

项目资助：国家自然科学基金资助（51074154）

江苏高校优势学科建设工程项目

基于遥感的煤矿区 生态环境扰动的监测与评价

MONITORING AND EVALUATION OF ECOLOGICAL ENVIRONMENT DISTURBANCE
IN COAL MINE BASED ON REMOTE SENSING TECHNOLOGY

侯湖平 张绍良 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

项目资助:国家自然科学基金资助(51074154)

江苏高校优势学科建设工程项目

基于遥感的煤矿区生态环境扰动的监测与评价

侯湖平 张绍良 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

矿产资源开采导致矿区生态环境破坏,威胁到矿区生态安全和可持续发展,为此,协调矿产资源开采与生态环境保护两者之间的矛盾对促进矿产资源开发具有重要意义。本研究从矿区生态系统扰动因素、扰动特征、扰动形式,分析矿区生态系统扰动的表现现象。然后,引入植被净初级生产力(NPP)生态学指标作为煤炭开采导致的矿区生态环境影响的监测指标,采用实验方法、RS方法、GIS方法,通过改进的遥感和植物生理生态原理的NPP测算模型,分析和评价研究区域矿区生态环境的变化特征,采矿活动对矿区生态环境的影响特征。最后,提出建立基于NPP矿区生态扰动监测与评价系统,并提出生态扰动监测系统的应用和建议,为更多学者进一步研究矿区生态环境问题提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于遥感的煤矿区生态环境扰动的监测与评价 / 侯湖平,张绍良著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.10
ISBN 978 - 7 - 5646 - 2118 - 6

I. ①基… II. ①侯…②张… III. ①遥感技术—应用—煤矿—矿区环境保护—研究 IV. ①X322—39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第257239号

书 名 基于遥感的煤矿区生态环境扰动的监测与评价
著 者 侯湖平 张绍良
责任编辑 褚建萍
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 12 字数 230 千字
版次印次 2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷
定 价 45.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

矿产资源开采是国民经济发展的基础产业,对国民经济发展具有不可替代作用,然而资源开采促进社会经济发展的同时,对矿区的生态环境造成破坏,威胁到矿区生态安全和社会的可持续发展。生态环境影响已经成为矿区开采活动中面临的重要问题,在我国的许多矿区已变得突出,如地表塌陷、地表裂缝、地表积水、滑坡、土地质量降低、生物种类的变化、人地矛盾显化等,这一系列生态环境问题,引起人们对矿区资源开采模式的思考,如“无限制开采”、“先开采后治理”、“有限资源开采”、“绿色开采”等。只顾开矿不管环保或只顾环保而限制开矿对矿区经济的可持续发展都是不利的。随着科学技术的进步,矿产资源开采与生态环境保护二者之间的矛盾是可以协调统一的。

矿区开采活动对矿区生态环境的扰动较大,并且在不同空间尺度上有不同的影响,且这些影响的持续时间各不相同。目前,缺乏较为完善和统一的生态影响分析手段与方法,很难统一、客观、准确地分析开采活动过程中产生的中长期生态影响及矿区生态环境变化与开采活动之间的关系。这极大地影响了矿区生态修复与环境治理决策。因此,目前,学者针对矿区生态环境不同角度进行研究,如矿区生态环境监测、矿区生态环境质量评价、矿区生态风险、矿区生态系统健康、生态服务价值等;评价方法、评价手段多样,但不同矿区之间的评价结果缺乏比较,限制了矿区生态环境动态监测和评价工作的开展。因此,有必要寻求新方法、新技术、新思路,应用于矿区开采过程中生态环境的监测和评价,以及基于此的生态恢复和生态建设,准确及时地掌握资源与环境变化状况,进而指导人们开发利用矿产资源、保护生态环境。

本研究从分析影响矿区生态系统变化的本质因素入手,矿区开采过程中土地覆盖类型发生变化,区域微气候、水文、植被、生物地球化学循环及生物多样性等均发生改变,必然影响植被群落特征,成为采矿活动对矿区生态环境的响应现象,基于此,本书试图引入植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)这一生态学指标作为煤炭开采导致的矿区生态环境影响的监测和评价指标。NPP是生态系统中物质与能量运转的直接反映,揭示了植物群落在自然环境条件下的生产能量。本书首先以植被净初级生产力指标为基础,从矿区生态系统

