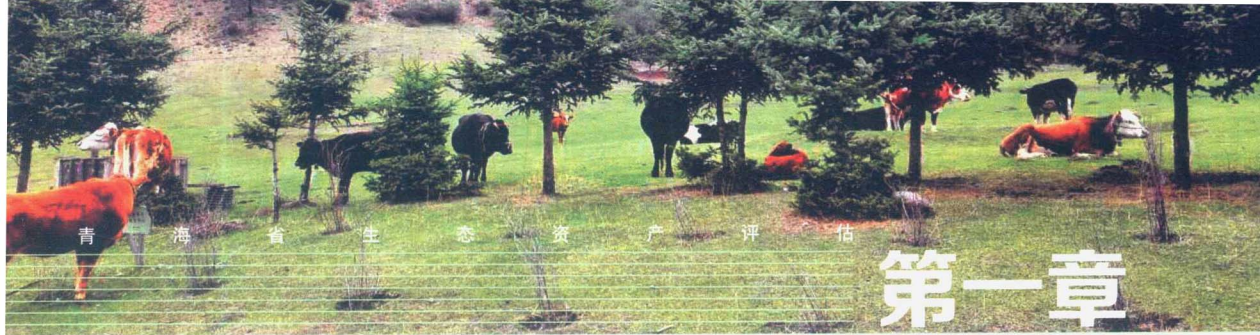




青 海 省 生 态 资 产 评 估

第一章

绪 论

一、背景

20 世纪 60 年代起，随着西方工业化程度走向高峰，其发展也带来了一系列的联动问题，尤其是不良的社会生产方式带来的生态环境恶化问题，促使工业社会面临着历史性的变革。1962 年，美国女科学家 Rachel Carson 著述的《寂静的春天》（Silence Spring）深刻地揭示了伤害自然必然危机人类自身生存的事实，提出了人与自然共存共荣的倡议。1972 年，联合国在斯德哥尔摩召开了有史以来第一次世界各国政府共同讨论当代环境问题、探讨保护全球环境战略的“人类环境会议”。会议阐明了与会国和国际组织所取得的 7 点共同看法和 26 项原则，以鼓舞和指导世界各国人民保护和改善人类环境。

1974 年，斯坦福大学教授 Holdren 和 Ehrlich 提出了自然服务（natural services）的概念，并指出：“企图通过其他手段代替已丧失的自然服务功能的尝试是昂贵的，而且从长远的观点来看是失败的，即自然服务是不可替代的”。1993 年由联合国首次公布的《环境与经济综合核算体系》（The System of Integrated Environmental and Economic Accounting, SEEA-1993），将所有的环境领域的资产和流量从原有的国民经济核算（System of National Accounts, SNA）账户中区别开来进行了详细的核算，充分肯定了自然资源所蕴含的直接或间接经济价值。1995 年，世界银行明确将人类拥有的资本划分为 4 大类：人造资本、人力资本、自然资本和社会资本。随后，Daily（1997）主编的《自然的服务——社会对自然生态系统的依赖》和 Costanza（1997）等在《Nature》杂志发表的文章《世界生态系统服务与自然资本的价值》等都标志着生态资产及其服务价值评估成为研究和社会应用的前沿热点。

然而，2005 年联合国发布的《千年生态系统评估报告》（Millennium Ecosystem Assessment, MA）仍然指出“近数十年来，人类对自然生态系统进行了前所未有的改造，使人类赖以生存的自然生态系统发生了前所未有的变化”，在人类企图恢复和保护生态

系统几十年之后，仍有“60%的生态系统正处于不断退化之中”。2011年，联合国环境规划署（United Nations Environment Programme, UNEP）发布的面向政策制定者的综合报告《迈向绿色经济——实现可持续发展和消除贫困的各种途径》指出，绿色经济可显著降低环境风险和生态稀缺程度，并能够提高人类福祉和社会公平。报告特别强调了自然资本，尤其是“活的”自然资本（地球的生态系统和生物多样性）的作用，并认为实现绿色经济不仅会实现财富增长，特别是生态共有资源或自然资本的增益，还会产生更高的国内生产总值增长率。

半个多世纪以来，中国共产党在带领人民摆脱贫困、走向富强的过程中取得了可喜的成果。但是在成就的背后，未来的发展也面临着越来越多的问题和挑战。我国面临的环境、资源瓶颈制约越来越大，不平衡的环境、资源和生态对于经济、政治、社会、文化的发展形成了障碍。2002年，党的十六大提出要“推动整个社会走上生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路”。2007年，党的十七大报告将建设生态文明确立为全面建设小康社会的重要目标，基本形成节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式、消费模式。党的十八届三中全会提出，要探索编制自然资源资产负债表，对领导干部实行自然资源资产离任审计，并建立生态环境损害责任终身追究制。各相关部门、不少地方政府都在进行编制自然资源资产负债表的探索和尝试。2015年，我国还出台了《党政领导干部生态环境损害责任追究办法（试行）》。目前，我国已有青海、海南、湖北、云南、江苏等省份出台实施了生态考核的相关办法和考核标准。这一系列政策和机制的背后所需的根本支撑点是我们对于自然生态资源的本底及其变化情况的精确掌握。将生态系统中的元素作为资产来衡量可直观地反映其社会地位和效益，为我国掌握生态资源本底、了解生态价值、实施生态政绩考核，推动整个社会走上生态良好的文明发展道路提供基础保障。

青海省是我国青藏高原的重要组成部分，平均海拔3000米以上，境内不仅山脉高耸，地形多样，湖泊棋布，河流纵横，草原茫茫，物种富集，而且还拥有全国最大的内陆咸水湖——青海湖，是长江、黄河、澜沧江的发源地，被誉为“江河源头”。保护生态与环境，实施可持续发展战略，是我国的一项基本国策。党的十五大以来，青海省一直被列为我国生态与环境保护和建设的战略要地。

