

毛竹林生态系统健康评价技术研究

郭宝华¹, 余林², 范少辉^{1*}, 曾伟², 肖复明², 赵耀新³

(1. 国际竹藤中心竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102; 2. 江西省林业科学院, 南昌 330032;
3. 邯郸市林业局, 邯郸 056002)

摘要: 在探讨森林生态系统健康评价的基础上, 提出了毛竹林生态系统健康评价的指标体系和评价方法, 并以此对不同密度毛竹林生态系统进行了健康评价, 旨在为毛竹林生态系统健康的修复与维护提供依据, 对于推进毛竹林健康经营, 促进毛竹林生态系统服务功能发挥具有重要的现实意义。

关键词: 毛竹林; 生态系统健康; 评价技术

中图分类号: S795

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2013)03-0366-06

Assessment technology for forest ecosystem health of *Phyllostachys edulis*

GUO Bao-hua¹, YU Lin², FAN Shao-hui¹, ZEN Wei², XIAO Fu-ming¹, ZHAO Yao-xin³

(1. Key Laboratory of Science and Technology of Bamboo and Rattan, International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102
2. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032; 3. Forestry Administration of Handan, Handan056002)

Abstract: The indicator system and assessment methods for ecosystem health of *Phyllostachys edulis* were presented based on the discussion on the forest ecosystem health assessment, and different densities of *Phyllostachys edulis* ecosystem health were evaluated. This paper aimed at providing evidence for the recovery and maintenance *Phyllostachys edulis* ecosystem health, so as to promote the health management of *Phyllostachys edulis*. It has an important practical significance in enhancing the service function of *Phyllostachys edulis* ecosystem.

Key words: *Phyllostachys edulis*; ecosystem health; assessment technology

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 是我国亚热带主要的生态经济竹种, 不仅具有较高的经济和社会价值, 而且具有巨大的生态价值, 在调节气候、涵养水源、保持水土、防风固沙、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、森林防护、物种保育及保持生物多样性等方面发挥着重要的作用^[1]。因此, 它一直是我国南方主要的森林资源, 在我国林业生产中占有非常重要的地位。近年来, 毛竹丰产栽培技术在毛竹各主产区的大规模应用取得了良好的经济效益, 但是伴随着毛竹林集约经营水平的提高, 也带来了令人担忧的问题。毛竹林集约经营在一定时间内提高了林分蓄积量, 但长期掠夺式经营方式使竹林养分长期处于净流出状态, 出现了竹子越砍越小, 产量逐年下降, 土壤肥力主要指标大幅度下降的趋势, 群

落结构单一, 林下植被发育差, 水源涵养及水土保持能力也受到了影响, 毛竹林生态系统健康状况出现了严重的问题^[2]。虽然毛竹林的生产力退化和生态系统服务功能下降不及针叶林突出, 但其对我国林业生产造成的后续影响及对毛竹林可持续经营目标的障碍作用不可低估^[3-4]。

为解决毛竹林生产力退化这一问题, 一些研究者近年来就毛竹林地立竹结构^[5]、土壤状况^[6-7]、经营方式^[8]等方面进行了研究, 而从竹林生态系统健康方面开展的研究较少。自 1988 年以来, 各国学者对生态系统健康内涵、评价的标准与方法进行了一系列的探讨^[9-10], 极大地推动了生态系统健康研究的发展。长期以来, 我国森林经营水平比较低, 森林质量不高, 作为世界上人工林面积最大的国家,

收稿日期: 2012-12-04

基金项目: 国际竹藤中心基本科研业务费专项资金(1632009011), 江西省主要学科和学术带头人培养计划(20113BCB22003)和江西省自然科学基金(2009GZN0042)共同资助。