扰动因素、扰动特征、扰动形式,分析矿区生态系统扰动的表现现象。其次,根据矿区生态扰动监测的目标、内容,将植被净初级生产力(NPP)作为矿区生态扰动监测的指标,对其可行性和合理性进行分析。基于遥感和植物生理生态的原理,提出小区域范围 NPP 测算的遥感模型——改进的 CASA 模型。然后,建立基于 NPP 的矿区生态扰动监测与评价体系,采用实验技术、RS 技术、GIS 技术来提取矿区生态扰动的生态信息,通过改进的 CASA 模型来评价矿区 NPP。最后,提出建立基于 NPP 矿区生态扰动监测与评价系统,并提出该生态扰动监测系统的应用和建议。

利用“3S”技术进行矿区生态系统扰动的监测与评价是目前矿区生态环境治理的手段之一。矿区作为一种特殊的人类活动区域,具有生态系统破坏的累加性、时空性、社会性等,对于破坏的生态环境,若不能及时得到有效治理,将给相应区域带来水土流失、耕地丧失、荒漠化、石漠化等严重的生态问题。因此快速加强矿区生态环境的监测、评价,为矿区生态环境治理、生态环境修复提供基础信息,有效改善矿区生态环境具有重大意义。为此,本书提出了矿区生态环境监测、评价的思路、方法,为更多学者进一步研究矿区生态环境问题提供参考。

本书写作期间,汪应宏教授、杜培军教授、常江教授、丁忠义副教授、赵银娣副教授和夏俊士博士等提出了很好的建议,徐州市气象局、徐州市环保局和徐州市矿务集团等单位提供了宝贵的资料,同时得到了国家自然科学基金(51074154)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0805)和江苏高校优势学科建设工程(测绘科学与技术)项目等的资助,在此一并表示感谢。

作 者

2012 年 8 月 23 日

目 录

1 绪论	1
1.1 煤矿区生态环境的研究背景	1
1.2 相关问题的研究进展	3
1.3 煤矿区生态扰动监测与评价的研究内容	13
1.4 研究方法和技术路线	15
2 矿区生态扰动现象及其响应机理	17
2.1 矿区生态系统	17
2.2 矿区生态系统扰动内涵	24
2.3 矿区生态系统扰动因素及形式	26
2.4 生态因素对采矿扰动的响应机理	32
2.5 本章小结	47
3 基于 NPP 的矿区生态扰动监测指标和技术	48
3.1 矿区生态扰动监测意义	48
3.2 矿区生态扰动监测内涵	49
3.3 矿区生态扰动监测目标与特点	50
3.4 矿区生态扰动监测内容	52
3.5 矿区生态扰动监测指标	53
3.6 矿区 NPP 的监测内容	58
3.7 矿区生态扰动监测技术	63
3.8 本章小结	66
4 基于 RS 的矿区 NPP 变化评价模型的建立	67
4.1 改进的 CASA 模型建立	67
4.2 矿区 NPP 变化的评价模型建立	74
4.3 模型结果验证	77

4.4	本章小结	78
5	基于 NPP 的矿区生态扰动监测与评价	80
5.1	矿区生态扰动监测与评价步骤	80
5.2	研究区域概况	81
5.3	数据获取与处理	84
5.4	矿区生态扰动评价模型的测算与验证	104
5.5	本章小结	109
6	基于 NPP 的矿区生态扰动评价结果分析	110
6.1	矿区 NPP 变化分析	110
6.2	矿区 NPP 变化的影响因素量化分析	126
6.3	本章小结	137
7	基于 NPP 矿区生态扰动监测系统的构建	138
7.1	矿区生态扰动监测系统构建目标	139
7.2	矿区生态扰动监测系统构建	139
7.3	矿区生态扰动监测体系的应用及建议	148
7.4	本章小结	149
8	结论与展望	150
8.1	主要结论	150
8.2	主要创新点	152
8.3	未来工作展望	153
	参考文献	154

1 绪 论

1.1 煤矿区生态环境的研究背景

1.1.1 煤矿区生态环境问题的提出

矿产资源开采是国民经济发展的基础产业,在一定的时间空间内对国民经济的发展具有不可替代的作用。然而,矿产资源开采在促进社会经济发展的同时,必然与矿区生态环境产生一定的矛盾,致使矿区内其他资源环境遭受破坏,威胁到矿区生态安全和社会的可持续发展。

生态环境影响已经成为矿区开采活动中面临的重要问题,在我国的许多矿区已变得突出,如景观格局变化、植被生产力退化、物种多样性丧失、人地矛盾显化等。这一系列生态环境问题,引起人们对矿区资源开采模式的思考,如“ unlimited 开采”、“先开采后治理”、“有限资源开采”、“绿色开采”等。只顾开矿不管环保或只顾环保而限制开矿对矿区经济的可持续发展都是不利的,大量的资料分析表明,随着科学技术的进步,矿产资源开采与生态环境保护二者之间的矛盾是可以协调统一的^[1]。