当前国内外对自然生态资源作为资产的评估研究可谓百家争鸣，仅称谓就有自然资本、自然资产、生态系统资产、环境资产、生态资产等多种说法。虽然有SEEA、MA等较为权威的研究对其概念和评估方法做了深入的探讨和界定，但由于研究领域、研究视角和研究目的的不同，对于生态资产的概念、范畴、评估指标、评估手段等的界定仍然各不相同。本项研究借鉴了SEEA的评价体系，以生态资源的量化和资产价值评估为研究目标，探讨了生态资产的概念和范畴，设计构建了适用于青海省生态状

况的生态资产评估指标体系,并选取了生态过程模型、生态位模型、经济模型等结合空间信息技术作为主要评价手段,对2012年年底青海省的生态资源物质量及生态资产价值进行了评估,为相关研究和决策提供了一种新的理论视角和技术手段。

二、青海省的生态地位

(一) 青海省是我国“两屏三带”生态安全战略的重要组成部分,“七区二十三带”农业发展战略的重要保障

国家“十二五”规划纲要提出“两屏三带”生态安全战略格局,“青藏高原生态屏障”是五大“绿色模块”中最大、最重要的一块,是国家绿色发展生态轮廓中的重要一环,青海是主体,也是国家极其重要的生态功能区。青海省的三江源、青海湖等生态功能区是亚洲、北半球气候变化敏感区和脆弱性地带,对调节区域气候环境起着重要作用。青海省的生态保护及“青藏高原生态屏障”建设,也直接影响“甘肃、新疆主产区(棉花、小麦)”东部和“河套灌区主产区(小麦)”的农业发展。保护青海省生态与环境,就是保障国家农业发展战略的实施。

(二) 青海省是“中华水塔”及“亚洲水源”

水是中国经济社会可持续发展的命脉。长江、黄河、澜沧江在世界分别居第三、第五、第六长河的位置,皆发源于青海省的三江源地区,因此,青海省被誉为“中华水塔”和“亚洲水源”。长江和黄河两大流域是我国社会经济发达地区,虽然面积仅占全国总面积的24%,而人口却占到了全国的50%,国内生产总值占到了全国的65%。青海省境内长江和黄河出境流量分别占流域总产水量的1.9%和38%。澜沧江在青海省内的流域面积仅占整个流域面积的4.6%,但产自青海的水量占总水量的15%。还有,祁连山的黑河、石羊河等内流河都发源于青海省境内,年径流量26.4亿立方米,仅黑河在青海境内的年径流量就高达13.8亿立方米。河西走廊2780万公顷土地上的87.9万公顷耕地,448.3万人民生产、生活及工业发展完全依赖于祁连山的水源供给。据初步统计,我国约有1000亿立方米淡水来自青藏高原,产自青海省的径流量为600亿立方米,占青藏高原的60%。青海省人均水量12000余立方米,是全国人均占有量的5倍多,可谓水资源大省。

(三) 青海省是世界上高海拔地区生物多样性最丰富的地区之一

青海省作为青藏高原的主要组成部分,其生物多样性表现出独特的高原性和珍稀性。青海省植被以高寒植被为主,其次为荒漠植被和草原植被,森林植被相对较少。

据不完全统计,青海省有维管束植物 114 科 577 属 2483 种;有陆生野生动物 499 种,鱼类 55 种。虽然青海省陆生野生动物种类不多,但高原特有种比例高达 40% 以上。青海省内有 I、II 级国家重点保护野生动物 73 种,还有 58 种《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)附录种,其中有 52 种列在《国家级重点保护野生动物名录》中。由于有丰富的物种多样性和遗传多样性,青海省享有“高原物种基因库”的殊荣。

(四) 青海省生态保护遏制了中国西部第二条风沙带的形成

青海省具有广袤的草地和丰富湿地,其中草地面积达 3400 万公顷,丰富的草地和湿地资源为河源区的水源涵养和土地荒漠化防治起到了极其重要的作用。柴达木盆地地处北半球西风带,深居内陆,干旱少雨,蒸发量大,大风日数多。沙化土地面积 907.4 万公顷,占区域土地面积的 30.8%。多年来,这一区域的生态保护遏制了沙化土地的扩大。柴达木盆地和共和盆地荒漠植被的保护以及退耕还林、防沙治沙、青海湖生态保护等工程的实施有效地抑制了青海湖及周边地区生态与环境的恶化,避免了我国西部地区又一条风沙带的形成。

(五) 青海省的政治地位突出

青海省属于少数民族地区,经济社会发展比较落后,国家在主体功能区规划中将青海省的大部分地区划为禁止开发和限制性开发区,三江源、青海湖、祁连山等地区划建为国家级的保护区和重点生态功能区,并实施一系列的生态保护与建设工程,各族群众为了生态保护,在经济发展方面作出了牺牲。近两年出台了一系列有关藏区和青海省经济社会发展的若干政策和措施,并开始实施“三江源国家级生态保护综合试验区”,凸显青海省在全国生态文明建设中的特殊、重要地位。随着有利于生态保护、民生改善、经济发展和社会进步相协调的体制机制的形成,青海省在全国的生态政治地位将更加突出。

三、青海省开展生态资产评估研究的重大意义

(一) 为政府生态考核机制提供科学依据

近年来,唯 GDP 论的弊端越来越凸显,国内外越来越多的声音开始反对以 GDP 作为政府考核的唯一指标,以环境倒逼单纯的 GDP 的政府考核机制已成热议。2013 年,习近平总书记多次强调“再也不能简单以国内生产总值增长率来论英雄了”。党的十八大以来,青海省从省情实际出发实施生态立省战略。早在 2006 年,青海省人民政府对青南地区就不再设“GDP”硬性经济考核指标,而是增加了生态建设与环境

