

祁连山水源林经营模式研究

李金良¹, 郑小贤², 陆元昌³, 刘波⁴

(1. 中国绿色碳汇基金会, 北京 100714; 2. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 3. 中国林业科学研究
院 资源信息研究所 北京 100091; 4. 山东省东平县园林绿化局, 山东 东平 271500)

摘要: 水源林经营系统是一个复杂系统, 关系着中国的水资源和生态安全, 意义重大。为适应祁连山水源林经营管理实践和西部生态建设的需要, 在实地调查的基础上, 采用复杂性科学的新理论与新方法提出了一个有科学依据的、定量化、可操作的祁连山水源林经营模式, 创新了原来的经营模式。该模式融合了水源林经营理论、水源林目标体系、水源林经营原则、水源林目标结构体系和水源林经营技术体系。该模式通过改善水源林结构, 实践水源林的可持续经营, 逐步实现水源林经营的生态效益、社会效益和经济效益目标, 从而提供中国河西走廊地区稳定的优质水资源, 促进该地区可持续发展和应对全球气候变化。根据该模式, 对祁连山水源林区现有青海云杉 *Picea crassifolia* 林经营提出了经营建议。该模式对提高该区水源林的经营水平和经营效益具有现实指导意义。表 1 参 30

关键词: 森林经理学; 水源林; 复杂性科学; 经营模式; 经营建议; 祁连山

中图分类号: S750 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2012)06-0947-07

Management model for watershed forests in Qilian Mountains

LI Jin-liang¹, ZHENG Xiao-xian², LU Yuan-chang³, LIU Bo⁴

(1. China Green Carbon Foundation, Beijing 100714, China; 2. Collge of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Dongping County Enterprise of Landscape, Dongping 271500, Shandong, China)

Abstract: The watershed forest management system is a complexity system, and is important for protecting our national water resources and ecological environment safety. In order to meet the needs of the watershed forest management practice in Qilian Mountains and the ecological environment construction in western China, based on field investigations and new theories and methods of complexity science, a scientific, quantitative and operational watershed forest management model is set up. The watershed forest management theories, management objectives, management principles, target forest structure and management technique system are integrated in this new model. Through improving the forest structure and practicing sustainable watershed forest management, the ecological, social and economic benefits from the watershed forest management will be gradually realized. And it will promote steady high quality water supply and the sustainable development for Hexi Corridor Area in China, and help to address global climate change. The management technical suggestions for the existing *Picea crassifolia* (Qinghai spruce) forests in Qilian Mountains are put forward. [Ch, 1 tab. 30 ref.]

Key words: forest management; watershed forest; complexity science; management model; management suggestion; Qilian Mountains

收稿日期: 2012-04-20; 修回日期: 2012-06-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0502)

作者简介: 李金良, 高级工程师, 博士, 从事森林可持续经营管理、林业项目管理、林业应对气候变化等研究。E-mail: lijnliang8207@sina.com

