

# 森林类型自然保护区生态保护研究进展

汤博<sup>1</sup>, 王伟<sup>2\*</sup>, 靳永超<sup>3</sup>, 辛利娟<sup>2</sup>

(1. 浙江省环境保护科学设计研究院, 浙江杭州 310007; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 世界自然基金会, 吉林长春 130000)

**摘要** 自然保护区的生态有效性是指保护区对其主要保护对象的保护效果。开展自然保护区的生态保护成效评估是明确自然保护区保护效果、实现保护区保护目标的有效途径。从基于自然保护区生态价值、保护对象、森林资源、森林健康以及保护区生态系统服务功能的评估5个方面, 归纳分析了国内外森林类型自然保护区生态保护成效评估, 并尝试构建我国森林类型自然保护区生态保护成效评估指标体系, 为更好地引导森林类型自然保护区提升保护效果, 使生物多样性得到更好的保护提供借鉴。

**关键词** 森林; 自然保护区; 生态保护成效; 指标体系

**中图分类号** S759.9 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)11-0060-03

## Research Progress on Ecological Protection of Forest Type Nature Reserve

TANG Bo<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2\*</sup>, JIN Yong-chao<sup>3</sup> et al (1. Environmental Science Research & Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310007; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012; 3. World Wide Fund for Nature, Changchun, Jilin 130000)

**Abstract** Ecological efficacy of Nature Reserve is mainly for the protect efficiency of the protection object. Carrying out ecological protection effectiveness evaluation of nature reserves is an efficient way to explicit the preventive effect, as well as to realize the goal of conservation. This research mainly analyzed protection efficacy evaluation of China's Nature Reserves for forest both in China and abroad based on 5 aspects of ecological value, protected object, forest resources, forest health of Nature Reserve, and assessment of ecosystem services in protected areas. Besides, try to establish a comprehensive scientific evaluation index system to assess protection efficacy of China's Nature Reserves for forest to guide forest nature reserve lift its protection effect much better, as well as to provide reference for better biodiversity protection.

**Key words** Forest; Nature Reserve; Ecological protection efficacy evaluation; Indicator system

建立自然保护区是保护生物多样性的有效方式<sup>[1-2]</sup>。自然保护区的保护成效是衡量区域生物多样性保护工作的重要指标。在世界各国自然保护区发展的同时, 一个关键科学问题被反复提及, 即“自然保护区的保护成效到底如何”<sup>[3-5]</sup>。这个问题能否得到有效解决, 是一项重要的基础研究内容。近年来, 我国政府也开始重视自然保护区的保护成效评估工作。《国务院办公厅关于做好自然保护区管理有关工作的通知》(国办发<sup>[2010]</sup>63号)和《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011—2030年)》均明确提出了“制定自然保护区评估标准”“不断提高自然保护区管理质量”等要求。然而, 目前很难找到一个相对科学、客观的指标体系方法来评估自然保护区的保护成效。目前, 国内外自然保护区保护成效评估多集中在管理有效性方面, 即评估自然保护区的管理过程和管理程度<sup>[6-7]</sup>。而生态成效评估是针对自然保护区主要保护对象的保护效果, 是自然保护区系统保护规划的一个核心问题<sup>[8-10]</sup>, 也是保护生物学面临的一个主要挑战。目前, 国内外对自然保护区生态保护成效进行的评估大多是定性评估, 只有在部分类型自然保护区有定量研究, 如草地类和候鸟类自然保护区的成效评估<sup>[11-12]</sup>。

森林类型自然保护区是指以森林植被及其生境所形成的自然生态系统作为主要保护对象的自然保护区。截至2016年底, 我国已建立446处国家级自然保护区, 其中森林类型的就有212处, 在数量和面积上占国家级自然保护区的