保护方面的指标；2009年，青海省又将6个州（市）实施防治沙情况列入目标责任考核指标。

以生态资产账户的形式核算生态资产负债表来考核政府经济发展的资源消耗、环境代价和生态效益，是环境与发展综合决策、政府生态环境绩效评估考核、生态环境补偿等的重要基础。新型的政府考核机制中，将自然资源资产负债登记制度作为行政考核的指标之一。十八届三中全会提出“健全自然资源资产产权制度和用途管制制度”，“探索编制自然资源资产负债表，对领导干部实行自然资源资产离任审计”，以及“建立反映市场供求和资源稀缺程度、体现生态价值和代际补偿的资源有偿使用制度”。而编制生态资产负债表的前提就是通过在全省范围内对各类型的生态系统开展生态资产评估。准确评价青海省的生态“家底”，掌握省内生态资产价值以及分布情况，了解青海省生态资产在全国的地位，明确青海省生态建设对我国经济社会可持续发展的贡献，能够为青海省生态立省战略、生态绩效考核和激励约束机制的深入实施提供科学依据。

（二）为完善青海省实施生态补偿政策奠定基础

青海省是长江、黄河和澜沧江的发源地，是我国重要的生态调节区、气候变化敏感区和珍稀濒危野生动植物集中分布区，具有极其重要的生态战略地位。省内的长江、黄河和澜沧江的出境流量分别占国内流域总产水量的1.9%、38%和15%。青海省淡水资源资产保护关系到下游的藏、甘、滇、川等16个省、自治区、直辖市的用水安全。此外，青海省分布有21种国家Ⅰ级重点保护野生动物，52种国家Ⅱ级重点保护野生动物，还有58种CITES附录种，野生动植物资产特别是高原特有物种资产巨大。其生物多样性保护在全国乃至全球具有重要地位。同时，青海省的植物和土壤中还固存着大量的碳和养分资产，可为人类生产、生活提供基础营养物质和必要保障。

鉴于青海省在我国生态安全的重要地位，开展青海的生态补偿已经成为一种共识。而生态补偿的重要依据就是青海的各类生态系统的本底生态资产价值，青海省在这方面还没有科学的、系统的、令人信服的评估方法的数据和结果。虽然2000年以后许多学者纷纷利用遥感影像技术对青海省局部地区（玉树州、贵德县、三江源生态功能区等）生态系统效益的价值进行了测算，但没有完整地对全省进行生态资产评估。2004年开始，青海省对生态公益林进行了生态效益补偿。青海省生态公益林的范围主要为有林地、灌木林地、江河两岸的护岸林等。但青海省未将面积巨大而且类型丰富的生态系统如沼泽、湖泊、荒漠、冻土等列入生态效益补偿范围。只有在对各类型生态资产进行详细计算与综合评估的基础上，才能有的放矢、分门别类地实施生态效益补偿政策。

（三）为民族地区经济社会的可持续发展提供空间和动力

青海省既是生态区位重要的生态大省，又属于少数民族地区，经济社会发展落后，需要国家给予特殊的社会和经济发展政策的支持，以使得少数民族地区民众的公共化服务和生活发展能达到全国平均水平。提供生态资产评估，确定森林、湿地、草原和荒漠等生态系统的本底资源状况和价值，可以为实施生态补偿政策提供依据，同时发挥少数民族群众在生态保护方面的传统优势和积极性，使青海省生态保护和建设获得持续动力。



研究进展

一、生态资产的起源与范畴

（一）自然资本与生态系统服务

生态资产的概念源自于环境问题的产生和人们对自然作为一种资本的逐步理解和认识。1776年，亚当·斯密在《国富论》中首次提出和定义了资本，即机器、厂房、工具及改良的土地。现代经济学中对资本最普遍的定义是能够创造和带来新增价值的价值附着物，包括生产资本、人力资本、金融/社会资本。由于过去社会中自然环境并不是人类社会限定因素，因此一直被传统经济学所忽略。1931年，美国经济学家 Hotelling 区分了可再生资源 and 不可再生资源，使得人们对于自然资源的珍稀性有了最初的概念上的认识。1948年，美国学者 Vogt 在讨论美国国家债务的时候第一次提出了自然资本的概念，他指出，资源的耗竭会降低美国偿还债务的能力。1974年，美国斯坦福大学教授 Holdren 和 Ehrlich 把人类社会与自然环境问题的关系从直接和间接两个层面联系到了一起并做了深入的探讨，认为长期以来人类对人口膨胀和科技发展所导致的生态问题缺乏认识，并证明企图通过其他手段代替已丧失的自然服务功能的尝试代价是昂贵的，而且从长远的观点来看是失败的，即自然服务（natural services）是不可替代的，唤醒了官方对自然环境的重视。1990年，英国伦敦大学环境经济学家 Pearce 和 Turner 在《自然资源和环境经济学》中将经济学生产函数中的资本称为人造资本，进而提出了与之相对应的自然资本（natural capital），虽没有从生态学角度对其做明确的界定，却开启了学术界对于自然资本的研究。1993年，Pearce 和 Warford 在他们的著作《世界无末日：经济学、环境与可持续发展》中提出了用自然资本和另外两种资本来估算可持续发展能力。1995年，世界银行提出的人类社会财富评价体系明确将人类拥有的资本划分为四大类：人造资本、人力资本、自然资本和社会资本，自然资本的概念至此被官方提出。

