天然林资源保护一期工程生态成效评估
——以甘肃小陇山地区为例

孙传谆[1],甄 霖[2,3*],王 超[2,3],胡 洁[2,3],杜秉贞[4]

(1. 华南农业大学公共管理学院,广州 510642; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;
3. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049; 4. 荷兰瓦格宁根大学,荷兰 瓦格宁根 6700HB)

摘 要:天然林资源保护工程是在中国广泛开展的一项重要生态建设工程。本文在构建生态多元评估指标体系的基础上,评估工程实施的生态成效,对于其进一步决策与管理具有重要的科学意义。通过遥感、生态系统质量等多源数据融合,采用生态系统宏观格局、生态系统质量、生态系统服务等方面指标的现状和时空变化特征,评估小陇山地区天然林保护一期工程(2000-2010年)实施成效。结果表明:①工程实施后,小陇山地区落叶阔叶林、落叶阔叶灌木林、草地等生态系统类型的面积大幅度增加,生态系统宏观状况转好,其中黄河流域生态系统宏观状况转好趋势明显好于长江流域。②研究区叶面积指数(LAI)和最大植被覆盖度(FC)在2000-2010年期间的多年变化斜率分别为0.022和0.510,生态系统质量上升趋势明显。其中黄河流域改善程度高于长江流域。③2010年研究区固碳量为700.20 t/hm^2,相比工程初期的2000年增加了4.69%;工程实施之后的10年间,研究区水源涵养量呈增长趋势,土壤保持量亦呈增长趋势;就流域而言,黄河流域的生态系统服务的提升程度均更为明显。

关 键 词:天然林资源保护工程;生态系统宏观格局;生态系统质量;生态系统服务;小陇山;甘肃省

1 引言

生态系统及其服务是人类生存和经济社会可持续发展的基础(欧阳志云等, 2014)。生态建设工程可快速地改变区域生态系统格局,从而影响区域生态系统质量和服务(Wang et al, 2007; Zhen et al, 2014; 刘纪远等, 2014; Sun et al, 2015; 孙传谆等, 2015)。天然林资源保护工程(简称天保工程)是一项重要的生态建设工程。工程实施的目的在于通过公益林建设解决中国主要天然林区的休养生息和恢复发展问题,从根本上遏制生态环境恶化,保护生物多样性,促进社会经济的可持续发展(张志达, 2002; Liu et al, 2008)。针对天然林资源长期过度消耗而引起的生态环境恶化问题,2000年中国开始实施天保工程一期工程,实施时间为2000-2010年。

由于目前对于生态建设工程的生态系统宏观结构、质量以及服务的监测评估缺乏长期观察数据,导致融合遥感与GIS技术分析工程实施区域生态环境质量状况变化的研究不够深入(蔡博峰, 2009; 余新晓等; 2010; 张海燕等, 2016)。传统的监测评价方法由于无法描述工程区的长时间序列动态变化,且往往缺乏时空针对性(MA, 2005; 国家林业局, 2014),相关研究还不能深刻反映工程区生态环境时空变化规律。另外,气候因素是影响工程实施生态成效的重要因素,但由于气候因子与其他因

收稿日期:2016-08;**修订日期:**2017-02。

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目(2013BAC03B04); 国家自然科学基金项目(41601575) [**Foundation:** Technical Support Program of the Ministry of Science and Technology of China, No.2013BAC03B04; National Natural Science Foundation of China, No.41601575]。

作者简介: 孙传谆(1985–),男,博士,副教授,主要研究方向为土地利用变化对生态系统服务功能的影响,E-mail: suncz.11b@igsnrr.ac.cn。

通讯作者: 甄霖,女,研究员,博导,主要研究方向为资源生态与管理,E-mail: zhenl@igsnrr.ac.cn。

引用格式: 孙传谆, 甄霖, 王超, 等. 2017. 天然林资源保护建设一期工程生态成效评估: 以甘肃小陇山地区为例[J]. 地理科学进展, 36(6): 732-740. [Sun C Z, Zhen L, Wang C, et al. 2017. Assessment of the ecological effects of the first-phase natural forest protection project in the Xiaolongshan region, Gansu Province[J]. Progress in Geography, 36(6): 732-740.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.06.008