作者简介: 郭宝华, 男, 博士研究生, 助理研究员。E-mail: bhguo@icbr.ac.cn

* 通信作者: 范少辉, 男, 博士, 研究员, 博士生导师。E-mail: fansh@icbr.ac.cn

我国仍有相当一部分森林面临着林分结构简单、抵抗病虫害能力低下、森林火灾风险较大等突出问题^[11]。因此,加强森林经营,提高森林质量,促进森林健康,已经成为中国林业发展的重要内容和现代林业建设的永恒主题^[12]。

安徽省竹类资源丰富,现有毛竹林面积为 27.73 万 hm^2 ,且人工栽培面积不断增加,但是从质量上看,安徽毛竹林仍然存在立竹度低,大径竹少,经营水平不高,生态服务功能不高等问题,这严重制约着安徽省毛竹产业的可持续发展。因此,研究毛竹林生态系统健康评价,提高毛竹林生态系统的质量和生态服务功能,是对安徽省毛竹林资源进行可持续管理的关键,也是目前竹林资源管理急需解决的问题之一。作者在探讨森林生态系统健康评价的基础上,提出了毛竹林生态系统健康评价的指标体系和评价方法,并以此对不同密度毛竹林生态系统进行了健康评价,旨在为毛竹林生态系统健康的修复与维护提供依据,对于推进毛竹林健康经营,促进毛竹林生态系统服务功能发挥具有重要的现实意义。

1 森林健康的重要性

森林健康是指森林生态系统能够维持其多样性和稳定性,同时又能持续满足人类对森林的自然、社会和经济需求的一种状态,是实现人与自然是和谐相处的必要途径^[13]。森林健康正在或已经成为林业科技中的一个新方向,并得到越来越广泛地承认;同时,它又作为众多相关学科交叉融合的平台,服务于森林可持续经营和区域可持续发展^[14]。

“森林健康”是德国、美国等林业发达国家针对人工林林种结构单一、不能满足森林的生态、经济和社会服务功能等缺陷而提出来的可持续森林资源经营理念,其倡导通过合理林分结构配置,实现森林病虫害自控、森林火险等级降低、环境保护功能增强和资源资产价值提高的目标,使人工林生态系统保持更高的生物多样性和稳定性,以增强抵抗各种自然灾害的能力,满足人类所期望的多目标、多价值、多用途、多服务的需要^[15-16]。因为重点关注的森林受害类型不一样,美欧的研究发展历程并不相同。美国更多地强调针对火灾和病虫害的森林健康经营;欧洲则更多地强调与空气污染有关的森林受害。

传统森林经营侧重森林的单一功能特别是木材生产,而忽略了森林的其他功能。而森林健康经营则以主导功能健康为导向,通过综合措施使森林达

到结构与功能健康状态,实现森林结构与功能最优化、生物产量较高、生物多样性丰富、受到多种干扰后的可恢复性强,以持续满足社会经济发展和人类需求^[17-20]。森林健康经营的实质是使森林具有较好的自我调节并保持系统稳定的能力,对不健康或亚健康的森林针对主要问题采取相应措施恢复健康。森林健康不仅是森林管理的一个目标,更重要的是作为森林管理的一种有效手段越来越多地应用于森林管理中。

现代森林健康的概念已经逐步发展成为包括林分、森林群落、森林生态系统以及森林景观在内的一个复杂的系统概念。随着人们对森林作为生态系统主体认识的不断深入,以及环境污染、木材过量消耗而造成的森林生态系统不断退化,对森林健康的理解也随之发生变化,对森林健康的研究也逐步从林分转移到森林生态系统上来^[21]。目前,关于森林生态系统健康的研究,一方面是强调森林生态系统健康与森林生态系统服务功能的关系^[22];另一方面是对森林生态系统健康状况的研究,即对森林健康胁迫因子、活力、组织、承载能力和恢复力等的研究^[20]。