目前国内外关于自然资本/资产类概念还没有形成一个较为统一的定义。较有影

响力的定义较早见于 Daly（1994）的研究：产生自然服务和有形自然资源流的总储量。国际经济合作与发展组织（OECD）将自然资本定义为自然提供资源和服务的经济价值（Dixon et al., 1995）。联合国环境总署（UNEP）定义自然资本包括土地、矿产和石油、太阳能、水、生物体以及这些要素在生态系统中相互作用所产生的服务（Dickson et al., 2014）。Costanza（1997）等在《Nature》杂志发表的文章《全球生态系统服务与自然资本的价值》在全世界范围内引起了广泛关注，论文引用次数达 1.3 万之多，在我国更被奉为行业必读。该论文指出：“资本通常是存在于某个时点的物质或信息的存量。每种形式的资本存量或单独地或与其他资本存量的服务一起产生一种可用于转化成物质或者物质的空间结构以提高人类福利的服务流”；“人类对这种服务流的利用有可能改变或保留原资本存量的最初形态。资本存量以一种可鉴别的形式存在，最显著的是以物理形态存在，包括自然资本（如树木、矿物质、生态系统、大气等）、人造资本（如机器和建筑物）以及（以身体形式存在的）人力资本（图 2-1）”；“生态系统服务由来自自然资本存量的物质流、能源流和信息流构成，并与人造资本和人力资本一起服务于人类福利”（侯元兆，2010）。

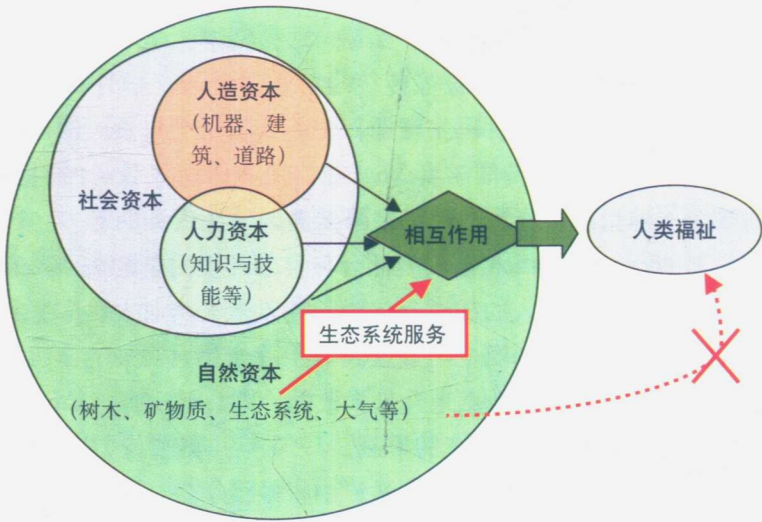


图 2-1 自然及社会资本与生态系统服务的相互关系图（Costanza et al., 2014）

在目前经济社会发展水平上，人们不得不经常在维护自然资本和增加人造资本之间进行取舍。一方面，许多生态经济学家认为，应该认识到生态系统对人类的多重贡献，自然资本和生态系统服务研究采用经济学的手段来干预人类对自然生态系统的开发和利用，能更好地解决自然资源在不同利用目的之间的公平而有效的分配，可以有效地保护现有的自然生态系统（Costanza & Folke 1997；Liu, 2010）。另一方面，在以

市场为主导的经济发展过程中,经济增长理论缺乏对自然资本应有的关注和研究。因此,我们不得不在各种生态系统服务和自然资本的数量和质量组合之间进行选择,在不同的维护和激励政策措施之间进行比较。一旦被迫进行这些选择,我们也就进入了评价过程。以合适的方式评价生态系统服务和自然资本的变动,有助于我们更全面地衡量综合国力,也有助于我们更好地选择提高综合国力的路径。

(二) 生态资产与环境资产

自然资本的概念是相对于人造资本等人类社会的其他资本类型而提出的,而在国际自然资源核算体系中通常采用环境资产 (environmental assets) 和生态系统资产 (ecosystem assets) 等的概念,这里的资本和资产的概念在评估核算中并没有财务会计学意义上的实际区别 (Dickson et al., 2014)。联合国编写的《2012 年环境经济核算体系:中心框架》(UN et al., 2014) 将环境资产定义为地球上自然存在的生物和非生物组分,它们共同构成了人类生存的生物物理环境,并为人类提供福祉。SEEA 的试验性生态系统账户更进一步细化,提出环境资产包括生态系统资产和其他类型的自然资源(如矿物和能源资源等)构成,将生态资产和一般性的自然资源区别开来。其中,生态系统资产包含生物和非生物体以及其他属性集合 (characteristics that function together) 的空间区域 (UN et al., 2014)。该报告还指出,在该试验性生态核算中所指的自然生态类资产和资本并无本质区别。2012 年 UNEP 在《迈向自然资产全球一张图》(Towards a global map of natural capital) 中指出:“自然资本 (natural capital) 包括生态系统资产 (ecosystem assets) (例如淡水) 和自然资源 (natural resource) (例如存积的矿物燃料)”,“这里所说的自然资本与 SEEA 中所指的环境资产意义相同” (Dickson et al., 2014)。

我国在这方面的研究中多采用生态资产的提法,但不同学者对生态资产的定义范畴界定仍有差异,通常指生态系统维持生态过程所需要的各类存量资产的集合,能够衍生出生态系统服务(流量)。黄兴文和陈百明(2003)将生态资产定义为所有者对其实施所有权并且所有者可以从中获得经济利益的生态景观实体,评估对象以涵养水源效益、保护土壤效益、固定二氧化碳和供给氧气效益、有其价值和娱乐价值等生态系统服务为主,也包含了生物生长立地价值。陈曦等(2004)认为生态资产评估包括自然资产估价和生态系统服务价值评估。王建民和王如松(2002)认为生态资产从广义来说是一切生态资源的价值形式,从狭义来说是国家拥有的能以货币计量的,并能带来直接、间接和潜在经济利益的生态经济资源,包括生物资产、基因资产、生态功能资产和生境资产 4 部分。胡聃(2004)认为生态资产是人类或生物与其环境(如生物或非生物环境)相互作用形成的能服务于一定的生态系统经济目标的适应性、进