被称为“21 世纪的科学”的复杂性科学是研究复杂系统的科学。复杂系统的内涵,科技界尚未统一。中国科学院戴汝为院士认为,复杂系统是具有复杂行为的系统,表现在系统的部件之间有着很强的耦合关系,具有难以线性化的非线性性质,系统具有高度的不确定性和实时性,而且难以用传统的方法建立系统的数学模型。其整体功能不等于部分功能之和。如生物系统、经济系统等属于复杂系统,而一般人造系统属于简单系统^[1-14]。水源林经营管理系统涉及以人为核心的,有思维的所有者和经营者等利益相关方,还涉及乔木、灌木、草本、动物、微生物等生命系统以及与其相关的太阳辐射、温度、水分、土壤、风、火等自然环境系统,以及社会经济发展对水源林多功能和服务的需求。可见,水源林经营管理系统涉及生物系统、自然环境系统、经济系统和社会系统等,是一个开放的复杂系统。所以,水源林经营管理的改革与创新,要在方法论上突破“还原论”。水源林经营关系着国家的水资源安全和生态安全。然而,国内对水源林经营理论和技术体系的研究整体上还比较薄弱,尚处在试验探索阶段,且已有研究多数为自然科学或社会科学的单项研究^[9-25],难以满足当前水源林经营实践的需求。实践中,因缺乏科学可行的经营模式,水源林经营通常比较粗放,其功能也较低下。因此,为了满足新时期中国建设现代林业,促进绿色增长和水源林经营实践的需要,迫切需要开展水源林经营模式的改革创新和研究实践。本研究定义水源林经营模式是根据需求和条件,以人为本,融合了经营理论、经营目标、经营原则、目标结构与经营技术措施等与水源林经营有关的要素的有机系统。水源林经营模式,应考虑水源林经营管理系统复杂性,对水源林经营应具有全面指导意义。水源林经营的理论和技术,最终由它来体现,通过其在生产经营中的实践应用来转变为现实生产力,发挥水源林的主导功能和多重效益。祁连山区土地总面积约 $7.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中祁连山国家级自然保护区土地总面积 $2.65 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。现有水源林面积为 $4.316 \times 10^5 \text{ hm}^2$,活立木蓄积量为 $2.3 \times 10^7 \text{ m}^3$,森林覆盖率 16.5%。水源林树种的面积组成为:青海云杉 *Picea crassifolia* 林占 24.8%,祁连圆柏 *Sabina przewallkii* 林占 3.7%,灌木林占 67.4%,其他类型占 4.1%。该水源林区关系着中国西北河西走廊绿洲的水资源及生态安全,是 400 多万河西人的生命线。国内有些学者对该区水源林开展了植被分布、经营现状、效益评价、功能与结构等方面的研究^[12-14,21-23]。但是在水源林经营中仍然缺乏科学、实用的经营模式。本研究的目的,在于尝试采用复杂性科学的理论与方法,基于实地调查资料,研究提出祁连山水源林的经营目标、经营原则、经营技术等经营模式要素,进而构建适合祁连山实际的水源林经营模式,为该区水源林经营提供理论依据和方法论基础。

1 研究方法

复杂系统研究方法突破了在科技界长期占统治地位的“还原论”,强调要把复杂性当作复杂性来研究和处理,提出了“从定性到定量的综合集成”的方法论为代表的处理复杂系统的新理论与方法。为提出科学、合理、可操作的祁连山水源林经营模式,本研究采用复杂性科学的理论与方法对水源林经营这个复杂系统进行整合研究,注重社会需求和人在水源林经营管理系统中的重要性。具体采用理论与实践相结合,定性判断与量化相结合,微观分析与宏观综合相结合,还原论与整体论相结合,野外调查与科学推理、专家咨询相结合等复杂性科学研究综合集成法^[1-8,10]。

2 祁连山水源林经营目标与经营原则的确定

2.1 经营目标

根据祁连山水源林实际情况和社会经济发展的实际需求,研究确定祁连山区水源林经营的总目标和 3 个子目标。

总目标:通过科学经营管理,逐步调整、优化该区水源林结构,以充分发挥该区水源林经营的生态效益、社会效益和经济效益等多重效益,实现该区水源林的可持续经营管理,为中国河西走廊社会—经济—生态复合系统提供稳定的优质水资源,促进该复合系统的健康稳定和可持续发展,增强应对全球气候变化的能力。

子目标:①生态服务功能目标。长期维持和增强祁连山区水源林的健康和活力;保护森林生物多样性;增强森林碳汇功能;提升涵养水源、保持水土、改善水质等主导功能,为河西走廊长期提供稳定的优质水资源,并为减缓与适应全球气候变暖做贡献。②社会服务功能目标。长期满足社会对该区水源林

的生态旅游、休闲保健、森林文化与森林美学、环保教育、科学研究、就业等多种社会服务和福利的需求。③经济功能目标：在不影响主导功能发挥的同时，为河西走廊社会经济发展和当地居民生活提供优质的木材和林副产品，促进绿色增长，提高水源林经营者的经济效益、生存质量和适应气候变暖的能力。