2 森林生态系统健康评价技术研究

森林生态系统健康评价指采用完善的评估指标体系来诊断和评估现有森林生态系统的健康状况,是对森林生态系统生产力水平、结构状态、抵抗外界干扰能力以及服务功能等多方面综合能力的一种评估^[23-24]。目前的森林生态系统健康评价发展不是很完善,基本上还局限在对森林环境、森林结构和森林功能的单方面评价,其中森林环境主要是土壤、水分、污染方面,森林结构主要是林木个体的健康,森林功能主要是保持水土、涵养水源、调节气候等方面。因此,森林生态系统健康评价要从生态系统的整体角度考虑,正确选择空间尺度和指标,以客观反映生态系统健康状况^[25]。

森林生态系统健康长期监测是森林生态系统健康评价的基础^[26],是当前国内外十分关注的热点问题,已成为国内外森林状况评估和森林资源管理的标准指标之一。由于森林健康问题的复杂性,可监测的指标有很多,但是出于成本考虑,最好优选出能很好描述森林健康的一些指标进行定期监测,或对不同监测水平使用不同的监测指标。随着不同环境监测项目的交叉融合,森林健康监测指标体系仍在不断完善过程中^[27]。目前,欧洲森林健康的监测内容在不断完善,不同监测等级的具体内容也不

相同,除样地基本信息外,森林健康的监测内容分为9个方面:1)树冠健康;2)森林土壤及土壤溶液化学;3)树叶化学;4)森林生长和收获;5)大气污染物沉降;6)样地水平的气象监测;7)地表植被监测,分层测定植物种类及其丰富度和覆盖度;8)物候监测;9)空气质量监测。美国森林健康监测内容分为8个方面:1)林冠健康监测;2)臭氧伤害监测;3)树木受害监测;4)树木死亡率监测;5)地衣群落监测;6)倒木监测;7)植物多样性和结构监测;8)土壤健康监测。

森林健康监测指标由许多彼此相互联系甚至矛盾的指标共同组成,因此森林健康综合评价非常复杂,也有很大主观性,需要通过技术进步予以克服。国内外已有许多学者开展了森林生态系统健康评价的研究工作,并根据不同的区域特征、关键影响因素、评估目的和目标制定了相应的评价指标体系。以往研究者应用过指示物种类群评价法^[28]、综合指标评价法^[29]、健康距离(HD)法^[30]、主成分分析法^[31]、

层次分析法^[32]、模糊综合评价法^[33]、人工神经网络法^[34]、灰色关联度法等方法进行森林生态系统健康状况的综合评价。可以看出,森林生态系统健康状况综合评价的方法很多,每种方法考虑问题的侧重点不尽相同,所选择的方法不同,可能导致评价结果不同,因而在进行不同类型森林生态系统健康评价时,应具体问题具体分析^[35]。

3 毛竹林生态系统健康评价研究

如何诊断、评估、改善和维护毛竹林生态系统的健康是实现毛竹林可持续发展的关键。毛竹林生态系统健康评价是毛竹林保护与持续合理利用的基础,建立一套科学的毛竹林生态系统健康评价体系,可为制定科学的毛竹林经营战略提供科学依据。由于毛竹林生态系统的复杂性,以及对竹林生态系统健康内涵的争议性等多种原因,对毛竹林生态系统健康尚无统一简明的评价体系。