化性生态实体，它在未来能够产生系统产品或服务。朱文泉等（2011）认为自然资源是一种国家资产，包括有形的自然资源直接价值和隐形的生态系统服务功能。这些定义多数将生态资产界定为生态系统服务或其与生态资源的存量的集合，然而在资产核算过程中已发生的生态系统服务流量与同时间节点的生态资源存量的直接相加很容易造成计算重复。因此多数研究在评估核算自然资本或环境资产这个概念是计算存量资产和折算未来可能发生的生态系统服务流（Dickson et al., 2014）。例如，UNEP 的报告中指出：“存量和流量的区别（如生态系统资产和生态系统服务的区别）是评估的关键。生态系统资产（ecosystem assets）是能够产生生态系统服务流量的存量，生态系统服务和其他资本，如人造资本、人力资本和社会资本共同产生生态系统福祉”（图 2-2）（Dickson et al., 2014）。



图 2-2 生态系统资产与生态系统服务关系（Dickson et al., 2014）

二、生态资源量化

传统的基于调查统计数据的生态资产和自然资源评估有其数据易获取、评估易推广的优势，但难以适应于对生态资产在时间和空间多维尺度上的评估，无法覆盖生态考核、生态补偿的政策制度对于生态资产时间和空间差异性了解的数据需求。

从凸显生态资产的时空特征的角度出发，生物养分、生物和土壤碳、地表和土壤水资源可依靠生态模型和遥感来进行模拟计算。陆地生态系统是一个异常复杂的系统，在土壤、植被、大气等不同圈层之间存在着错综复杂的相互作用（Wang et al., 2011；John, 2013）。在此基础上建立起来的生态过程模型有着完备的理论框架，结构严谨，从机理上对植物的生理过程以及影响因子进行分析和模拟。根据植物生理生态学原理，通过对光合作用过程、植物冠层蒸散以及同光合作用相伴随的植物体及土壤水分散失的过程进行模拟，可以估算在单株尺度、林分尺度和陆地生态系统尺度上，植物的生物量、碳库以及氮库的变化，并能同时模拟各区域生态系统经历了降水、截留、下渗

等水循环过程后产生的地表水量。另外，随着近年来新一代遥感技术的诞生和不断成熟，越来越多的地球表面时空要素可以被有效探测并提取出来，其反演精度也得以日益提高，从而为运用遥感实时有效地监测全球碳储量和碳循环过程以及探测和识别地下水的水量和分布情况（Liu et al., 2011; Richardson et al., 2012; Xiang, et al., 2016），但这类研究仍鲜有应用在生态资产评估中。

野生动物资源的空间分布一直是难以解决的评估障碍。在生物多样性保护研究中，常见的空间分布方法有生态位模拟，用来预测各濒危物种的栖息地适宜度和种群密度的空间分布格局（Vanderwal et al., 2009 ; Torres et al., 2012），但目前仍鲜有将其应用于生态评估的领域中。因此，本节从生态过程模型、遥感模型和生态位模型几个方面简要介绍了相关研究手段的研究进展。

（一）生态过程模型

该类模型一般从更大尺度上考虑碳在大气—植被—土壤中的循环，能够估算生态系统不同部分的碳收支及各类碳库的时空变化特征。从尺度上来讲，此类模型更注重的是在大区域尺度上的模拟。同时，由于其模型假设在单位面积上具有同一性，因此，根据样地的实测资料，同样也可以用于林分尺度的模拟。在模拟的类型上，一般可以兼顾多种生态系统类型，比如不同类型的森林、灌木、草地等。此类模型较成熟的有：Biome-BGC, TEM, LPJ-DGVM, IBIS, CENTURY, CEVSA, PnET, SIB2C, AVIM2, MAPPS 等。

1. Biome-BGC

Biome-BGC（Biome BioGeochemical Cycles）模型是目前世界上应用范围较广，便于本土化修改的生态过程模型。

Biome-BGC 模型的发展历程见图 2-3。H20TRAN 模型是为了模拟生态系统尺度的气孔作用开发的模型，主要关注水分的平衡。在此基础上开发的 DAYTRANS 模型能用于 NPP 和水分的利用效率，并且添加了一个冠层的光合作用模块。随着研究深入，需要建立一个完整的碳循环模型，包括光合作用、维持呼吸和生长呼吸、碳分配、凋落物以及分解模块，这就是后来的 FOREST-BGC。之后，为了满足于遥感信息结合（LAI），并模拟整个生态系统的变化与大尺度上水分的过程，最终建立了 Biome-BGC



图 2-3 Biome-BGC 模型的发展

模型 (Gilmanov et al., 2010; Groenendijk et al., 2011)。

Biome-BGC 模型 (Running 1984; Running & Coughlan, 1988; Running & Hunt 1993; Thorntonand & Law et al., 2002; Hidy et al., 2012) 是一个基于机理的生态系统模型, 用于估算生态系统碳、氮、水循环。当前是 4.2 版本。模型的驱动因子除了温度和降水外, 还包括太阳辐射、日长、饱和水蒸气压差、CO₂ 浓度等气候因子, 经纬度、土壤质地、植被类型等立地条件以及生理生态等参数。模型中涉及的碳、氮、水变量一共有 489 个, 都可以用于输出。常用的日变量共 23 个, 主要包括水循环模块的土壤水、冠层及土壤水蒸散, 陆地生态系统的碳通量 (GPP、NPP、NEP、NEE), 呼吸 (维持呼吸、生长呼吸、异氧呼吸), 碳库 (植物、凋落物、土壤以及总碳库), 火灾损失以及净光合。年输出变量有年降水量、平均温度、最大叶面积指数、年蒸散量、年径流量、年 NPP 以及 NEP。该模型主要过程包括物候期的计算、光合作用、自养与异养呼吸、蒸发蒸腾、凋落物与土壤的分解、产物分配、水分循环 (降雨、融雪与径流) 等 (图 2-4)。