子耦合度较高，现有评估还难以减少气候因子的影响，导致工程的生态成效评估结果的科学性受到影响(邵全琴等, 2016)。

针对天保工程，传统天然林保护工程生态成效评估通常采用生态资源变化量(如森林覆盖率与森林蓄积量等)(屈红军等, 2012)、生态系统服务物质量和价值量(胡会峰等, 2006; 国政等, 2011)等方面选取指标对其生态成效进行评估。近年来，基于遥感与GIS技术融合评价方法获得发展，陶蕴之等(2016)等通过遥感手段获取天保工程区土地利用/覆被以及遥感反演数据，并基于年均植被覆盖度、景观格局指数和人类威胁因子构建天保工程实施成效评估指标体系，评估了西南地区天然林保护工程区生态成效，为天保工程区生态保护与恢复决策提供了科学依据。但总体上，已有的相关评估无论是评估方法还是评估指标的选择，都未能形成一套系统、全面的评估方法与指标体系，难以从生态系统格局、质量、服务等方面深入全面反映工程实施之后的生态成效。在时间尺度上，现有研究通常选择工程实施之初以及工程实施后的少数几个时间点上的数据评估工程实施成效，缺乏长时间序列基础数据，导致评估结果随机性增大，得出过高或过低的评估值。在空间尺度上，现有研究选取的评估区界大都以行政边界为主，对评估结果空间差异性的探讨通常难以与自然空间相匹配。

植被恢复是生态环境改善的前提。实施长江上游、黄河中上游工程区宜林荒山荒地造林绿化是天保工程的重要目标和任务。小陇山林区位于秦岭的西段，为长江流域与黄河流域的分水岭，是中国重要的生态屏障之一，也是生态系统最脆弱的地区之一。2000年开始，该地区与全国同步实施了天然林资源保护建设工程，其天保工程实施后生态环境变化对整个天保工程实施区域来说具有代表性和典型性。本文以长江流域和黄河流域为空间评估单元，融合了多源时空数据，从生态系统格局、质量、服务等方面全面监测和评估小陇山地区生态系统变化，在此基础上系统全面评估工程实施生态成效。在生态系统质量和生态系统服务等方面，通过工程期(2000-2010年)10年变化斜率或工程实施前后10年变化斜率对比反映长时间序列上生态变化特征。本文将有助于完善天保工程生态成效评估的理论、方法和指标体系，同时通过总结典型脆弱生态系统保护与建设的经验教训，为二期工程的进一步实施和调整提供实践指导。

2 数据与方法

2.1 研究区域概况

小陇山地区位于甘肃省东南部，地理坐标为104°22′E~106°43′E，33°30′N ~34°49′N，东西长212.15 km，南北宽146.15 km，年降水量为380~780 mm(图1)；属秦岭山脉西段，地跨长江、黄河两大流域，分处长江支流嘉陵江和和黄河支流渭河上游，是全国最大的国有林场群。林地经营总面积83.02万hm²，为兼有中国南北方特点的典型天然次生林区。区内土层浅薄贫瘠，水土流失严重，自然灾害频繁，生态环境较为脆弱(邵瑜, 2012)。行政区跨天水、陇南、定西三市的秦州、麦积、清水、武山、徽县、两当、礼县、漳县等八县(区)，下设21个国有林场。

2.2 生态系统宏观结构

研究区生态系统类型数据来源于环保部、中科院联合开展的“全国生态环境十年变化(2000-2010年)遥感调查评估”项目。一级类包括林地、草地、湿地、耕地、人工表面以及其他等6类。二级类分为阔叶林、针叶林、针阔混交林、稀疏林、草甸、草原、草丛等38类。数据基于MODIS数据、Landsat TM/ETM数据以及HJ-1卫星CCD等多源遥感数据源，结合野外调查和长期生态系统监测，采用人机交互分类进行遥感解译而生成，空间分辨率为30 m。生态系统一级分类精度为94%，二级分类精度达86%以上(张磊等, 2014; 欧阳志云等, 2015)。