47.5%<sup>[13]</sup>。我国现有森林大部分都被自然保护区涵盖。我国政府为这些自然保护区建设投入了大量的人力、物力和财力, 但目前并不清楚保护成效, 故很有必要对森林类型自然保护区的保护成效开展评估, 以便总结经验 and 发现不足, 从而提出有针对性的管控措施。因此, 对森林类型自然保护区进行保护成效评估并构建科学的生态有效性评估指标具有重要意义。根据目前国内外关于森林类型自然保护区生态保护成效评估方面的研究进展, 将森林类型自然保护区生态保护成效评估研究分为5个方面, 即基于自然保护区生态价值的评估; 基于保护区内保护对象的评估; 基于保护区生态系统服务功能的评估; 基于森林资源的评估以及基于森林健康的评估。笔者分析了国内外自然保护区生态保护成效评估情况, 同时考虑相关评估标准和技术规范, 秉承更全面、更客观地评估我国森林类型自然保护区生态保护成效的设计思路 and 原则, 筛选出既能够反映保护区保护成效、又相对较易获取且国内外相关机构有类似评估标准的指标, 评估我国森林类型自然保护区生态保护成效, 以期为保护区管理工作提供参考, 达到更好地保护生态环境的目的。

### 1 基于自然保护区生态价值的评估

生态价值评估最早是由 Margules<sup>[8]</sup>等提出 and 发展的, 在澳大利亚等国家得到广泛应用。薛达元等<sup>[14]</sup>针对我国自然保护区的实际情况, 通过建立评估指标体系 and 评估准则, 选取了多样性、代表性、稀有性、自然性、面积适宜性及脆弱性和人类威胁等逐项指标, 对自然保护区的生态状况进行了定量评估。这种方法系统完整、操作简便, 但部分评估指标的赋分标准带有一定的主观性。李霄宇<sup>[15]</sup>和王学雷等<sup>[16]</sup>分别在三江平原湿地 and 洪湖湿地自然保护区的综合评估中选取了生态系统保护价值、珍惜濒危物种保护价值、生境安全性

**基金项目** 国家环境保护公益性行业科研专项(201209028); 浙江省环保科研计划项目(2015A020)。

**作者简介** 汤博(1984—), 女, 江西上饶人, 工程师, 硕士, 从事自然保护区评估 and 生态学研究。\*通讯作者, 副研究员, 博士, 从事自然保护区评估 and 保护生物学研究。

**收稿日期** 2017-03-08

保护价值及地理代表性保护价值等指标,利用层次分析法和专家咨询法对自然保护区进行了生态价值评估。李培学等<sup>[17]</sup>从典型性、稀有性、脆弱性、多样性、面积大小、天然性、感染力、潜在保护价值、可研价值、经济效益和文化教育功能等方面,对河南鸡公山国家级自然保护区的保护价值进行了综合评估。袁国安等<sup>[18]</sup>和余昌元等<sup>[19]</sup>分别对轿子山自然保护区和无量山国家级自然保护区各植被类型的保护价值进行了定量对比评估分析,得出其保护区内各植被类型的保护价值高低,但其部分指标评判标准的制订存在很大程度的经验和主观成分,一定程度上缺乏科学性。

从森林类型自然保护区设立的目的——保护典型的森林生态系统及在其内部栖息的珍稀濒危野生动植物可以看出,一个保护区森林类型的生态价值应该体现在生物多样性丰富程度、所保护的生物物种受威胁程度、森林植被及珍稀濒危野生动植物的生境状况及由动植物等相互作用所形成的生态系统状况等方面。生境安全性及保护区代表性也是自然保护区生态价值的重要体现。

## 2 基于保护区内保护对象的评估

自然保护区的保护对象评估主要是基于自然保护区主要保护生态系统、重点保护野生动植物及其栖息环境等方面进行的评估。意大利的自然保护区监测和评估方法在评估自然保护区的有效性时,考虑的生态有效性指标包括生物多样性因素层的植物丰富度、动物丰富度、植被受威胁的程度、动物受威胁的程度以及水资源因素层的保护区地表水质、地下水水质等<sup>[20]</sup>。Weeks等<sup>[21]</sup>对菲律宾海洋保护区评估选取的评估指标包括保护区大小、保护区面积等。Greve等<sup>[22]</sup>通过监测研究南非鸟类,对自然保护区的生态有效性进行了评估,对比了同一种鸟类在自然保护区内和自然保护区外的数量和分布,结果表明,自然保护区内的鸟类数量比保护区外多,且分布面积更广。辛利娟等<sup>[11]</sup>有针对性地对通过超载牲畜数量、沙尘暴程度、退化种群数量和数量等参数对辉河自然保护区进行了保护成效评估。杨全生等<sup>[23]</sup>从年均高生长量、植物种数量、灌木盖度、灌木平均株高等方面对祁连山自然保护区的天然林保护工程进行了成效评估。杨道德等<sup>[12]</sup>以候鸟类国家级自然保护区为研究对象,通过候鸟数量变化、分布面积变化、种群规模变化等指标对青海湖自然保护区和东洞庭湖自然保护区等进行了保护成效评估。