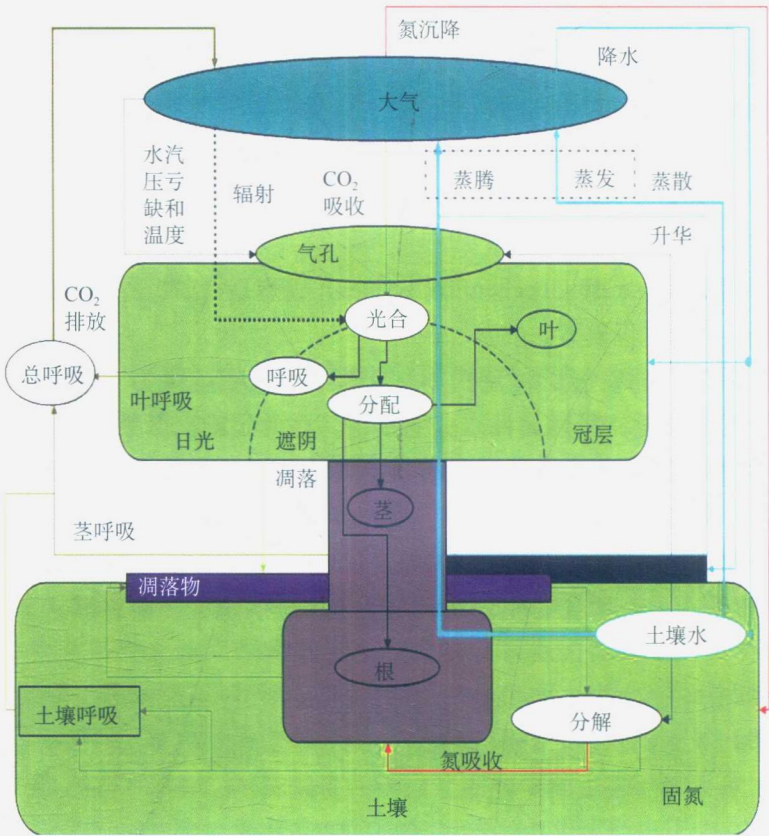


图 2-4 Biome-BGC 模型结构

2. TEM

TEM (Raich et al., 1991 ; McGuire et al., 1992; 1993) 也是一个很有影响力的陆地生态系统模型。TEM 是一个高度集合的, 模拟陆地生态系统碳、氮循环的模型, 也是最早实现对全球陆地生态系统碳收支估算的生物地球化学模型, 多被应用于全球非湿地生态系统的植被和土壤的碳、氮循环模拟。基于独立的空间栅格数据分析, 模型的栅格分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度)。TEM 模型适用于研究陆地或全球生态系统与环境因子的相互关系, 最大的时间步长为 1 个月。至少需要如下一组环境变量以驱动这一模型: 植被类型、土壤质地、土壤湿度、潜在或实际蒸散率、太阳辐射、云量、降水、温度和大气二氧化碳浓度。这些变量调控植被—土壤之间的碳、氮流动, 因此也影响不同组分的碳与氮物质。土壤湿度和蒸散率采用全球数据集 (气温、海拔高度、降水、土壤质地、植被类型), 按 Vorosmarty et al., (1989) 的水分平衡模型计算。

所有环境变量利用 GIS 数据库管理。假定研究对象是稳定而成熟的生态系统, 并在模型调试的年度间隔期间状态变量保持稳定, 而在 1 年内不同的月份随着气候因子的季节性变化, 状态变量随之发生变化。调试的时间范围为 100 年。TEM 模型中碳、氮循环与环境驱动变量的特定关系是以研究站点数据为基础, 并按同一植被和土壤类型拓展到整个大尺度空间范围。Raich et al., (1991) 首先把 TEM 模型应用于南美洲地区的潜在净第一性生产力研究, 其结果与 Miami 模型接近。McGuire 等 (1993) 通过输入全世界 18 种植被类型分布图, 应用这一模型估算了全球净第一生产力格局和土壤氮循环。

3. LPJ-DGVM

LPJ-DGVM (the Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model) 模型 (Sitch et al., 2003) 从 Biome 系列模型发展而来。它是一个中等复杂度的全球动态植被模型, 也是应用最为广泛的动态植被模型之一, 该模型的时间分辨率是天。LPJ-DGVM 模型的发展是一个不断完善的过程, 考虑不同植物类型之间的竞争, 火灾, 冻土等因素, 用于模拟短期内植被与气候 (比如: 水、光、温度、土壤类型以及空气二氧化碳浓度) 之间的响应。该模型用于计算全球尺度上的植被类型, 结构, 植被的状态, 凋落物和土壤碳库, 蒸散, 径流, 光吸收以及季节变化等。

4. IBIS

IBIS (Integrated Biosphere Simulator) (Foley et al., 1996 ; Kucharik et al., 2000) 是威斯康辛大学全球环境和可持续发展研究中心开发的一个动态植被模型。该模型的时间分辨率是小时。IBIS 最初由 Forley 等在 1996 年提出, IBIS 模型中地表过程模型主要继承自 LSX 模型。Kucharik 等在 2000 年的时候提出了 IBIS2, 改进了 IBIS 对地表物理、植被生理、冠层物候、植被功能型和碳分配的描述, 还增加了一个地下生物化学