生态环境是衡量社会经济可持续发展水平的因素。生态环境监测评价是生态环境预警的基础,也是制定国民经济发展和规划的重要依据;而对其进行定量、客观和系统的评价,是决定矿区可持续发展和最大限度减少影响的先决条件。

矿区开采活动对区域生态环境的扰动较大,并且在不同空间尺度上有不同的影响,且这些影响的持续时间各不相同。目前,缺乏较为完善和统一的生态影响分析手段与方法,很难统一、客观、准确地分析开采活动过程中产生的中长期生态影响及矿区生态环境变化与开采活动之间的关系^[2]。这极大地影响了矿区生态修复与环境治理决策,因此研究矿区生态环境变化并进行长期监测是一项重要而必须进行的工作。

针对矿区生态环境方面开展研究的角度也很多,如矿区生态环境监测、矿区

生态环境质量评价、矿区生态风险、矿区生态系统健康、生态服务价值等;评价方法主要通过建立相应的评价指标体系进行监测与评价,包括生态足迹、生态承载力等方法^[3-8]。但这些方法对矿区生态环境的动态监测与评价都有很大局限性。因此,有必要寻求新方法、新技术、新思路,应用于矿区开采过程中生态环境的监测和评价,以及基于此的生态恢复和生态建设,准确及时地掌握资源与环境变化状况,进而指导人们开发利用矿产资源、保护生态环境。

基于此,本书试图引入植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)这一生态学指标作为煤炭开采导致的矿区生态环境影响的监测和评价指标。NPP 是生态系统中物质与能量运转的直接反映,揭示了植物群落在自然环境条件下的生产能量^[9,10]。它能作为一个共性指标,来反映采矿对矿区生态系统变化的程度,是分析生态系统结构与功能协调性及其与环境相互作用的重要指标,而且直接与全球变化的关键科学问题——碳循环、水循环与食物安全密切相关^[11-14]。

矿区开采过程中,土地覆盖类型发生变化,区域微气候、水文、植被、生物地球化学循环及生物多样性等均发生改变,必然影响植被群落特征,成为采矿活动对矿区生态环境的响应^[15-18];而 NPP 与植被本身生物学特性及降水、温度等区域环境因素密切相关,能够以统一的尺度标准来衡量矿产资源开发过程对地表植被的影响程度,并直接反映植被群落在自然环境条件下的生产能力,表征矿区生态系统运行质量状况。

1.1.2 煤矿区生态环境的研究意义

(1) 社会经济可持续发展的要求

煤炭是我国的第一能源,煤炭生产直接关系到我国能源供应状况(见图 1-1),影响着国民经济的健康发展。我国煤炭 95% 依靠井工开采,煤炭资源的产量和消费量的比例以及煤炭在一次能源中的比重继续上涨。由于经济利益驱使,在矿产资源的采、选、冶等过程中产生的废气、废水、废渣,对矿山及周围的水、土、气及植被造成了严重的污染甚至是破坏,煤炭开采与生态环境之间长期处于失衡状态,造成矿区生态环境严重退化,已经引起了政府有关部门的高度重视。而目前矿区生态监测工作开展相当少,一定程度上增加了政府科学决策的难度。因此,开展矿区的生态扰动监测是保证我国煤矿资源和经济可持续发展的必然要求。

(2) 矿区生态修复与环境治理的技术要求

矿区生态监测是一个长期的全方位、多角度的动态过程,传统的实地调查、取样分析测试、统计分析等方法难以满足要求,需要将传统的环境监测技术与现

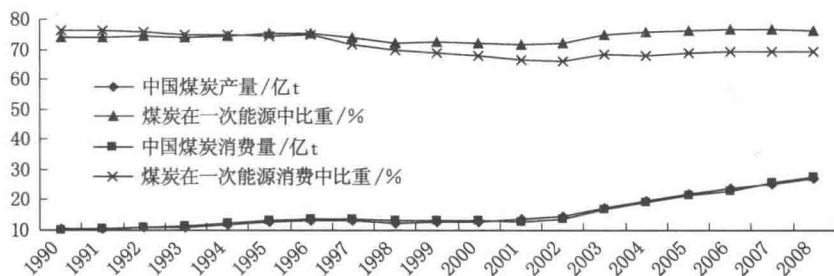


图 1-1 中国煤炭能源利用状况

代空间信息技术相结合,必须采用遥感、全球定位系统和地理信息系统(RS、GPS和GIS)等高新技术。通过新技术的应用,可有效减少对生态环境要素调查的人力、物力,能够高效、动态、综合地采集矿区的生态环境信息^[19],并进行矿区空间多种生态环境与采矿扰动信息的加工、处理及分析,为矿产资源的合理开采和矿区生态环境的综合治理等提供技术支持。