表 1 毛竹林健康评价指标体系

Table 1 Indicator system for health assessment of moso bamboo

指标类型 Type of index	指标 Index	具体度量指标 Specific measurement index
基础性指标 Fundamentality	林分生长	胸径,竹高,冠幅,枝下高,胸径处壁厚,基径,年龄,立竹株数,笋重,笋地径。
	生境	土壤类型,植被覆盖状况,郁闭度。
生产力指标 Productivity	初级生产力	乔木、灌木、草本植物的生物量,叶面积指数。
	消费者	初级消费者的种类、密度、雌雄比、年平均出生率、死亡率及生境质量。 次级消费者的种类、密度、雌雄比、年平均出生率、死亡率及生境质量。 指示性动物的种类、密度、雌雄比、年平均出生率、死亡率及生境质量。
	分解者	腐食性动物的种类和生物量。
功能性指标 Functionality	更新状况	年发笋量,年退笋率,年成竹数。
	群落层次结构	群落分层,有无苔藓层、草本层,各群落的年龄结构,外来种/乡土种(乔木),r对策种/k对策种(乔木)。
	生物多样性	物种多样性系数,Shanon-Wiener多样性指数,Patrick丰富度指数,Margalef丰富度指数,Simpson优势度,Pielou均匀度指数。
	土壤健康	土壤厚度,土壤腐殖质层厚度,土壤含水率,土壤容重,土壤孔隙状况,土壤团聚体状况,土壤颗粒组成,土壤pH值,土壤有机质含量、土壤阳离子交换量,土壤养分元素含量,土壤酶活性,土壤动物和微生物的种类和生物量。
	养分循环	毛竹各器官养分元素含量,林下植被各部分营养元素含量,枯枝落叶层厚度,枯落物储量,枯枝落叶分解速率,枯落物营养元素含量。
抗干扰性指标 Anti-interference	水文效益	乔木、林下植被和枯落物层单位面积的贮水量、土壤侵蚀模数、土壤渗透性能,径流含沙量,水质状况,水土流失量。
	调节气候	空气中悬浮物含量,有毒物质含量,负氧离子含量,固定二氧化碳和释放氧气量。
	抗病虫害	有害生物、天敌的种群数量和密度,病虫害发生周期,病虫害感染程度。
	抗气象灾害	暴雨、洪涝、干旱、干热风、冷害、冻害、雪害、风害、冰雹、高温、低温发生频率及成灾比例。
	森林防火	火灾发生频率及成灾比例。
	抗人为干扰	放牧,年挖笋量,年采伐量,年旅游人数。
	竹子开花	开花年龄,同步开花程度,开花后死亡率及自然更新年限、开花后损失。

3.1 毛竹林生态系统健康评价指标体系

评价指标体系的选择和建立,是毛竹林生态系统健康评价的前提。筛选毛竹林生态系统健康评价指标应遵循指标的代表性、科学性、系统性、独立性和实用性等原则^[36],同时还应使评价指标具有实用性和可操作性。结合已有研究资料^[10,21],并充分考虑毛竹自身的特点,采用表 1 的指标体系对毛竹林生态系统健康进行评价。

3.2 毛竹林生态系统健康评价方法

毛竹林生态系统健康评价指标体系建立之后,要对各评价指标的优劣状况进行评价。由于毛竹林生态系统健康变化具有模糊性和连续性,故各评价指标采用连续性质的隶属度函数,并从主成分因子负荷量值的正负性,确定隶属度函数分布的升降性。由于各评价指标的实测数值量纲不同,取值范围各异,隶属函数可以将各评价指标标准化,转变为 0~1 之间的无量纲值(即隶属度),即实现对各评价指标的量纲归一化。本文通过公式 1 和 2 来计算毛竹林生态系统健康评价指标的隶属度值。

对于与毛竹林生态系统健康成负效应的指标采用以下公式处理:

$$F(X_i) = (X_{i\max} - X_{ij}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (1)$$

而对于与毛竹林生态系统健康成正效应的指标采用以下公式处理:

$$F(X_i) = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (2)$$

式(1)和(2)中: $F(X_i)$ 为转化后指标的隶属度值; X_{ij} 为第*i*项指标平均值; $X_{i\max}$ 为第*i*项指标中的最大值; $X_{i\min}$ 为第*i*项指标中的最小值。

毛竹林生态系统健康评价指标及对应于这些指标的权重共同构成毛竹林生态系统健康评价体系。如何确定各评价指标的权重,是综合评价的又一关键问题。目前权重确定的方法有:专家评估法(德尔菲法)、频数统计分析法、等效益替代法、指标值法、主分量分析法、因子分析法、相对系数法和层次分析法等。为避免人为影响,在毛竹林生态系统健康评价中宜采用多元统计分析中的因子分析法来计算各项评价指标的公因子方差(共同度),通过计算各个指标公因子方差占其公因子方差总和的比例(百分数),将其所占比例转换为 0~1 之间的数值,作为各个单项评价指标的权重值,所有指标权重之和应为 1 或 100%。