由于保护对象的差异性,目前对森林类型自然保护区评估的内容尚未统一,导致针对森林类型自然保护区保护对象进行成效评估的系统研究较少。

## 3 基于森林资源的评估

森林资源是以多年生木本植物为主体并包括以森林环境为生存条件的林内动物、植物、微生物在内的生物群落。联合国粮农组织实施的2005年全球森林资源评估计划通过选取森林范围、森林特征、蓄积、生物量储量、碳储量、森林灾害、木材产量与产值等14个指标对全球森林资源进行了评估<sup>[24]</sup>。以德国为代表的欧洲森林资源评估研究较早,特别是森林经济效益评估理论和方法的研究成果凝结着欧洲林

业学者的智慧<sup>[25]</sup>。瑞典曾经通过随机评估法(Contingent Value Method)来评估森林的景观价值和游憩价值<sup>[26]</sup>。2013年,陈瑜等<sup>[27]</sup>针对我国森林类型自然保护区保护成效评估工作,以内蒙古大兴安岭汗马国家级自然保护区为研究对象,从森林资源的动态变化入手,研究了1954—2001年汗马自然保护区林地资源地类、主要树种蓄积、龄级结构以及单位面积蓄积的变化,对保护区的森林资源进行了评估。结果表明,保护区保护成效显著,森林资源得到了有效保护,保护区的功能得到了有效发挥。

由于森林资源价值的不确定性、模糊性,生态过程和经济过程以及两者之间联系的复杂性,使森林资源的评估难度增加。

## 4 基于森林健康的评估

森林健康的实质是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,是实现人与自然和谐相处的必要途径<sup>[28]</sup>。自然保护区的森林健康评估主要基于森林恢复力,即森林生态系统向人类提供需要、维持自身复杂性的一种状态。Costanza等<sup>[29]</sup>于1992年构建了VOR模型,评估了森林系统的健康;欧洲安全与合作组织于1992年率先提出了森林可持续经营的标准和指标体系。在此基础上,1995年发布圣地亚哥宣言签署了7个国际性的指标体系和67个具体指标用来评估森林生态系统的健康。2003年,甘敬等<sup>[30]</sup>通过构建BP神经网络,将林分层次结构、病虫害程度和土壤厚度3个因子作为评估指标,对北京八达岭林场进行了森林健康快速评估。2010年,张桓<sup>[31]</sup>构建了森林健康评估指标体系,选取了群落层次结构等18个指标,对华北地区百花山自然保护区、塞罕坝自然保护区和庞泉沟自然保护区进行了评估。

目前有些森林健康评估中,参评因子偏重于生态水平,选取的指标主要局限于森林环境或森林结构单方面<sup>[32]</sup>,以至于难以准确地反映森林健康状况。

## 5 基于保护区生态系统服务功能的评估

近年来,国际上十分重视生态系统功能的研究。1991年国际科学联合会环境委员会专门讨论了如何进行生物多样性的定量研究;Constanza等<sup>[29]</sup>综合了国际上已经出版的用各种不同方法对生态系统服务价值进行评估的结果,在世界上最先对全球生物圈生态系统服务价值进行了估算;Tang等<sup>[33]</sup>应用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)评估自然保护区的植物生产力。我国自20世纪80年代开展了森林生态系统服务功能评估工作。1983年,中国林学会开展了森林综合效益研究,侯元兆等<sup>[34]</sup>首次全面地对我国森林资源涵养水源、防风固沙、净化空气价值进行了评估;欧阳志云等<sup>[35]</sup>在大量生态学研究的基础上,采用生态经济学方法,从有机物质的生产、维持大气CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的平衡、营养物质的循环和储存、水土保持、涵养水源、生态系统对环境污染的净化作用等方面,初步对我国陆地生态系统功能价值进行了估算。宗雪<sup>[36]</sup>以卧龙自然保护区为例,对我国森林类型自然保护区生态系统服务价值进行了评估