(3) 矿区生态环境科学研究的要求

尽管国家和政府对我国煤炭资源在开采过程中所造成的生态环境的破坏采取了土地复垦、生态修复等相关措施,但煤炭资源开采的速度远远大于复垦整治的速度。据有关部门公布的资料表明,全国工矿业发展导致的土地与生态退化的面积达 700 万 hm^2 ,复垦率不足 15%,目前仍以每年 4 万 hm^2 的速度在增加^[20]。由于我国是一个发展中国家,历史遗留的矿区生态环境问题和近年对矿产资源的需求保持持续增长态势,生态环境日趋恶化。如何在满足经济发展和矿产资源需求的情况下,避免或减轻矿区生态环境破坏是一个亟待解决的科学问题,而开展矿区生态环境监测与管理研究,尤其是加强矿区生态环境质量的综合变化监测研究,量化生态环境质量变化,是其中一个重要的课题。矿区环境研究要求提供准确、科学的基础数据和有效指标,这离不开对矿区生态系统的动态监测和评估。

1.2 相关问题的研究进展

1.2.1 煤炭开采对土壤和植被扰动研究进展

煤炭开采过程中对土壤和植被扰动明显。煤炭开采对土壤的扰动包括对土壤中理化性质的影响、土壤形态的变化、重金属污染等。对土壤理化性质方面,朱宗泽以潞安矿业集团的王庄煤矿为例研究了采煤塌陷区土壤成分的变化,认

为土壤养分有从沉陷地顶部向底部汇集的趋势,沉陷 3 年的沉陷地顶部和底部的土壤养分差别较大,而沉陷 6 年的沉陷地顶部和底部土壤养分差别不大;卜正富对神东矿区采矿对土壤含水率影响及导致含水率变化的研究表明:对于浅层土壤平均含水率为预采区、采动区、采空区,而且深层土壤和浅层土壤含水率不同;Kostas Komnitsas 等人针对海州露天煤矿的土壤中的相关指标进行了测定和比较,结果表明不同的营养物质表现出不同的空间分布, NH_4^+-N 呈现出较强的空间依赖性和金块效应。对土壤重金属污染,白建峰等研究了煤矸石堆积对矿区土壤重金属的影响,发现煤矸石长期风化、淋溶已导致其堆边土壤中重金属发生累积性污染,不同矿井区土壤中重金属含量呈现随煤矸石堆积和风化时间长短呈递减趋势,煤矸石中重金属向周围土壤的迁移是一个缓慢过程;Mohammad 和 Bhuiyan 等人通过对孟加拉国北部煤炭开采对农业生产产生的重金属污染的研究发现,采矿活动是农田重金属污染的最主要来源。煤炭开采对植被的扰动包括对地表形态的变化,李海江研究永夏矿区开采对地表形态的变化,沉陷水域的形成对植物生长发育产生直接的影响,如地表形态的变化改变了地表径流,从而引起水土流失、土壤侵蚀和沉陷水域的形成,并极易导致土壤盐渍化。对地表植被状况的影响,夏尚光对淮北市矿区的植被受损状况和植被恢复状况进行了调查,结果表明,造成淮北生态破坏总面积中,林地破坏面积占 20%,煤矿开采是造成林地破坏的主要原因;廖程浩等在矿区研究发现,煤矿开采区周边的植被受到了明显的影响。其主要表现为严重毁坏草林植被,植被指数随着矿区距离的增大而增加,增大的幅度与距离呈现对数曲线关系,并在 400~500 m 的距离开始趋于稳定。而且植被物种的多样性和均匀度在时间维的积累上呈现退化现象;王力等将煤炭开采对植被影响分为直接性和间接性两种。因为煤炭的开采,造成开采区域的地表沉陷、裂隙等物理变化,对植被形成直接性破坏,如裂隙造成的植被根系被扯断等。这种物理性破坏是直接性的。除此以外,还有其他间接因素影响矿区植被,其中最典型的就是地下水。地下水资源是支撑矿区生态环境可持续发展的重要因子。张思锋等发现从 2004 年到 2008 年,神木县煤炭开采受损植被面积以每年 13.69% 的速度递增。

