2010 年普遍存在 ($P < 0.01$) (图 1-5)。

其中，大气 CO₂ 浓度随纬度增加的趋势在 1~5 月、11 月和 12 月较为显著（图 1-6）。

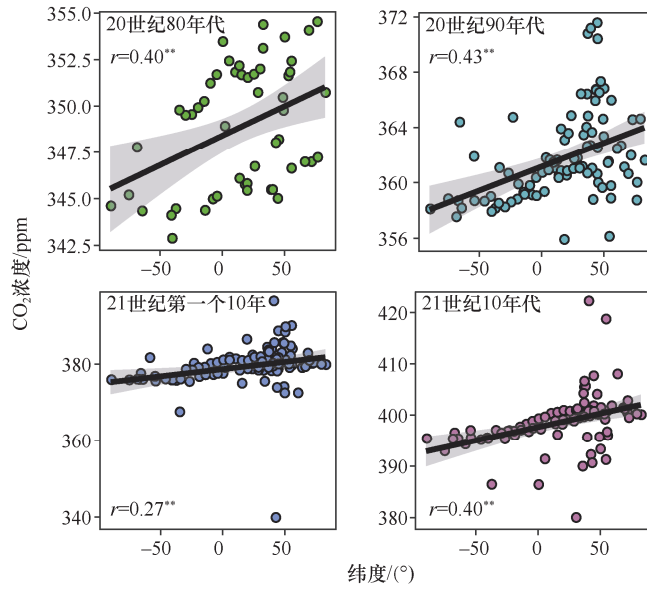
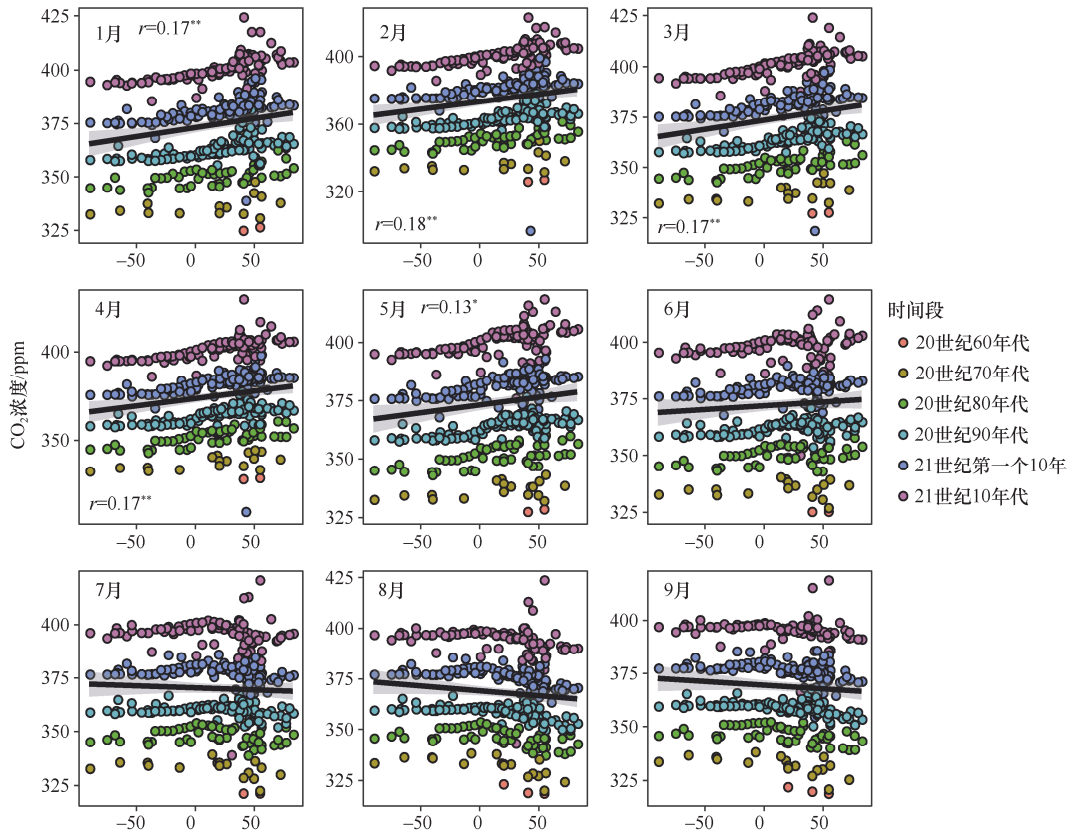