研究,运用层次分析和专家咨询等方法构建了森林类型自然保护区生态系统服务的价值评估体系,对卧龙自然保护区的生态系统服务价值进行了评估分析。

生态系统服务功能范围很广,加上许多用于生态系统服务价值评估的经济学方法都存在局限,目前的研究计算出的森林生态系统服务价值并不能涵盖其为人类提供的全部服务。

## 6 展望

自然保护区保护成效评估注重的是在一定时间尺度和空间尺度过程中的动态变化,应通过尽量少的并具有代表性的指标来多层次地反映出自然保护区各方面情况,但无论是现有的基于保护区生态价值、保护对象的评估、森林资源评估,还是森林健康评估、基于保护区生态系统服务功能的评估,都偏向于对森林类型自然保护区的现状评估。目前基于保护区生态系统服务功能的评估所引用的参数难以精确反映各类保护区生态系统功能的真实状况,仅仅是对森林生态系统各项服务功能及其价值粗略和保守的估计。我国在森林类型自然保护区成效评估中仍缺少一套科学完整、全面的保护成效评估指标体系及评估方法。

基于国内外研究进展,笔者结合我国森林类自然保护区自身特点,并遵循科学性、系统性、动态性和综合性的原则,尝试构建了我国森林类型自然保护区保护成效评估指标体系。该指标体系分为5个因素层13个评估指标。该指标体系选取的评估因素是保护区的完整性、多样性、代表性、稀有性及生态系统服务功能。选取的指标均为动态指标,反应自然保护区建立前后生物多样性保护的动态变化,即自然保护区的保护成效。选择的评估指标及数据来源等见表1。

表1 我国森林类型自然保护区保护成效指标体系

Table 1 The effectiveness index system of Forest Nature Reserve in China

因素层 Factor layer	评估指标 Evaluation index	数据来源 Data sources
完整性 Integrity	森林覆盖度变化 森林破碎度变化	遥感解译 遥感解译、模型
多样性 Diversity	物种丰富度变化 生态系统多样性变化	样方及调查 样方及调查
代表性 Representativeness	指示物种种类变化 指示物种数量变化 代表性生态系统分布面积变化	样方及调查 样方及调查 遥感解译及调查
稀有性 Rarity	珍稀濒危物种种类变化 珍稀濒危物种数量变化	样方及调查 样方及调查
生态系统服务功能 Ecosystem service function	生物量变化 涵养水源功能变化 净化空气功能变化(净化SO <sub>2</sub> 价值变化、滞尘价值变化)	样方及调查、植被覆盖指数(NDVI)估算 模型估算 模型估算

自然保护区生态保护成效评估的意义在于其动态反映自然保护区的保护效果,从客观角度说明自然保护区建立的意义。笔者综合分析了国内外在自然保护区保护成效评估

方面的研究成果,尝试构建了森林类型自然保护区的生态保护成效评估指标体系。下一步将在典型森林类型自然保护区进行保护成效案例研究,在研究过程中对该指标体系(表1)验证,完善适合我国的森林类型自然保护区保护成效评估机制,从而更好地引导森林类型自然保护区提升保护效果,使生物多样性得到更好的保护。