2.2 经营原则

根据该区水源林经营目标和实地条件，研究确定该区水源林经营中应遵循的主要原则：①以天然更新为主；②选择乡土树种进行树种结构调整；③采用单株择伐；④封山禁牧，以保护亚高山灌木林和促进森林的天然更新。

3 祁连山水源林关键经营技术措施的确定

根据实地调查结果和条件，整合水源林经营理论，该区水源林经营目标、经营原则以及有关水源林结构与功能、结构调整的研究基础^[10]，确定以下水源林关键经营技术措施，用于制定该区水源林经营技术体系以指导生产实践。

3.1 更新造林技术措施

总则：以天然更新为主，注重采用人工促进天然更新和封山禁牧育林技术措施，确保祁连山水源林的更新，实现多种功能的延续。①树种选择：鉴于祁连山属于高寒干旱半干旱地区，目前生态环境条件整体上脆弱和恶劣的实际，在更新树种选择时更加强调因地制宜，优先选择耐高寒、抗干旱、低耗水、耐瘠薄的乔灌木乡土树种。根据实地调查和已有资料^[21-23]，适合海拔2 300~2 500 m的阴坡、半阴坡、半阳坡灌丛带的灌木树种主要有狭叶锦鸡儿 *Caragana stenophylla*，中亚紫菀木 *Astero thamnus*，灌木亚菊 *Ajania fruticulosa* 等；适合干热河谷地带的灌木树种有沙棘 *Hippophae rhamnoides* 和旱柳 *Salix matsudana* 等；适合海拔2 500~3 300 m的中山区的阴坡、半阴坡常绿针叶林带的乔木乡土树种主要有青海云杉 *Picea crassifolia*。此外，还有祁连圆柏 *Sabina przewalskii*，山杨 *Populus davidiana* 和白桦 *Betula platyphylla* 等，适合林下的乡土灌木树种主要有山生柳 *Salix oritrepha*，吉拉柳 *Salix gilasanica*，鬼箭锦鸡儿 *Caragana jubata*，银露梅 *Dasiphora clavurica*，鲜黄小檗 *Berberis diaphana*，叉子圆柏 *Sabina vulgaris* 和沙棘 *Hippophae rhamnoides* 等，另外，适合河谷地带的乔木乡土树种有小叶杨 *Populus simonii* 和白榆 *Ulmus pumila* 等；适合海拔3 300~3 800 m亚高山湿性灌丛林草甸带的乡土灌木树种，在阴坡和半阴坡主要有百里香杜鹃 *Rhododendron thymifolium*，青海杜鹃 *Rhododendron przewalskii*，吉拉柳，山生柳 *Salix oritrepha*，鬼箭锦鸡儿和高山绣线菊 *Spiraea alpine* 等，阳坡、半阳坡主要有金露梅 *Dasiphora fruticosa*。②森林更新：本研究提出“单株择伐—小面积林隙—天然更新”技术，对青海云杉林采用单株择伐，将林分郁闭度调控在0.4~0.7，造就一些小面积的林隙(林隙面积<200 m²)，以改善林内光环境，促进森林的天然更新，局部条件恶劣的地段辅以其他人造促进措施。③宜林地及疏林地造林：鉴于祁连山的森林覆盖率低，超载放牧严重，生态环境脆弱的实际情况，强调封山禁牧育林的突出重要性。以封山禁牧育林为主，局部立地条件恶劣的地段辅以人工更新或人工促进天然更新。④保障措施：封山禁牧或围栏封育，确保森林更新成功。该措施，特别符合祁连山水源林更新的现实需要。调查表明，过度放牧、牛羊群践踏啃食是造成该区水源林造林失败的主要原因。因此，在该区要严格实施封山禁牧育林或围栏封育等更新造林保障措施，以保证森林植被人工更新和天然更新成功。