子模型,这个子模型可以模拟碳在植被、土壤和腐殖质之间的流动。IBIS 模型中区分了 12 种植被功能型,对自然干扰也进行了模拟,其过程相对简单,只用了一个给定的干扰系数来计算干扰导致的植被死亡量。Agro2IBIS 模型是对 IBIS 的进一步发展,该模型中不仅模拟了自然植被,而且模拟了玉米、大豆和小麦等作物。与 LPJ-DGVM 相比,IBIS 中引入了独立的氮循环模块,增强了对氮循环的模拟。

(二) 遥感模型

近年来,随着遥感逐步从定性化迈向定量化,尤其是随着新一代遥感技术的诞生和不断成熟,越来越多的地球表面时空要素可以被有效探测并提取出来,其反演精度也得以日益提高,从而为运用遥感实时有效地监测全球生产力、水资源量等奠定牢固的技术基础。利用多角度遥感,可以提高对植被冠层光合有效辐射、植被净初级生产力、植被蒸散和水分平衡、冠层能量分布等要素的估算精度。利用雷达遥感,可以全天时、全天候地监测植被冠层物理结构特征、水分含量和地表粗糙度。利用成像光谱遥感可以较准确地调查地表生物化学组成成分,推演植被冠层碳、氮含量和土壤有机质含量。上述遥感技术,以及相关的信息提取方法,结合高精度的遥感数据预处理技术,将会大幅度地提高地表生态系统碳储量和碳循环观测及过程研究的定量遥感作用及其精度,也为基于各类遥感产品的遥感模型的建立提供了坚实基础。通过遥感计算光能利用率,进而估算净初级生产力(NPP),通过耦合土壤碳分解模型计算异氧呼吸,最终得到生态系统净生产力(NEP)。该类模型比较成熟的有:CASA、GIO-PEM、VPM等。

1. CASA 模型

CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型(Potter et al., 1993)是基于光能利用率(LUE)的过程模型,用于全球以及区域尺度的净初级生产力的估算。其中,遥感提供了叶绿素所吸收的光合有效辐射比例(FPAR)、反照度以及各种植被指数等重要的模型输入参数。CASA 模型中,陆地植被净初级生产力主要由植被所吸收的光合有效辐射(APAR)与光能利用率(ε)两个变量来确定。计算公式为:

$$NPP=APAR_{x,t} \times \varepsilon(x,t) \quad (2-1)$$

公式(2-1)中: t 代表时间; x 表示空间位置。CASA 模型借助于遥感技术来获取 FPAR,以得到植被吸收的 APAR(光合有效辐射的通量密度 PAR 中被植物吸收的那部分辐射能),进而估算 NPP。模型中的参数 ε 随时间 t 和地点 x 而变化,并受温度和水分因子的调控。植物吸收的 APAR 可通过遥感技术获得,因此基于 APAR 的参数模型很受重视。光能利用率模型中,光能转化率 ε 对于 NPP 的估算是十分关键的,CASA 模型中通过温度和土壤水分的可利用性来调节 ε 值,允许在群区内、季节间 ε 存在

变化,且不限定具体生态系统的 ε 。CASA 模型作为光能利用率模型的代表,是目前全球 NPP 估算研究中应用较多的模型。

2. GIO-PEM

美国马里兰大学地理系开发的 GIO-PEM (Global Production Efficiency Model) 模型 (Prince & Goward, 1995), 全部利用卫星数据测定 APAR 以及影响 APAR 利用效率的环境变量。GIO-PEM 试图摆脱地面资料遥感化的束缚, 尝试用遥感数据获取和代替所有的模型输入参数, 以实现 NPP 模型的全遥感化, 为以后 NPP 模型的发展及植被 NPP 的估计提供了一种全新的方法。

$$NPP = \sum_i [(S_i \times N_i) \varepsilon_g - R] \quad (2-2)$$

公式 (2-2) 中: t 代表时间; S_i 为 t 时刻入射的 PAR; N_i 为 t 时刻的 FPAR; ε_g 为光能利用率; R 为植物的自养呼吸, 利用气孔导度对环境的响应函数进行调整。

3. VPM

VPM 光能利用模型 (Vegetation Photosynthesis Model) (Xiao et al., 2004), 用于模拟常绿针叶林 GPP 的季节变化。将植被的总初级生产力 G 表达为光能利用效率、PAR 以及 FPAR 的乘积, 即:

$$GPP = \varepsilon_g \times FPAR \times PAR \quad (2-3)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_s \times W_s \times P_s \quad (2-4)$$

公式中 (2-3) 和 (2-4) 中: GPP 为总初级生产力; ε_g 为将吸收的光合有效辐射转换成碳的效率 (即光能利用效率); ε_0 表示表观量子效率或最大光能利用效率; T_s 、 W_s 和 P_s 分别是温度、水分和叶片生长对光能利用效率的限制因子。该模型需要的输入包括增强型植被指数 (EVI)、地表水分指数 (LSWI)、气温和 PAR。在模型中假设 FPAR 为 EVI 的线性函数, 并且将比例系数 a 设置成 1, EVI 指数可以通过红外波段、近红外波段和蓝波段反射率计算。模型中建立了光能利用效率与温度、水分和物候等影响函数的关系。在其他光能利用率模型中, 水分影响通常被表示为土壤水分和水汽压差的函数, 而在 VPM 模型中, 使用地表水分指数 (LSWI) 进行替代。物候影响主要表征为在冠层尺度上叶片生长对绿色植物光合的影响, 按两阶段表述, 分别为萌叶期和盛叶期。VPM 模型已被广泛应用于高山草甸、热带常绿林、农田生态系统、落叶阔叶林和温带草原的生产力模拟中。影响 VPM 模型模拟效果的主要因素有两个: 一是最大光合利用效率的估算, 另一个是光合有效辐射的吸收比例。目前前者的估算存在的问题较多, 与实际情况存在差异, 完善其算法是十分迫切和重要的。