## 参考文献

- [1] 唐小平. 中国自然保护区网络现状分析与优化设想[J]. 生物多样性, 2005, 13(1): 81-88.
- [2] 马建章. 自然保护区学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1992.
- [3] CHAPE S, HARRISON J, SPALDING M, et al. Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets[J]. Philosophical transaction of the royal society B, 2005, 360: 443-455.
- [4] ANDAM K S, FERRARO P J, PFAFF A, et al. Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation[J]. PNAS, 2008, 105(42): 16089-16094.
- [5] NAGENDRA H. Do parks work? Impact of protected areas on land cover clearing[J]. Journal of the human environment, 2008, 37(5): 330-337.
- [6] HOCKINGS M, STOLTON S, LEVERINGTON F, et al. Evaluating effectiveness: A framework for assessing the management of protected areas [M]. Switzerland: Union Internationale pour la Conseroation de la Nature et de ses Ressources, 2000.
- [7] STOLL-KLEEMANN S. Evaluation of management effectiveness in protected areas; Methodologies and results[J]. Basic and applied ecology, 2010, 11(5): 377-382.
- [8] MARGULES C R, PRESSEY R L. Systematic conservation planning[J]. Nature, 2000, 405: 243-253.
- [9] SCOTT J M, DAVIS F W, MCGHIE R G, et al. Nature reserves; Do they capture the full range of America's biological diversity? [J]. Ecological applications, 2001, 11(4): 999-1007.
- [10] GASTON K J, JACKSON S F, CANTÚ-SALAZAR L. The ecological performance of protected areas[J]. Annual review on ecology evolution systematics, 2008, 39: 93-113.
- [11] 辛利娟, 王伟, 靳勇超, 等. 全国草地类自然保护区的成效评估指标[J]. 草业科学, 2014, 31(1): 75-82.
- [12] 杨道德, 邓娇, 周先雁, 等. 候鸟类型国家级自然保护区保护成效评估指标体系构建与案例研究[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1891-1898.
- [13] 中华人民共和国环境保护部. 全国自然保护区名录[EB/OL]. (2016-11-08)[2017-01-22]. <http://www.zhb.gov.cn/stbh/zrbhq/qgzrbhqml/>.
- [14] 薛达元, 郑允文. 我国自然保护区有效管理评价指标研究[J]. 农村生态环境(学报), 1994, 10(2): 6-9.
- [15] 李霄宇. 国家级森林类型自然保护区保护价值评价及合理布局研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [16] 王学雷, 蔡述明. 洪湖湿地自然保护区综合评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, 40(2): 279-281.
- [17] 李培学, 张照喜, 张学顺. 试论河南鸡公山国家级自然保护区的保护价值[J]. 河南林业科技, 2000, 20(3): 8-12.
- [18] 袁国安, 余昌元. 轿子山自然保护区类型及其保护价值评价[J]. 林业调查规划, 2005, 30(5): 39-42.
- [19] 余昌元, 苏文华. 无量山国家级自然保护区植被保护价值评价[J]. 林业调查规划, 2007, 32(5): 51-54.
- [20] UYCHIAOCO A J, ARCEO H O, GREEN S J, et al. Monitoring and evaluation of reef protected areas by local fishers in the Philippines; Tightening the adaptive management cycle[J]. Biodiversity and conservation, 2005, 14(11): 2775-2794.
- [21] WEEKS R, RUSS G R, ALCALA A C, et al. Effectiveness of marine protected areas in the Philippines for biodiversity conservation[J]. Conservation biology, 2009, 24(2): 531-540.
- [22] GREVE M, CHOWN S L, RENSBURG B V, et al. The ecological effectiveness of protected areas: A case study for South African birds[J]. Animal conservation, 2011, 14(3): 295-305.
- [23] 杨全生, 汪有奎, 李进军, 等. 祁连山自然保护区天然林保护工程的成效分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2015(1): 89-95.

表 4 主要景观优势植物重金属含量

Table 4 Heavy metal contents of dominant landscape plants

mg/kg

植物名称 Plant name	组织 Tissue	含量 Content				
		Cu	Zn	Pb	Cd	Mn
木薯 <i>Manihot esculenta</i> Crantz	叶	19.36	568.98	9.94	0.89	2 835.10
	茎	123.61	515.04	44.47	0.65	1 363.70
	根	135.32	342.17	35.21	1.01	1 678.20
银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	叶	23.85	49.05	3.83	0.22	485.60
	茎	14.77	35.31	0.88	0.57	257.20
	根	5.60	7.75	0.27	0.43	46.50
类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> (kunth.) Keng	地上部	10.83	242.87	10.05	1.01	1 671.80
	根部	99.88	262.67	104.01	3.11	3 594.30
金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> Linnaeus cv. Golden Leaves	叶	23.77	674.06	6.55	1.22	751.40
	茎	26.23	189.95	7.89	0.69	278.10
	根	30.21	237.12	8.32	1.46	290.40
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	叶	11.94	1 443.00	9.48	0.88	24 682.00
	茎	10.25	820.13	3.23	1.38	9 770.20
	根	36.17	193.16	18.72	1.56	3 757.60

表 5 主要景观优势植物生物富集系数(BCF)和转运系数(TF)

Table 5 Bioconcentration factor(BCF) and transfer factor(TF) of dominant landscape plants