3.2 林分抚育技术措施

鉴于该区水源林的自然环境条件和主要树种的特殊性，确定密度调整的抚育技术措施如下：①综合抚育措施。为了改善林内光环境，优化现有林分的结构，培育符合目标结构的水源林，充分发挥其多种功能，对中幼龄林采用打枝、间伐、单株木利用等多种技术措施，调控树冠结构与林分空间结构，使林分郁闭度、冠高比维持在目标结构范围，增大林分的混交度，缓和林木间的竞争，使林木分布格局趋于随机分布，以改善林内光环境，促进森林天然更新及灌木层、草本层、凋落物层的发育，增进林分健康。②水源安全保障措施。不使用有毒化学药品和化肥。

3.3 采伐利用技术措施

采用单株择伐利用技术体系。理由主要有4点：①该区森林草原带自然环境很脆弱，容易退化，应该采用对生态环境的负面影响比较小的利用方式。已有实践证明，单株择伐利用后，仍然有森林植被连

续覆盖地表,对生态环境及生物多样性等负面影响很小,水源林主导功能不会中断,并且森林的生产功能能够得到提高,因此,单株择伐利用方式是一种适合于该区青海云杉林实际的最佳利用方式。②这种利用方式可以解决青海云杉天然林中林木数量成熟的时点差异问题,便于适时采伐利用,提高经营者的经济收益。③这种利用方式对当地木材市场的需求变化具有较强适应性,有助于经营者根据市场需求进行采伐决策,从而提高经营者的经营收益,刺激经营者科学经营水源林的积极性。④这种利用方式具有调整、优化水源林林分树种结构、年龄结构、层次结构,促进森林更新的作用,有助于逐步将现有青海云杉纯林改建成复层混交异龄林,增进森林健康。这种单株择伐利用方式把青海云杉水源林的木材利用与其天然更新完美结合起来,解决了困惑祁连山森林经营者多年的青海云杉林下天然更新不良的问题。在利用木材、获得经济收益的同时,促进了林下灌木及草类的生长发育,有利于多层次森林群落结构的形成,达到了调整优化水源林林分结构的目的。

根据祁连山水源林区青海云杉林的实际,对单株采伐利用技术做如下规定:①单株个体采伐利用时,要按间隔1倍树高的原则确定下一株相邻最近的采伐木,使形成的青海云杉林隙在 100 m^2 左右,不超过 200 m^2 ,以保证林地长期的相对连续覆盖和森林更新。②在单株个体采伐利用中,1次采伐的蓄积择伐强度要控制在伐前林分蓄积量的15%以下,采伐量不超过 $20\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,伐后郁闭度控制在0.4~0.7,立地条件差的地方取下限,立地条件好的地方取上限,一般情况下以0.6为宜;伐后保留木(胸径 $\geq 5.0\text{ cm}$)株数密度为 $800\sim 1\ 500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中小径木(胸径 $\leq 12.9\text{ cm}$),中径木(胸径 $13.0\sim 24.9\text{ cm}$),大径木(胸径 $\geq 25.0\text{ cm}$)的蓄积比例以2:3:5或2:4:4为宜。根据调查,中等立地条件下青海云杉林年均蓄积生长量为 $3.5\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右,因此,间隔期为10 a左右,也可根据市场需求及具体林分生长情况灵活确定,采伐对象通常为大径木,也可以是中径木、小径木。在中径材、小径材畅销时可适当择伐部分过密的林木,既调整了林分结构,又有一定的经营收入。③集材方式,在祁连山林区,尤其强调集材作业要尽量减少对生态环境负面的影响和对更新幼树的伤害,可采用畜力或人力集材方式。

3.4 流域森林景观要素配置技术

在流域景观层次,不同林分类型的斑块要形成与流域各部位立地条件和水源保护需要相适应的镶嵌分布格局,并且异质结构的森林镶嵌体要尽量构成流域景观的优势景观要素,森林景观要素比例至少在0.3以上。