图 1-5 不同时间段大气 CO₂ 浓度的纬度分布格局
负值为南纬，正值为北纬。**表示 $P < 0.01$



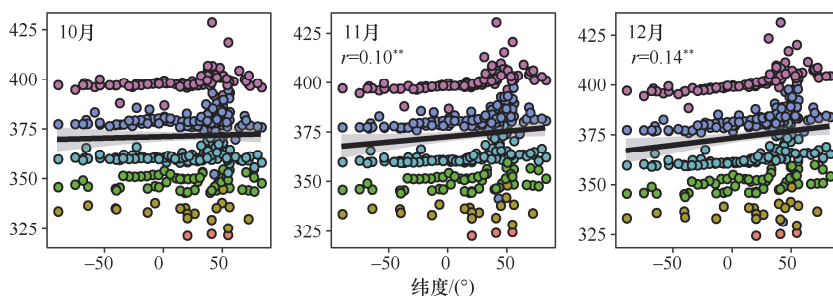


图 1-6 不同月份大气 CO₂ 浓度的纬度分布格局
负值为南纬，正值为北纬。**表示 $P < 0.01$

中国的瓦里关大气 CO₂ 浓度观测站远离人为干扰，是欧亚大陆腹地唯一的全球大气本底站，能较好地反映北半球中高纬度地区的大气 CO₂ 浓度状况（中国气象局气候变化中心，2015）。从有记录以来，瓦里关地区大气 CO₂ 浓度随时间显著增加（图 1-7a），2017 年首次全年每月 CO₂ 浓度均超过 400 ppm，年均 CO₂ 浓度为 406.8 ppm，并表现出显著的季节波动，在春季和冬季较高，在夏秋季节较低（图 1-7b）（李明等，2019）。这主要是生长季植被光合作用利用 CO₂，而冬季化石燃料燃烧产生较多 CO₂ 所导致的。这种趋势与基于日本大气 CO₂ 浓度观测卫星（GOSAT）反演的中国地区大气 CO₂ 浓度的季节分布一致（赵静和崔伟宏，2014；杨东旭等，2016）。这反映了陆地生态系统的植被、土壤等碳源汇特征对大气圈的重要影响（刘立新等，2009）。2018 年 4 月发布的《中国温室气体公报》报告了中国大陆大气 CO₂ 浓度在 2016 年已突破 400 ppm 大关[（402.5±4.5）ppm]，年增长率高达 3.7 ppm；2017 年继续增长为（405.0±3.0）ppm，绝对增量为 2.6 ppm（台湾数据暂缺）。其中，华东地区浓度最高，为（408.3±1.9）ppm；华中和华南地区次之，分别为（407.7±1.7）ppm 和（406.1±2.0）ppm；东北地区最低，为（403.5±2.7）ppm。

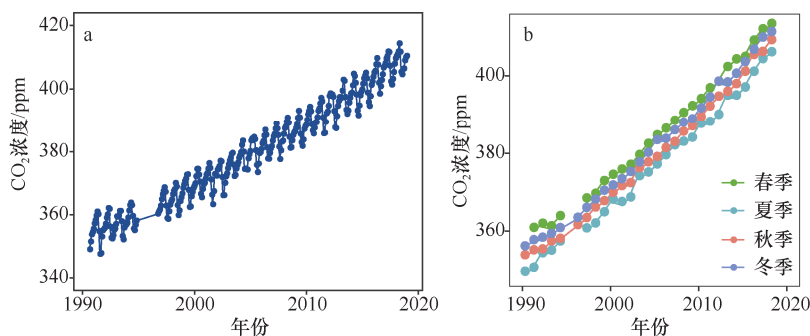


图 1-7 中国瓦里关全球大气本底站大气 CO₂ 浓度变化
数据来源：NOAA/ESRL

1.4 化石燃料二氧化碳排放

如图 1-3 所示，化石燃料排放是大气 CO₂ 浓度增加的主要来源（占 85%），也是最主要的可控排放量。因此，测算各国及全球的化石燃料排放量是制定节能减排和气候变

化谈判政策的一项不可或缺的基础工作。本节主要介绍两项工作。

1.4.1 方精云等测算

为分析不同国家以及发达国家和发展中国家在不同历史尺度上的 CO₂ 排放变化，方精云等（2018）设置了 3 个不同的时间窗口（1850~2010 年、1950~2010 年和 1990~2010 年），对全球化石燃料 CO₂ 排放量进行了测算。他们设定发达国家为《京都议定书》附件 I 国家，发展中国家为非附件 I 国家。这 3 个时期分别如下。

1) 自工业革命时期（1850 年）至 2010 年：这是人类历史上大规模消耗化石能源的工业发展期，也是化石燃料碳排放最主要的时期。

2) 1950~2010 年：发达国家在第二次世界大战结束后，随着第三次工业革命的兴起，经济迅速恢复，石油等化石燃料的大量使用导致大气 CO₂ 浓度剧增，直到 20 世纪 80 年代，同期发展中国家也加快工业化进程，产生了较以往更多的碳排放。