（三）生态位模型

生态位模型是模拟野生动物适宜分布区的最佳选择，对于了解和掌握珍稀濒危野生动物资源及其价值的空间分布情况有重要的帮助。

1. MaxEnt

1957 年，Jaynes 提出了最大熵理论，该理论在生物生态学中描述为：一个物种在没有外界约束的情况下，会尽最大的可能去扩散和蔓延，最终接近均匀分布。MaxEnt (Maximum Entropy) 模型是 Steven Philips 等人在最大熵理论的基础上，利用 JAVA 语言编写实现的物种潜在地理分布预测软件。

MaxEnt 是一种生态位模型，是基于为已知分布因素找到一个满足最大熵的概率分布。根据每种物种已知的分布区，利用数学模型归纳或模拟其生态位需求，推测该物种在目标地区的适宜度空间分布。该模型需要知道物种已有的分布以及环境数据。MaxEnt 模型的环境数据采用了 IPCC5 所采用的最新气象数据生成的 19 个生物气候因子变量 (bioclimatic variable)，数据空间分辨率为 1 平方千米。为了避免变量之间自相关，首先采用主成分分析法，选取贡献较大的 3 个主成分作为最后输入模型的变量。由于濒危物种的分布还受其他环境因子的限制，输入模型的变量还包括坡度、坡向、距河流或湖泊的距离、距公路和村庄的距离。随机采样模拟训练和验证模型，得到青海各主要濒危物种的栖息地适宜度空间分布格局。软件可以自动生成 ROC 曲线 (receiver operator characteristic curve)，通过 AUC (area under curve, ROC 曲线下面积) 对预测结果的好坏进行判断。

2. Bioclim

1986 年，Nix 和 Busby 建立了 Bioclim 模型。Bioclim 是基于范围的模型，常用于物种分布模型和预测的框架模型。Bioclim 模型的原理，是根据物种已知的分布区或有关物种生长的一些参数，产生一系列具有生物学意义的并且能够描述分布区的气候参数，得到的这些气候参数称为生物气候文件，或生物气候包络 (邵慧等，2009)。每一个包络中的因子范围由已知分布地点中的极值构成。将所研究地区中的每一个栅格的气候变量与生物气候包络的变量进行比较，如果这个地区的所有气候变量都落在物种的生物气候包络之内，那么这个地方就可以被认为是适合物种生存的地方。一般情况下，根据 0 ~ 100% 和 5% ~ 95% 两个水平确定物种的边缘生物气候包络和核心生物气候包络 (Carpenter et al., 1993)。Bioclim 模型开发时间比较早，具有算法简单、易于操作、通用性好等优点，因此 Bioclim 模型自建立至今被广泛用于预测物种分布和研究环境因子对物种分布的影响的研究领域。

3. GARP

基于遗传算法的规则集合预测模型 (The Genetic Algorithm for Rule-Set Production,

GARP) 由 David Stocwell 创建, 是一种基于局部环境空间建模的计算方法。它根据物种的已知分布数据和与物种生存、发展密切相关的环境数据产生不同组合的模型, 来反复运行判断物种的生态需求, 产生不同规则的集合, 然后总结物种的生态需求, 预测物种潜在分布的方法。遗传算法的原理是首先对原始数据进行编码生成一个初始集合, 集合中的每个个体被模拟为一条染色体, 不断地通过复制、交换、选择、交叉等过程, 当迭代达到设定条件时最终会收敛到最优群体。GARP 的运算过程是先从待选的逻辑斯蒂回归和生物气候包络两种规则中选择一种规则, 利用输入的训练数据生成一个模型, 然后在模型创建过程中根据预测精确度的变化, 来判断一个规则是否应该包括在模型中 (刘欣, 2012)。这个算法可以反复运行最高次数达 1000 次或者按结果的收敛终止, 最终生成一个由不同规则共同组成的模型, 将形成的最终模型投影到地理平面图上, 获得所需要的数字地图 (王瑞, 2006)。

三、国内外评估实践

(一) SEEA

1. SEEA 的起源和发展

GDP 长期以来一直是世界范围内公用的衡量国家或地区经济发展状况的最主要指标。它不但能够综合描述一个国家或地区的经济总量、整体经济规模、生产总能力, 还能反映当年新增财富的总量。以 GDP 为基础, 联合国统计署发布了一套国民经济核算体系 (SNA)。这套体系能够以全球通用的方式在市场经济体制下测算一定时期内一个国家或地区的经济发展过程和总量, 被誉为是 20 世纪最重要的经济科学成果之一。然而 SNA 无论在理论和方法上都存在着诸多不足。首先, SNA 只核算经济过程对自然资源的开采成本而忽略了资源消耗价值和环境成本, 因而低估了经济过程的投入价值, 高估了当期经济生产过程的新创造的国内生产总值或净值。其后果是, 人们在得到过高估计的产值或收入的同时, 却暂时或永久失去了人类世代相传的共同财富。第二, SNA 的核算范围仅局限于市场活动以及与市场的联系, 不包括不符合经济资产定义的非生产性生态环境资源, 使得绝大多数没有直接价值却在生态系统中起到关键作用的自然资源无法参与核算。第三, 将利用、消耗和影响生态环境资源的活动纳入了 GDP 增长中, 过高估计了生产成果、投资、消费能力而容易导致决策者以发展经济的名义而忽略对环境的保护, 甚至不惜毁坏自然资源与环境 (周龙, 2010)。

随着生态环境的恶化和人类环保意识的提升, “国民经济核算应该考虑资源环境因素” (联合国, 1993) 的思路日益清晰。20 世纪 80 年代, SNA 展开了新一期修订工作, 经过有关专家认真探索和研究, 提出了国民经济核算附属账户——综合环境经济核算账