4 祁连山水源林经营模式的构建

本研究在尊重森林、与森林和谐共存、长期维持和不断增强水源林健康稳定以及可持续经营等理念的指导下^[10-13,28-30],以森林生态系统经营理论和近自然森林经营理论为基础^[24-27],采用复杂性科学的理论与方法,整合本研究有关水源林结构与功能关系及其机制、防护成熟理论、结构调整理论与方法^[10]、经营目标与经营原则、目标结构、经营技术措施的成果,提出有科学依据的、量化、可操作的祁连山水源林经营模式(表1)。该森林经营模式,通过科学经营管理,逐步调整水源林结构,充分发挥水源林经营的生态效益、社会效益和经济效益,从而实现该区水源林的可持续经营管理,为河西走廊社会—经济—生态复合系统提供稳定的优质水资源、促进该复合系统的健康稳定和持续发展以及应对全球气候变化做贡献。

5 结论与讨论

本研究采用复杂性科学研究的理论与方法,提出了一个有科学依据的、量化、可操作的水源林经营模式,该模式整合了水源林经营理论基础、水源林目标体系、水源林经营原则、水源林目标结构体系、水源林经营技术体系,创新了该区水源林经营模式,对祁连山水源林经营具有全面指导意义,对提高该区水源林的经营水平和经营效益具有现实指导意义。

根据该经营模式中郁闭度目标值,可将祁连山水源林区现有青海云杉林分划分偏密(郁闭度 >0.7),合理(郁闭度为0.4~0.7),稀疏(郁闭度 <0.4)等3类。建议采用以下措施调整其林分结构,将林分郁闭度调控在0.5左右,不超出0.4~0.7的范围。①对偏密的林分,为了避免过大的波动,通过单株采伐,将郁闭度调整到0.6,并进行打枝,将冠高比调整到0.4~0.5,促进森林更新,诱导多层次群落结构的形