综上所述,国内外对采矿对矿区生态的某一要素的影响研究比较多,但对生态环境的综合影响研究至今未见报道。

1.2.2 生态恢复研究进展

生态恢复(ecological restoration)是指利用自然的自我恢复能力,在适当的人工措施辅助下,恢复生态系统的生态功能和经济功能^[21]。国际上,矿山生态环境控制与恢复最早开始于德国和美国等欧美发达国家,美国早在 1920 年《矿

山租赁法》中就明确要求保护土地和自然环境^[22]。德国从 20 世纪 20 年代开始在废弃地上植树以恢复植被和保护环境^[22]。在 20 世纪 50 年代末,生态恢复研究进入科学恢复治理时代,70 年代后逐步形成比较完整的法律体系和管理体系,80 年代以后,在矿区重建中引入了景观生态学理论。1975 年 3 月,“受损生态系统的恢复”国际会议召开,对受损生态系统的恢复和重建、生态恢复过程中的原理、概念和特征等许多重要的生态学问题进行了讨论。Cairns 等在 1980 发表的 *The Recovery Process in Damaged Ecosystems*^[23]、Jordan 等在 1987 年发表的 *A Synthetic Approach to Ecological Research*^[24] 及 1992 年创刊的《恢复生态学杂志》,从不同角度研究和探讨了受损生态系统恢复过程中重要的生态学理论和应用问题^[25];实践活动主要在世界采煤国开展,英国较早地开始把露天煤矿废弃地恢复为高产的农业和林业用地^[26],德国把采煤废弃地成功恢复为新的景观^[27],表明煤炭工业和环境保护并不是根本对立的。

国内的生态恢复研究比较晚,在 20 世纪 50 年代开始自发进行了一些恢复治理工作。以《土地复垦规定》颁布前后作为划分标志,《土地复垦规定》前,研究主要以介绍和引用国外生态恢复研究和经验为主,主要译著有《露天矿土地复垦》和《矿区造地复田中的矿山测量工作》等,逐步开展一些工程试验如“煤矿塌陷地造地复田综合治理研究”^[28],但是总体上,零星、分散、小规模、低水平。不过,这一时期的理论和实践为 1988 年《土地复垦规定》的颁布和实施奠定了基础。《土地复垦规定》颁布后,我国的生态恢复取得了一系列的理论研究成果^[29]。① 矿区生态修复评价的理论与方法。如结合矿区土地利用现状、植被状况和水土流失情况的现场调查,研究矿区生态环境的主要影响因子^[30];采用定量评价方法对植物生长状况、土壤物理性质、养分状况、重金属含量进行综合研究,分析其影响特征、迁移特征,探求不同的破坏模式、不同阶段矿区生态修复方案^[31-37];运用层次分析法对资源枯竭型矿区进行生态环境损害评价^[38];根据工业生态学原理和循环经济理论,开展塌陷地生态工业园区条件分析^[39]。② 矿区生态规划的理论和方法。如按照矿井开发建设期、开发期、封矿期进行预防性和治理性恢复规划设计^[40,41];针对湿地修复的目的,运用生态设计理念对人工湿地进行适应性规划设计^[42]。针对在工程建设过程中造成的废弃地,进行景观再造规划设计,实现废弃地再利用^[43];使用粉煤灰等固体废弃物配置人工土壤进行基质改良的基础上,与乔灌种植相结合,进行陡坡排岩场坡规划设计^[44];在废弃地恢复为绿地和开放空间过程中,以调节生命支持服务功能、生产性服务功能、文化服务功能等内容进行规划^[45]。③ 矿区生态的修复模式。如在矿区自然资源条件的基础上,培育和发展生态农业发展模式、生态工业园区模式、生态旅游模式等修复模式^[46,47];根据生态修复的不同层次和阶段,自上而下