本文通过分析小陇山地区2010年生态系统一级类面积、比例以及空间分布特征，探讨区域生态系统现状特征。同时利用邵全琴等(2010)建立的土地覆被转类指数(本文为生态系统转类指数(Eco-

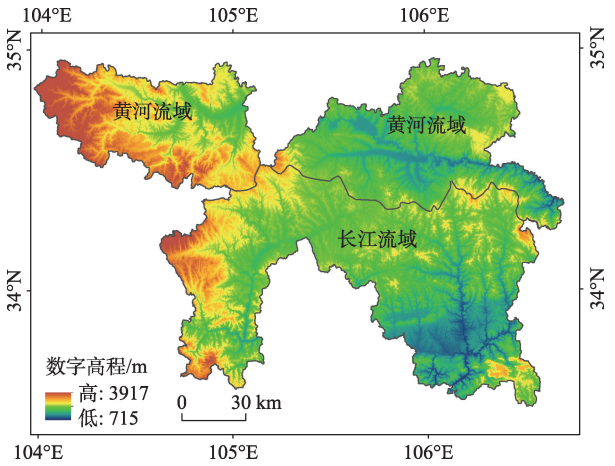


图1　研究区范围

Fig.1　The study area

system Change Index, ECI)来反映研究区2000-2010年生态系统宏观变化特征。按照各生态系统类型的自然禀赋及其生态意义,参照邵全琴等人(2010)对土地覆被类型生态级别的定义,去除受人类活动影响变化剧烈的人工表面,得到5种生态类型的级别(表1)。生态系统类型越接近1级,表示该生态系统类型的生态综合功能越高。对生态系统类型定级后,进行生态系统类型变化前后生态级别相减,结果为正值表示生态系统类型好转,值越大表示好转程度越大,反之则表示生态系统类型转差。生态系统转类指数计算公式为:

$$ECI=\frac{\sum_{k}^{n}[A_k\times(D_a-D_b)]}{A}\times 100\%$$

式中:ECI为生态系统转类指数,k=1,…,n表示生态系统类型,A_k为生态系统一次转类的面积,A为研究区总面积,D_a为转类前级别,D_b为转类后级别。

2.3 生态系统质量参数

本文以植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FC)和叶面积指数(Leaf Area Index, LAI) 2个参数作为生态系统质量是否改善的指示因子。数据来源于"全国生态环境十年变化(2000-2010年)遥感调查评估"项目,基于遥感数据,通过遥感反演、生态模型模拟等方式获得。数据空间分辨率为30 m。本文以2000-2010年连续10年的年均值及变化趋势(回归曲线斜率)反映研究区在研究期间生态系统质量现状特征及其时空变化趋势。

2.4 生态系统服务参数

水源涵养、土壤保持、固碳为森林最重要的3种生态系统服务功能,本文利用这些服务功能的变化来表征生态系统服务变化特征。数据来源于"全国生态环境十年变化遥感调查评估(2000-2010年)"项目。其中,各生态系统类型的水源涵养量计算采用降水贮存量法。本文以工程实施前后10年(1990-2000年和2000-2010年)水源涵养量、水源涵养量斜率变化、水源涵养保有率变化、水源涵养保有率斜率的多年平均值变化等4方面特征反映研究区水源涵养服务的数量和空间变化特征。其中,水源涵养保有率是指为消除气候波动的影响,将水源涵养服务量与裸土条件下水源涵养量的比值作为水源涵养服务的保有率,以此判断生态系统本身的水源涵养作用。土壤水蚀量、保持量的估算采用美国的修正通用水土流失方程(RUSLE)。以工程实施前后10年(1990-2000年和2000-2010年)土壤侵蚀量、土壤侵蚀量斜率、土壤保持量、土壤保持量斜率、土壤保持保有率、土壤保持保有率斜率的多年平均值变化等6个方面的变化特征反映研究区土壤保持服务的数量和空间变化特征。其中,为消除气候波动影响,将土壤保持服务量与裸土条件下土壤保持量的比值作为土壤保持服务的保有率,以此判断生态系统本身的土壤保持作用。固碳功能采用1990年、2000年以及2010年的固碳量数据反映工程前后的变化特征。