毛竹林生态系统健康是众多评价指标的综合作用,因此需要将单因素评价结果转化为由各评价指标构成的综合评价。本研究根据模糊数学中的加乘法原则,由公式 3 求出毛竹林生态系统健康指数,

据此可评价毛竹林生态系统的健康程度。

$$F = \sum W_i \times F(X_i) \quad (3)$$

式中: F 为毛竹林生态系统健康指数; W_i 为各评价指标的权重,反映各评价指标的重要性; $F(X_i)$ 为各评价指标的隶属度值,反映各评价指标的优劣; i 为评价指标的个数。

3.3 毛竹林生态系统健康划分标准

由于毛竹林生态系统健康评价尚无统一、公认的标准,为了便于毛竹林生态系统健康状况的定性和定量比较,将毛竹林生态系统健康标准细分为 4 个等级,等级划分范围为[0, 1.00],按基本等量 and 就近取整的原则^[37-38]来划分不同等级的划分范围,具体等级如下:0~0.40 为不健康,0.41~0.60 为亚健康,0.61~0.80 为健康,0.81~1.00 为优质健康。

4 毛竹林生态系统健康评价例证

4.1 数据来源

试验地设置在安徽省黄山区的毛竹分布中心,选择具有代表性且环境条件(海拔、坡向、坡位、坡度等)和经营水平基本一致而密度不同的地块设置标准样地。试验标准样地的设置及基本情况见文献[5]。

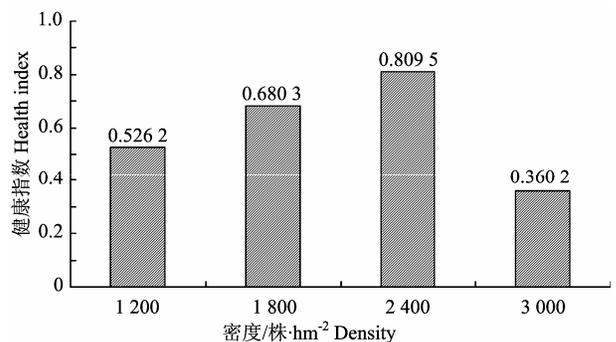


图 1 不同密度毛竹林生态系统健康指数

Figure 1 Health index of moso bamboo with different densities

4.2 评价结果

从图 1 可以看出,随着林分密度增大毛竹林生态系统健康指数先增大后减小,其中 2 400 株·hm⁻²毛竹林的健康指数最大(0.809 5),为优质健康,其次为 1 800 株·hm⁻²毛竹林(0.680 3),为健康,1 200 和 3 000 株·hm⁻²的毛竹林分别为亚健康和不健康。结合调查区的竹林生态系统现状,3 000 株·hm⁻²毛竹林虽然较其他林分有更高的生物生产力,但是林分结构不合理,林下植被和枯落物层在竹林土壤质量维持、生物循环平衡、水源涵养及水土保持等方面作用被削弱,土壤出现退化的趋势,故其生态系

统健康指数最低。而林分密度为 $1\ 200$ 株· hm^{-2} 的毛竹林为因为掠夺式采伐和粗放经营而造成的低产林,其林下植被较丰富,能够较好地维持林地土壤质量、保持营养元素循环平衡、具有较好的水源涵养及水土保持功能,所以其评价结果为亚健康。在试验区, $2\ 400$ 株· hm^{-2} 的毛竹林既能保障毛竹林经济产出,而且能够很好地发挥竹林改良土壤、维持生物循环平衡、水源涵养等生态功能,因此其生态系统健康指数最高。可以看出,本研究的毛竹林健康评价体系得出的健康指数与毛竹林实际情况相吻合,比较客观地反映了不同密度毛竹林的健康状况,对毛竹林健康状况的评价具有一定的参考价值。