串联成一个相互独立而又彼此联系的“点、线、面、立体”的多层次生态修复模式^[48]；基于生态补偿原理，以“矿、城、乡”的协调共赢和持续发展为宗旨，建立不同功能修复区，实行“宜农则农、宜林则林、宜渔则渔、宜建则建”的多层次、多元性开发的修复模式^[49]；划分采煤沉陷区功能，提出沉陷区间及与河道沟通连接，建立以蓄水为主和湿地、景观等多种功能的修复模式^[50]；资源枯竭型矿区生态修复采用景观结构修复、生态过程修复、生态服务功能修复、人文生态修复和生态经济修复以及社会经济修复等多方面、全方位的生态修复模式^[51]。④ 矿区生态修复技术及措施等。如选择或组合植物提取、植物挥发、植物固定和植物促进等降低土地污染水平的修复技术^[52-55]；根据土壤动物的生态功能、对土壤肥力的影响等方面，探讨土壤动物修复技术^[56,58]；探讨利用微生物技术恢复受干扰的矿山生态系统^[59]；针对不同生态恢复阶段的植被进行原位土壤根系抗拉力学实验，研究生态系统抵抗土体滑动能力的修复技术^[60]；从矿山开采的环境特征、生态环境影响等角度，提出景观协调再造、充填采矿工艺等系列生态修复技术^[61]。基于矿区自然及地质条件特点，制定生态修复的总原则和具体措施，提出实现立体复层绿化、多元化生态修复目标，采用工程和生物治理相结合的综合措施^[62,63]；鉴于不同矿产类型、开采方式、自然条件及“采、选”等不同的生产活动，提出乡村生态农业、城郊湿地公园或郊野公园、矿山公园等生态恢复措施^[64]；从提高土壤质量角度出发，通过实地调研，开展废弃砖瓦窑取土区生态恢复措施^[65]；以植物修复为核心的生态修复研究主要包括修复植物筛选与合理搭配、修复机理和根际圈效应以及修复强化措施^[66]；根据恢复区自然资源条件，修复、培育塌陷区生态环境，综合开发生态农业，是实现塌陷区可持续发展的战略选择^[67]。⑤ 矿区土地复垦实践。如1989~1991年，国家土地管理部门先后在河北、江苏、山东等省建立了23个土地复垦试点，1994年又在江苏铜山、安徽淮北、河北唐山创建了3个国家级复垦综合示范工程。随之而来，在土地复垦规范、标准建设方面也实现了跨越式发展。在矿区土地复垦实践的基础上^[68-71]，《全国土地开发整理规划》、《土地开发整理规划编制规程》、《土地开发整理项目规划设计规范》、《全国生态环境保护纲要》等一系列规划和标准相继出台，极大地推动我国矿区生态环境治理的发展。

1.2.3 生态评估研究进展

Costanza、Odum等在*Ecological Economics*杂志较早地开展了生态评估研究^[72,73]，William Ree、Mathis Wackernagel等也从生态足迹、生态占用的角度开展了相关研究。主要评估方法有：

(1) 能值分析法

能值理论是在 20 世纪 80 年代美国、90 年代意大利、澳大利亚等国以综合系统生态、能量生态和生态经济为基础发展起来的,是以能值为基准,把生态系统或生态经济系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一标准的能值来衡量和分析,并对系统的各种生态流进行能值综合分析和评价^[76,77]。Kemp 等将能值分析应用到 63 个国家与地区,对国家、流域、州、城市等不同尺度的环境经济系统进行价值分析并提出可持续发展对策^[78-82]。我国也将该分析方法应用到种植业生态系统、城市生态系统、城乡复合生态系统、干旱区生态经济系统、自然保护区等^[83-91]。

(2) 生态足迹法

生态足迹法是由 William. Riss(1992)提出并由 M. Wackernagel 进一步完善的。该方法一经提出就受到生态学领域的高度重视并广泛应用于实践,如 *Ecological Footprint of Nations* (Wackernagel, 1997) 研究报告对 52 个国家和地区进行了生态足迹评估,结果表明有 35 个存在生态赤字,中国人均生态足迹为 1.7 hm^2 ,而人均生态承载力仅为 0.8 hm^2 ,人均生态赤字为 0.9 hm^2 ;美国加利福尼亚州 Sonoma Country 群的地区人均生态足迹为 9.06 hm^2 。D. P. Vuuren, Karl-Heinz 等计算并分析贝宁、不丹、哥斯达黎加、荷兰和奥地利等国的生态足迹。*living Planet Report 2002* (Helmut Haberl 等, 2001) 对奥地利 1926~1995 年长达 70 年的生态足迹进行了度量^[92,93]。

我国于 1999 年引入生态足迹的概念,研究的重点逐步从单纯的区域生态足迹的计算扩展到利用生态足迹来分析评价区域可持续发展能力、生态足迹计算方法的修正和理论的完善等方面,如谢高地、鲁春霞、成升魁等对中国生态空间占用、生态承载力状况进行研究,阐述了生态足迹的理论和计算方法,并对经济发展对生态的影响进行了评估^[94-98]。