表1 祁连山水源林经营模式

Table 1 Management model for watershed forests in Qilian Mountains

水源林经营理论		水源林经营目标体系		水源林目标结构体系		经营技术体系	
1 经营理念	(1)尊重并善待森林。 (2)长期维持和不断增强祁连山水源林健康稳定。 (3)可持续经营。	1 总目标 通过科学经营管理,逐步调整、优化该区水源林结构,以充分发挥该区水源林经营的生态效益、社会效益和经济效益等多重效益,实现该水源林的健康稳定,为中国河西走廊社会—经济—生态复合系统提供稳定的优质水资源,促进该复合系统的健康和可持续发展,增强应对全球气候变化的能力。	1 林分层次的目标结构 (1)群落层次结构:乔木层为2层林,郁闭度为0.4~0.7,林分有效叶面积指数为1.5左右,林分透光透度为0.3~0.4,冠高比为0.4~0.5;灌木层覆盖度为30%~50%,物种丰富度在4种以上,香农指数 >0.7 ,均匀度 >0.5 ;草本层覆盖度40%~60%,物种丰富度在7种以上,香农指数 >0.8 ,均匀度 >0.4 ;苔藓层厚度 <5.0 cm;凋落物层覆盖度 $>90%$,厚度为2.0~9.0 cm。 (2)树种结构:耐高寒、耐干旱、低耗水、耐瘠薄的乡土树种组成的混交林。 (3)年龄结构:异龄化。 (4)空间结构:林分混交度 >0 ,0.5左右,竞争指数 <7.0 ,分布格局为随机分布。 (5)土壤结构:土壤结构疏松,孔隙发达,渗透性能好。土壤平均容重为 $0.4\sim 1.0$ g·cm ⁻³ ;总孔隙度在65%~75%,非毛管孔隙度在9.0%~15.0%;土壤1.0 m厚的最大蓄水能力 ≥ 680 mm。	1 目标实现途径 (1)异龄复层混交林的近自然经营途径。 (2)人工林的近自然化改造和经营途径。 (3)模仿流域自然植被分布规律景观要素的镶嵌配置。	2 更新技术 (1)总则:以天然更新为主,注重采用人工促进天然更新和封山禁牧育林技术措施,确保祁连山水源林的更新。 (2)现有林更新(青海云杉林为主):强调采用单株择伐利用体系,将林分郁闭度调控在0.4~0.7,造就一些100~200 m ² 的小面积林隙以改善光环境,促进天然更新。 (3)宜林地疏林地造林更新:特别强调封山禁牧或围栏封育。 (4)保障措施:特别强调封山禁牧或围栏封育。		
2 指导理论	(1)近自然经营理论。 (2)生态系统经营理论。	2 子目标 (1)生态功能目标:长期维持和增强祁连山区水源林的健康和活力;保护森林生物多样性;增强森林碳汇功能;提升涵养水源、保持水土、改善水质等主导功能,为河西走廊长期提供稳定的优质水资源,并为减缓与适应全球气候变化做贡献。 (2)社会服务功能目标:长期满足社会对该区水源林的生态旅游、休闲保健、森林文化与森林美学、环保教育、科学研究、就业等多种社会服务和福利的需求。 (3)经济功能目标:在不影响主导功能发挥的同时,为河西走廊社会经济发展和当地居民生活提供优质木材和林副产品,促进绿色增长,提高水源林经营者的经济效益、生存质量和适应气候变化的能力。	3 抚育技术 (1)综合抚育措施:采用打枝、间伐、单株木利用等多种技术措施,调控树冠结构与林分空间结构,使林分郁闭度、冠高比维持在目标结构范围,增大林分的混交度,缓和林木间的竞争,使林木分布格局趋于随机分布,以改善林内光环境,促进森林天然更新及灌木层、草本层、枯落物层的培育,增进水源林健康。 (2)水源安全保障措施:不使用有毒化学药品和化肥。				
3 理论基础 ^[10]	(1)水源林结构与功能关系。 (2)水源林防护成熟理论。 (3)水源林结构调整理论。 (4)水源林经营目标。 (5)水源林经营原则。	2 流域景观层次的目标结构 (1)景观要素配置:海拔2 500~3 300 m的阴坡、山脊、陡坡、河流两侧以及土层深厚的缓坡地段优先配置水源林;流域内易于发生水土流失的景观要素比(如裸地、过度放牧地、坡度在25°以上的坡耕地)应控制在0.1以下;其他应配置灌丛(灌丛覆盖度40%~70%,草本层覆盖度 $\geq 50%$)和草地(覆盖度 $\geq 70%$);海拔3 300~3 800 m,以灌木林类型为主。 (2)森林景观要素的分布格局:多种森林类型构成的斑块镶嵌体,形成流域景观的底底,森林景观要素比 ≥ 0.3 。 (3)森林景观要素的类型结构:林分斑块类型多样化,各类型以乡土乔木灌木树种为主,天然林(近自然林)占森林景观要素面积的比例在0.5以上,生态稳定性高。 (4)森林景观要素的年龄结构:在林分层次要具有不同发育阶段的森林斑块。	4 利用技术 (1)单株择伐利用体系。相邻2株采伐木的空间间隔在1倍树高以上,伐后郁闭度维持在0.5左右,1次采伐的蓄积强度 $\leq 15%$,采伐量小于20 m ³ ·hm ⁻² ,间隔期根据市场需求、林分条件和采伐量小于生长量的原则确定。 (2)多功能利用:在不影响水源林主导功能发挥的前提下,可以适度开展科学研究、森林环境意识教育、生态旅游、野营、采集山野菜(蘑菇)、中药材、青海云杉种子,培育青海云杉等城市绿化用苗,在满足社会多种需求的同时,提高经营者经济效益。				

成, 增强主导功能和综合效益。②对合理的林分, 通过单株采伐和打枝, 将郁闭度调整到 0.5, 冠高比调整到 0.4~0.5, 促进林分的更新, 增强林分健康和主导功能。③对稀疏的林分, 不进行采伐, 采取封山禁牧育林, 有些地段人工引进当地的乡土阔叶树种, 改善林分结构, 提高水源林健康状况和增强主导功能。