5 讨论

安徽林业进入从数量型增长向质量型转变的关键时期,森林健康经营成为重要的森林培育与经营手段。森林生态系统健康的研究为我们解决各种生态环境问题提供了新的概念构架和一系列的研究手段。但由于森林生态系统的复杂性、多样性,自然和人为干扰的多变性,不同社会经济条件对生态系统要求的差异性,以及人类认识的局限性等,关于森林生态系统健康的理论、监测技术、评价方法等都处于探索阶段。针对安徽省毛竹林地结构不合理,稳定性差,生态服务功能不高的状况,引进森林健康理念,实施森林健康经营是实现毛竹林培育生态良性循环的尝试。关于毛竹林生态系统健康评价技术,仍有许多值得探讨和研究的方面,主要包括:

(1) 随着 3S 技术在内的多方面先进技术的发展,森林生态系统健康的监测与评价方法也得到很大提高,研究方法也逐步从定性化到量化方向发展,森林健康长期监测和健康状况预测也是今后毛竹林健康研究的发展方向。

(2) 森林健康是一个综合概念,各方面都需要考虑到,因此形成一套综合的量化的森林健康评价指标体系,是我国森林健康评价的一个研究发展方向。我国许多研究者提出森林健康不仅仅反应在自然生态层面上,还反映在社会、经济等其他方面。本文毛竹林健康评价指标仅考虑了自然生态方面,未涉及社会、经济等方面。因此,迫切需要建立起一套完整的毛竹林健康评价指标体系,指导毛竹林资源的可持续经营,使毛竹林生态系统更稳定,生物多样性更丰富,竹林质量得到提高,从而使之持久地发挥综合功能和效益。

(3) 目前研究的森林健康评价多为静态的评价,而森林健康的动态评价将是森林健康理论发展

的重要方向。毛竹林更新方式特殊,而且受人为干扰大,因此毛竹林健康评价必须考虑毛竹林生长发育的历史过程和环境因素的综合影响。

(4) 森林健康监测和评价的最终目的是确定森林健康退化的原因,并提前采取有效措施合理调控,维持和改善森林健康情况。目前研究仍主要集中在森林健康监测指标和评价技术方面,对如何调控和维持森林健康,还只处在对个别技术和经验进行总结的阶段,仍缺乏理论性地系统研究总结,也没有提出成套技术。利用本研究的毛竹林健康评价指标体系和评价方法,对不同密度毛竹林进行了实例研究,结果表明该评价体系能够比较客观地反映毛竹林的健康状况,具有一定的科学性、客观性和可操作性,对安徽省毛竹林健康状况的评价具有一定的参考价值。但是由于毛竹林健康评价与调控是一个十分复杂的问题,本研究仅仅是一个初步的尝试,旨在探索中小尺度水平上评价毛竹林生态系统健康的方法,关于毛竹林健康的调控和维持技术仍需要进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 江泽慧. 世界竹藤[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [2] 刘广路. 毛竹林长期生产力保持机制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [3] 盛炜彤, 范少辉. 人工林长期生产力保持机制研究的背景、现状和趋势[J]. 林业科学研究, 2004, 17(1): 106-115.
- [4] 范少辉, 盛炜彤, 俞新妥. 人工林培育与地力衰退[J]. 林业科学研究, 1996, 9(专刊): 18-25.
- [5] 余林. 皖南毛竹林密度效应研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [6] 范少辉, 肖复明, 汪思龙, 等. 毛竹林细根生物量及其周转[J]. 林业科学, 2009, 45(7): 1-6.
- [7] 范少辉, 刘广路, 官凤英, 等. 不同管护类型毛竹林土壤渗透性能的研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(4): 568-573.
- [8] 张昌顺. 闽北不同类型毛竹林生态功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [9] Schaeffer D J, Henricks E E, Kerster H W. Ecosystem health-measuring ecosystem health[J]. Environ Man, 1988, 12: 445-455.
- [10] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1998, 13: 397-402.
- [11] 雷静品, 肖文发. 森林健康的概念及其研究与实践[J]. 世界林业研究, 2008, 21(4): 20-24.
- [12] 杜天真, 郭圣茂. 提高森林资源质量是森林培育的永恒主题[J]. 西南林学院学报, 2005, 25(4): 27-30.
- [13] 王小平, 陈峻崎. 北京森林健康经营及实践研究[J]. 现代林业研究, 2007, 1(1): 21-26.