(3) 生态服务价值评价法

自然资本的概念为自然资源服务功能的有价评估奠定了基础,评估开始关注生态系统服务价值功能^[99-101]。自 20 世纪 60 年代末专家学者开始进行生态服务价值评估,主要表现为三个方面。一是针对不同评估尺度展开研究^[102-104]。如大区域尺度研究,Seidl 等对巴西流域尺度的生态系统服务价值进行精确的价值测量^[105];Kreute 等针对美国得克萨斯州 SanAntoni 地区城市化过程中的生态服务价值进行动态变化评估^[106]。在小区域尺度中,对农田景观生态系统、内蒙古草原生态系统、陕西黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统等进行服务功能价值评估^[107-111]。二是采用不同评估方法研究。如使用替代成本法开展森林公益机能的评估^[112];Konarska 等采用 Costanza 的价值系数,将“3S”技术

应用于 30 m 的土地覆被数据的全球生态系统服务价值评估^[113];Sutton 等制作了全球 1 km 分辨率的生态服务价值地图,并与 GDP 相比较^[114]。三是对不同价值的评估。如在全国范围、云南、海南岛等对森林固持土壤和涵养水源功能的价值评估^[115,116]等。

(4) 综合评价法

20 世纪 80 年代,美国、德国等发达国家陆续开展了生态风险评价。*Methods of Environment—Impact Assessment* 介绍了欧洲等环境影响评价的主要方法及发展趋势^[117],并于 1998 年起多位学者采用定量评价为主展开新的生态环境评价和全球化合作研究^[118]。经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)首创了“压力—状态—响应”(Press-State-Response, PSR)模型的概念框架,并得到针对不同问题、不同区域的 PSR 模型,来衡量生态环境状况^[119,120]。

国内生态环境质量评价,始于 20 世纪 80 年代末 90 年代初,涉及农业生态系统、城市生态环境系统、区域生态环境等,根据实际情况,在一定原则指导下进行^[121-124],针对不同的研究区域和研究对象,采用相应的指标来进行综合评价^[125-131]。

1.2.4 生态监测研究进展

生态监测主要是针对生态系统现状以及人为扰动所引起的生态变化所进行的活动,主要通过监测生态条件、条件变化、对环境压力的反映及其趋势而获得。监测对象可含农田、森林、草原、荒漠、湿地、气象、物候等,大致分为宏观生态监测、微观生态监测两个部分^[132]。国外开展区域生态监测时间较长,国内则开展较晚,从 20 世纪 70 年代开始关注生态环境质量,从单一化学分析发展到遥感监测,从间断性监测过渡到连续性监测^[133],90 年代之后更多结合了“3S”技术。目前大都主要集中于对生态环境监测系统建设、生态监测指标、生态监测方法等方面的研究。

(1) 生态环境监测系统建设

美国地调局(U. S. Geological Survey, USGS)建设了美国国家废弃矿山网,包括了废弃矿山点图、汇水区域图、地形图、土地所有权图、植被、水文等信息,这套系统应用空间分析功能对科学的规划决策提供支持^[134]。Lubos Mate 在西班牙 CabodeGata-Nijar 地区利用不同分辨率影像融合技术开展矿山环境监测制图工作^[135]。捷克共和国从 1998 年开始开展了一项结合 GIS 多元空间分析系统和激光雷达技术对环境进行监控的研究工作。

我国生态环境监测系统建设研究主要表现在两个方面:一是生态环境信息

服务系统研究,如地质环境监测院建设了以掌握全国性的矿山环境信息系统;毕节喀斯特地区在区域空间数据库基础上构建生态环境信息服务系统^[136]。二是生态因子的动态监测系统,我国生态系统研究网络(CERN)对全国典型农田、森林、草地、湿地、水域生态系统进行长期定位监测,主要用于生态环境因子的空间变化与长期动态变化^[137];贵州喀斯特山地区通过建立生态系统监测网络,分区监测人为扰动对生态系统服务价值的影响^[138];对生态环境破坏重点地区的动态监测和评估^[139-141]。