根据理论分析和现有实践结果, 按照上述经营模式经营祁连山水源林, 可以培育结构合理、健康稳定的多层异龄林或混交林, 发挥良好的涵养水源、保持水土和改善水质功能, 特别适合青海云杉林的天然更新, 并且可以节省大量的森林更新费用, 森林经营成本较低, 经济效益、生态效益和社会效益明显。建议当地森林经营单位和林农, 在水源林经营实践中应用该森林经营模式。为了取得更好的水源林经营效益, 鉴于水源林经营管理系统是一个复杂系统, 该经营模式在应用时可随实际情况变化而做出适应性调整, 并在实践中进一步完善、创新和发展。

参考文献:

- [1] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, **13** (1): 3 - 10.
QIAN Xuesen, YU Jingyuan, DAI Ruwei. A new science field: open complex giant system and the methodology [J]. *Nat Mag*, 1990, **13** (1): 3 - 10.
- [2] 成思危. 复杂性科学探索[M]. 北京: 民主与建设出版社, 1999: 1 - 263.
- [3] 戴汝为. 钱学森论大成智慧工程[J]. 中国工程科学, 2001, **3** (12): 14 - 20.
DAI Ruwei. Qian Xue-sen's view on metasynthetic engineering [J]. *Eng Sci*, 2001, **3** (12): 14 - 20.
- [4] 戴汝为, 操龙兵. 一个开放的复杂巨系统[J]. 系统工程学报, 2001, **16** (5): 376 - 381.
DAI Ruwei, CAO Longbing. Open complex giant system [J]. *J Syst Eng*, 2001, **16** (5): 376 - 381.
- [5] 戴汝为. 系统科学与系统复杂性研究[J]. 系统仿真学报, 2002, **14** (11): 1411 - 1416.
DAI Ruwei. Research on system science and system complexity [J]. *J Syst Simulation*, 2002, **14** (11): 1411 - 1416.
- [6] 张嗣瀛. 复杂系统与复杂性科学简介[J]. 青岛大学学报, 2001, **16** (4): 25 - 28.
ZHANG Siying. A brief introduction to complexity systems and complexity science [J]. *J Qingdao Univ*, 2001, **16** (4): 25 - 28.
- [7] 范东平. 复杂性研究: 前沿与挑战[J]. 自然辩证法研究, 2001, **17** (8): 71 - 72.
FAN Dongping. Complexity studies: frontier and challenge [J]. *Stud Dialectic Nat*, 2001, **17** (8): 71 - 72.
- [8] 李海涛. 新世纪的挑战——生物复杂性研究[J]. 世界科技研究与发展, 2000, **22** (6): 64 - 67.
LI Haitao. The challenge of a new century: biocomplexity studies [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2000, **22** (6): 64 - 67.
- [9] 李昌哲, 郭卫东. 森林植被水源涵养效益的研究[J]. 林业科学, 1986, **22** (1): 7 - 10.
LI Changzhe, GUO Weidong. A study on the effect of protecting water source of forest vegetation [J]. *Sci Silv Sin*, 1986, **22** (1): 7 - 10.
- [10] 李金良. 水源涵养林经营模式研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004: 1 - 171.
LI Jinliang. *Study on Management Models for Water Resources Conservation Forests* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004: 1 - 171.
- [11] 李金良, 郑小贤. 北京地区水源涵养林健康评价指标体系的探讨[J]. 林业资源管理, 2004 (1): 29 - 34.
LI Jinliang, ZHENG Xiaoxian. The forest health assessment indicator system for the water conservation forests in Beijing area [J]. *For Resour Manage*, 2004 (1): 29 - 34.
- [12] 李金良, 郑小贤, 池建, 等. 祁连山水源涵养林经营现状分析和经营对策[J]. 北京林业大学学报, 2004, **26** (5): 89 - 92.
LI Jinliang, ZHENG Xiaoxian, CHI Jian, et al. Analysis of current management condition and countermeasures on the water resources conservation forests in Qilian Mountains [J]. *J Beijing For Univ*, 2004, **26** (5): 89 - 92.
- [13] 李金良, 郑小贤. 水源林经营目标与经营原则体系研究[J]. 西北林学院学报, 2007, **22** (6): 157 - 160.
LI Jinliang, ZHENG Xiaoxian. Study on the management objectives and principles of watershed forests [J]. *J Northwest For Univ*, 2007, **22** (6): 157 - 160.