植物名称 Plant name	Cu		Zn		Pb		Cd		Mn	
	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF
木薯 <i>Manihot esculenta</i> Crantz	0.122	0.143	2.859	1.663	0.074	0.282	0.286	0.881	1.029	1.689
银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	0.331	4.259	0.263	6.333	0.014	14.185	0.196	0.512	0.177	10.439
类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> (kunth.) Keng	0.018	0.108	0.040	0.925	0.002	0.097	0.035	0.325	0.008	0.465
金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> Linnaeus cv. Golden Leaves	0.024	0.787	0.275	2.843	0.002	0.787	0.061	0.836	0.012	2.587
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	0.026	0.330	2.080	7.470	0.006	0.506	0.255	0.564	1.360	6.569

(2) 土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Mn 均不同程度的污染,与重金属污染场地土壤修复标准(DB43-T-1125-2016)相比,类芦土、金叶假连翘土、杉木土 Mn 含量均远超修复标准值,为标准限值的 3.63~40.52 倍,污染严重。

(3) 5 种景观优势植物中,杉木对 Mn 具有超富集能力,可应用于 Mn 污染土壤修复,金叶假连翘对强酸性土壤适应性较强,可应用于酸污染土壤修复。

#### 参考文献

- [1] KUMAR P B A N, DUSHENKOV V, MOTTO H, et al. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils[J]. Environmental science and technology, 1995, 29(5): 1232-1238.
- [2] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR P B A N, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Bio-technology, 1995, 13(5): 468-474.
- [3] WATANABE M E. Phytoremediation on the brink commercialization[J]. Environmental science and technology News, 1997, 31(4): 182-186.
- [4] DUSHENKOV V, KUMAR P B A, MOTTO H, et al. The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams[J]. Environmental science and technology, 1995, 29(5): 1239-1245.

- [5] PIERRE M, NATHALIE V I. Heavy metal tolerance and accumulation in metallicolous and non-metallicolous populations of *Thlaspi caerulescens* from continental Europe[J]. Plant ecology, 1997, 133(2): 221-231.
- [6] 叶文玲, 陈增, 徐晓燕. 铜菱铜尾矿库优势植物对重金属富集特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 11-20.
- [7] 赵甲亭, 李云云, 高愈希, 等. 贵州万山汞矿区耐汞野生植物研究[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5): 881-887.
- [8] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3595-3600.
- [9] 杨晓庆, 柏亮, 程涛. 电镀污染区植物重金属积累特征研究[J]. 环境保护科学, 2015, 41(2): 114-117.
- [10] BROOKS R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals[M]. Wallingford: CAB International, 1998.
- [11] LINDSAY W L, NORVELL W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. Soil science society of america journal, 1978, 42(3): 421-428.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [13] BAKER A J M, BROOKS R R, PEASE A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre[J]. Plant and soil, 1983, 73(3): 377-385.

(上接第 62 页)

- [24] FAO. Sustainable Management of Tropical Forests in Central African Search of Excellence[Z]. 2005.
- [25] IAN B. Placing money values on the unpriced benefits of forestry[J]. Quarterly journal of forestry, 1991, 85(3): 152-165.
- [26] 孔繁文, 戴广翠. 瑞典、芬兰森林资源与环境核算考察报告[J]. 林业经济, 1995(1): 76-80.
- [27] 陈瑜, 崔国发, 谷建才, 等. 内蒙古汗马国家级自然保护区森林资源动态变化[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(3): 26-29.
- [28] 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.
- [29] COSTANZA R, D'ARCE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [30] 甘敬, 朱建刚, 张国祯, 等. 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.
- [31] 张桓. 华北地区自然保护区森林健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [32] TIEDEMANN A R, KLEMMEDSON J O, BULL E L. Solution of forest health problems with prescribed fire: Are forest productivity and wildlife at risk? [J]. Forest ecology and management, 2000, 127(1/2/3): 1-18.
- [33] TANG Z Y, FANG J Y, SUN J Y, et al. Effectiveness of protected areas in maintaining plant production[J]. Plos one, 2011, 6(4): 1-8.
- [34] 侯元兆, 王琦. 中国森林资源核算研究[J]. 世界林业研究, 1995(3): 51-56.
- [35] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [36] 宗雪. 森林类型自然保护区生态系统服务价值评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.