- [14] 甘敬, 张振明, 余新晓, 等. 森林健康监测与评价研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 177-180.
- [15] 陈高, 邓红兵, 王庆礼, 等. 森林生态系统健康评估的一般性途径探讨[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 995-999.
- [16] 陈高, 范竹华, 代力民, 等. 森林生态系统健康及其评估监测[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 605-610.
- [17] Walker J, Reuter D I. Indicators of catchment health- A technical perspective[J]. Collingwood: CSIRO, 1996, 15: 25-37.
- [18] Aamlid D. Changes of forest health in Norwegian boreal forest during 15 years[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 127: 103-118.
- [19] Dale J. Forest health in west coast forests[M]. Salem, OR: Oregon Dept of Forestry, 2000.
- [20] Allen Eric. Forest health assessment in Canada[J]. Ecosystem health, 2001, 7: 28-34.
- [21] Callicott J B, Aldo Leo, Pold metaphor. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management[M]. Washington: Island Press, 1992.
- [22] Hirvonen H. Canada's national ecological framework: an asset to reporting on the health of Canadian forests[J]. The Forestry Chronicle, 2001, 77(1): 111-115.
- [23] 王兵, 郭浩. 森林生态系统健康评估研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 114-121.
- [24] 肖风劲, 欧阳华, 孙江华, 等. 森林生态系统健康评价指标与方法[J]. 林业资源管理, 2004, 1: 28-30.
- [25] 陈高, 邓红兵, 代力民, 等. 森林生态系统健康评估 II: 案例实践[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 1-6.
- [26] 陆元昌. 森林健康状态监测技术体系综述[J]. 世界林业研究, 2003, 16(1): 20-25.
- [27] 王彦辉, 肖文发, 张星耀. 森林健康监测与评价的国内外现状和发展趋势[J]. 林业科学, 2007, 43(7): 78-85.
- [28] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486-490.
- [29] 肖风劲, 欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 203-209.
- [30] 陈高, 代力民. 森林生态系统健康评估 I: 模式、计算方法和指标体系[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1743-1749.
- [31] 赵小亮, 周国娜. 主成分分析法在承德县森林生态系统健康评价中的应用[J]. 中国农学通报, 2008, 24(6): 400-403.
- [32] 欧阳勋志, 彭世揆. 森林承载力评价方法的探讨[J]. 江西农业大学学报, 2003, 26(6): 834-838.
- [33] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武昌: 武汉大学出版社, 2004: 25-460.
- [34] 甘敬, 朱建刚. 基于 BP 神经网络确立森林健康快速评价指标[J]. 林业科学, 2007, 43(12): 1-7.
- [35] 刘君昂, 刘红娟. 森林健康评价方法与应用[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(6): 197-200.
- [36] 王鸣远. 中国林业经营类型系统及环境功能评价指标体系的探讨[J]. 林业科学, 2000, 34(2): 100-109.
- [37] 张秋根, 王桃云, 钟全林, 等. 森林生态环境健康评价初探[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 16-18.
- [38] 王小红, 周祖基. 竹林生态系统健康与生物调控研究[J]. 世界竹藤通讯, 2006, 4(2): 21-25.