(2) 生态监测指标

生态监测指标是进行生态监测的前提,监测指标要以“有限的”数据信息代表“无限的”环境内部信息,选择最能代表和反映生态系统变化状况的指标^[142-144]。由于我国监测对象及其所处环境特征的差异很大,大到全球范围,小到单一生态类型区乃至系统各个组分属性提取,生态环境变化的特征差异很大,因此,生态监测指标体系具有多样性、差异性,到目前为止,全国没有一套成熟的区域生态监测指标体系^[145,146],研究监测指标成为生态学者研究的重点。我国生态监测一般根据《生态环境状况评价技术规范(试行)》(HJ/T 192—2006)选择具体的生态监测因子进行评价^[147]。根据监测目的不同,提出相应的生态监测指标体系。如为监测生态系统修复效果,从生态系统稳定性水源涵养、水土保持、保土和土壤改良等角度,建立监测评价指标^[148,149];为监测水生态环境质量状况,从水土流失与面源污染状况、河流健康状况、点源污染状况等方面提出生态监测指标^[150];为监测区域植被生长健康状况,采用地表植被表征指数作为监测指标^[151]。不同监测对象设置不同监测指标,如对水流域生态系统,从水土保持、地质灾害、河流污染等方面设置监测指标^[152];对生态旅游区的生态系统,从生命系统、非生命系统、人文系统三个方面设置监测指标^[153];对土地利用覆盖监测,从土地利用类型、土地植被覆盖类型方面设置监测指标^[154]。

(3) 生态监测方法

生态监测方法主要有常规调查手段和“3S”手段,或是二者的结合。传统的监测手段只能解决局部监测问题,而将“3S”引入到生态监测中,实现广范围、高精度、动态性是生态监测研究的重点。

常规调查方法的研究。常规调查一般在微观尺度设计观测小区,采用实地调查方法和定位法,对关键性的生态环境因子进行连续监测,采用定量评价方法,分析生态环境因子的变化状况及生态环境的变化趋势^[155,156]。

“3S”技术监测方法的研究。一是利用不同卫星遥感影像资料 TM、SPOT、NOAA/AVHRR、MODIS 等,动态监测研究区域不同时相的植被因子、土地利用覆盖变化因子、生态因子等,采用综合评价法和比较法等,分析生态因子的变

化趋势来实施对研究区域的监测^[157-161]；二是利用遥感影像资料，获取生态因子，对某个生态因子进行动态监测，如利用遥感获取与湿地水分条件直接相关的生物物理变量，监测湿地挺水植物缺水状况的变化趋势^[162]；利用植被指数变化研究数据，计算归一化植被指数变化率，分析地表植被覆盖状况^[163,164]。

常规调查和“3S”技术相结合的应用研究。采用常规调查和 RS、GPS 等技术相结合，获取研究区域的基础数据，然后通过 GIS 空间分析模块，将生态监测模型与 GIS 结合，进行二三维一体化分析^[165,166]，或者利用 GIS 空间分析模块制作生态监测专题图件，并与环境管理信息系统结合，实现生态环境时空变化动态监测与模拟^[167-172]；如采用遥感、植被调查和土壤调查等手段综合评估具有代表性的废弃采石场自然恢复状态，为破坏区生态修复治理提供数据支持^[173]；以 TM、SPOT 及 QuickBird 遥感影像为信息源，结合野外调查和其他辅助数据，对北京市生态环境变化进行动态分析^[174]；运用系统工程原理与方法，建立天、空、地立体化综合观测系统，对生态系统多种要素和变量进行动态监测，获得生态环境指标的三维立体监测信息^[175,176]；利用 SPOT 植被解译数据与 DEM 叠加分析区域生态环境变化与地形关系，评价其治理工程取得成效^[177]。

总之，采用上述监测技术与方法，一方面是对生态系统中指标进行度量和判断，从而获取其特征数据，分析反映该指标的现状 & 变化趋势。另一方面，可通过在“3S”基础上构建数学模型，对现实情况进行定性描述到定量分析、由野外到室内、由过去监测到未来预测，为生态环境的整治和保护工作服务。未来生态监测的发展趋势将充分利用计算机技术，以“3S”技术和地面监测相结合、点位性与区域性视角相结合、现状监测与早期预警相结合、制度化与标准化相结合为主，实现生态监测网络化。

1.2.5 NPP 模型研究进展

(1) 模型研究

自 20 世纪 60 年代以来，国际上以植物 NPP 测定资料为基础，结合气候环境因子，建立模型，对植被 NPP 的区域分布进行评估，并在随后的国际地圈——生物圈计划 (IGBP)、全球变化与陆地生态系统 (GCTE) 和京都协定 (Kyoto Protocol) 的推动下，全球开展了对植被的 NPP 的定位观测和模型模拟研究^[178]；我国于 20 世纪 70 年代开始了对陆地生态系统生产力的研究。

不同尺度下 NPP 建模思想也有所不同，如基于地面的 NPP 定位观测采用以点带面的方法外推获取区域及全球 NPP 总量，全球尺度和区域 NPP 模拟估算则采用景观尺度机理模型对区域生态系统 NPP 进行模拟^[179-181]。总体看来，NPP 模型主要有如下三种：