- [14] 李金良, 郑小贤, 陆元昌, 等. 祁连山青海云杉天然林林隙更新研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30** (3): 124 - 127.
LI Jinliang, ZHENG Xiaoxian, LU Yuanchang, *et al.* Gap Regeneration of *Picea crassifolia* natural forest in Qilian Mountains [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30** (3): 124 - 127 .
- [15] 王礼先, 解明曙. 山地防护林水土保持水文生态效益及其信息系统[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997: 1 - 361.
- [16] 王威, 郑小贤, 杜丽侠. 北京山区水源林分结构与功能耦合关系[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39** (7): 22 - 24.
WANG Wei, ZHENG Xiaoxian, DU Lixia. Coupling relationship between stand structure and function of water conservation forest in Beijing mountainous areas [J]. *J Northeast For Univ*, 2011, **39** (7): 22 - 24.
- [17] 杨玉坡, 李自刚, 李信卫, 等. 长江上游(川江)防护林的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 3 - 532.
- [18] 余新晓, 于志民, 王礼先, 等. 水源保护林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 1 - 388.
- [19] 于志民, 王礼先. 水源涵养林效益研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 1 - 266.
- [20] 中国林学会. 长江中上游防护林建设论文集[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991: 1 - 492.
- [21] 傅辉恩, 车克钧, 刘建勋. 甘肃祁连山水源涵养林的研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1990, **26** (专集): 1 - 84.
FU Huien, CHE Kejun, LIU Jianxun. Study on the water resources conservation forests in Qilian Mountains in Gansu Province [J]. *J Lanzhou Univ Nat Sci*, 1990, **26** (supp): 1 - 84.
- [22] 刘兴聪. 青海云杉林[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1992: 1 - 387.
- [23] 王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布[J]. 西北林学院学报, 2001, **16** (增刊): 1 - 3.
WANG Jinye, CHANG Xuexiang, GE Shuanglan, *et al.* Vertical distribution of the vegetation and water and heat conditions of Qilian Mountains (north slope) [J]. *J Northwest For Univ*, 2001, **16** (supp): 1 - 3.
- [24] 郑小贤. 日本防护林的类型及其经营体系[J]. 林业资源管理, 1998 (2): 82 - 85.
ZHENG Xiaoxian. The types and management system of the protect forests in Japan [J]. *For Resour Manage*, 1998 (2): 82 - 85.
- [25] 郑小贤. 森林资源经营管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 1 - 249.
- [26] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 德国现代森林经营技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 66 - 134.
- [27] HATZFELDT H G. 生态林业理论与实践[M]. 沈照仁, 陈允适, 鲁路, 等译. 北京: 中国林业出版社, 1997: 1 - 259.
- [28] ARTHUR M A, COLTHARP G B, BROWN D L. Effects of best management practices on forest streamwater quality in eastern Kentucky [J]. *J Am Water Resour Assoc*, 1998, **34** (3): 481 - 495.
- [29] MISTRETTA P A. Southern forest resource assessment highlights: managing for forest health [J]. *J For*, 2002, **100** (7): 24 - 27.
- [30] 王立志, 金恒镛, 夏禹九, 等. 福山试验林水文过程中水化学变化之研究[J]. 中华林学季刊, 1997, **30** (2): 203 - 215.
WANG Lizi, JING Hengbiao, XIA Yujin, *et al.* Changes in chemistry in hydrological processes of the Fushan Experimental Forest [J]. *Quater J Chin For*, 1997, **30** (2): 203 - 215.