3) 1990~2010 年：以《联合国气候变化框架公约》签署为标志，人类开始关注碳排放问题。此时期，《联合国气候变化框架公约》（1992）、《京都议定书》（1997）、《哥本哈根协议》（2009）等国际公约相继签署，公约框架下的减排行动不断推进。然而，这些措施仍难以改变大气 CO₂ 浓度继续高速增加的局面。这部分碳排放在很大程度上来自发展中国家的贡献。

就上述 3 个时期，方精云等（2018）分别计算了全球、发达国家、发展中国家以及世界主要国家的累计排放量、人均累计排放量、年排放量和人均年排放量（表 1-2，图 1-8，图 1-9）。世界主要国家指 G8+5 国家，即 8 国集团（俄罗斯除外）及 5 个最主要的发展中国家（具体国家见表 1-2）。

表 1-2 全球、发达国家与发展中国家及世界主要国家累计排放量和人均累计排放量

国家/地区	1850~2010 年		1950~2010 年		1990~2010 年	
	累计排放量 /Pg C	人均累计排放量 /(t C/人)	累计排放量 /Pg C	人均累计排放量 /(t C/人)	累计排放量 /Pg C	人均累计排放量 /(t C/人)
全球	363	97	303	65	150	25
发达国家	271	285	214	193	88	72
发展中国家	97	25	94	23	63	13
美国	97	551	73	313	31	110
中国	36	32	36	31	25	20
德国	22	321	15	193	5	59
英国	19	432	10	170	3	52
日本	14	130	13	112	7	54
印度	10	13	10	11	7	7
法国	9	194	6	114	2	36
加拿大	7	378	6	246	3	94
意大利	6	104	5	92	2	43
南非	4	171	4	124	2	49
墨西哥	4	69	4	48	2	22
巴西	3	23	3	21	2	10

注：俄罗斯数据始于 1992 年，因此此表没有给出数值，但在图 1-8 和图 1-9 中，给出了俄罗斯历年变化量和人均变化量。

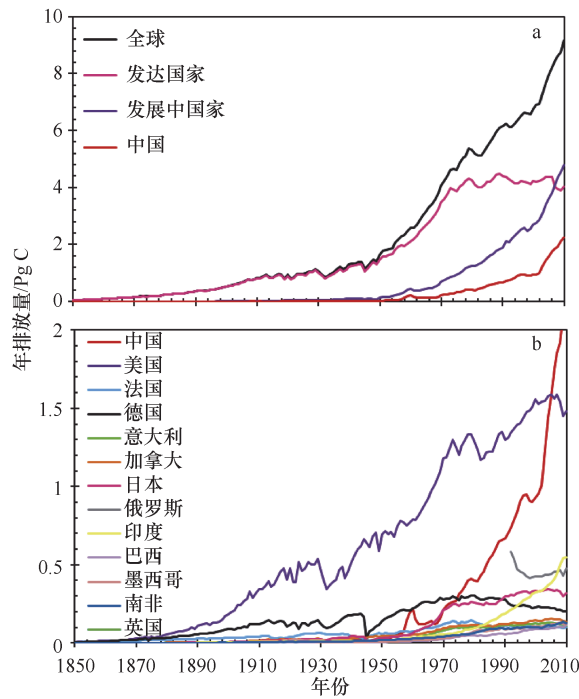


图 1-8 碳排放量历年变化

a. 全球、发达国家和发展中国家以及中国；b. G8+5 国家（俄罗斯数据始于 1992 年）

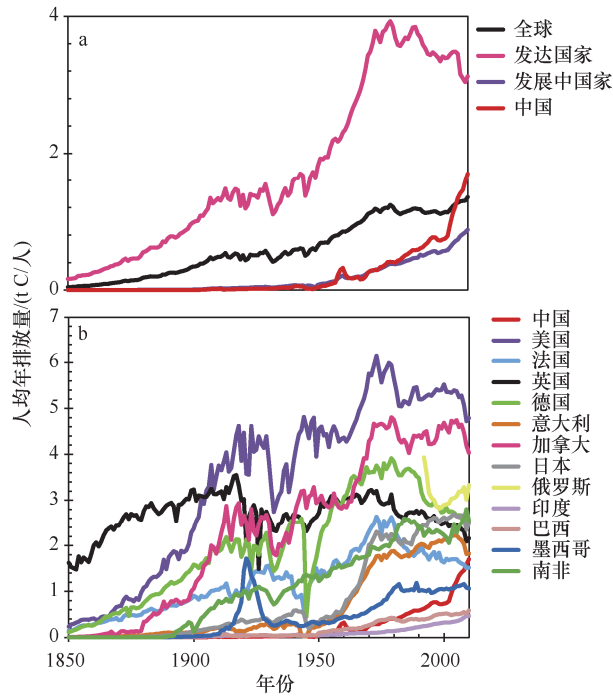


图 1-9 1850~2010 年人均年排放量历年变化

a. 全球、发达国家和发展中国家以及中国；b. G8+5 国家（俄罗斯数据始于 1992 年）