表1 生态系统类型的生态级别

Tab.1 Ecological ranking of different ecosystem types

生态系统类型	湿地	林地	草地	耕地	其他生态系统
生态级别	1级	2级	3级	4级	5级

3 结果与分析

3.1 小陇山地区生态系统格局时空变化特征

总体而言,小陇山地区生态系统转类指数为0.038,为正值,表明2000-2010年期间研究区宏观生态状况好转,其原因与生态级别较高的林地和草地大幅度增长密切相关。按流域统计分析表明,黄河流域生态系统转类指数为0.040,高于长江流域的0.037,黄河流域宏观生态状况转好趋势更为明显。

3.1.1 生态系统宏观结构与演变

从表2可以看出,小陇山地区以林地为主,2010年林地面积占土地总面积的45.60%。其次为耕地,占土地总面积的36.41%;草地面积也相对较多,占土地总面积的16.00%;湿地、人工表面以及其他生态系统的面积相对较小,仅分别占土地总面积的0.20%、0.97%和0.81%.

从空间分布情况来看,长江流域片区以林地为主,林地比例相对较大,占整个长江流域总面积的57.67%;耕地和草地也有较大的比例,分别占流域总面积的29.59%和11.37%。黄河流域片区以耕地为主,耕地面积占整个黄河流域面积的44.36%;林地和草地比例也相对较大,分别占流域总面积的31.52%和21.40%。

10年间,小陇山地区草地、林地、人工表面以及其他生态系统的面积呈总体上升趋势,耕地和湿地生态系统的面积呈下降趋势(表2-3)。其中,草地面积增幅最大,增加面积为40408 hm^2,增幅达14.15%;增加面积主要来自于耕地的转入,耕地转入面积高达40315 hm^2,占转入总面积的98.80%。

表2　小陇山地区生态系统类型面积变化趋势

Tab. 2　Change in ecosystem types in the Xiaolongshan region, Gansu Province during the natural forest protection project (NFPP) period, 2000-2010

地类	现状				变化(2000–2010年)					
	2000		2010		全区		黄河流域		长江流域	
	面积/hm²	比例/%	面积/hm²	比例/%	变化面积/hm²	变化比例/%	变化面积/hm²	变化比例/%	变化面积/hm²	变化比例/%
草地	285692	14.02	326104	16.00	40408	14.15	25078	14.24	15329	14.01
湿地	4194	0.21	4169	0.20	−27	−0.64	23	1.52	−49	−1.83
耕地	804608	39.49	741919	36.41	−62683	−7.79	−33884	−7.51	−28799	−8.15
人工表面	17780	0.87	19754	0.97	1973	11.09	1376	10.21	597	13.86
其他	15437	0.76	16567	0.81	1132	7.33	837	10.01	295	4.17
林地	909979	44.66	929179	45.60	19198	2.11	6570	2.27	12628	2.04

表3　2000-2010年小陇山地区生态系统类型转移矩阵/hm²

Tab.3　Ecosystem type transition matrix in the Xiaolongshan region/hm², 2000 – 2010

类型	草地	湿地	耕地	人工表面	其他	林地
草地	285191	0	217	150	0	31
湿地	11	4012	157	0	4	0
耕地	40315	23	741229	1738	1810	19293
人工表面	0	0	0	17779	0	0
其他	438	122	67	50	14749	7
林地	41	0	55	35	2	909609

研究区林地面积增加19198 hm²，增幅为2.11%；增加面积基本上来自于耕地转入，耕地转入面积为19293 hm²，占转入总面积的99.80%。人工表面和其他生态系统增加面积相对较小(分别为1973 hm²和1132 hm²)，但增幅均较大(分别为11.09%和7.33%)。与此同时，耕地面积在工程实施期间呈大幅度下降趋势，10年间下降了62683 hm²，下降幅度高达7.79%。下降原因主要是其在工程实施期间向草地、林地、人工表面以及其他生态系统的大幅度转移。从变化较大地类的空间变化特征来看(图2)，草地增加面积和增幅都是黄河流域略高于长江流域；而对于林地变化，长江流域增加面积远高于黄河流域，前者是后者的2倍。耕地在2个流域中的减少面积和减少幅度相当。

3.1.2　林地生态系统结构演变

小陇山地区林地生态系统可进一步划分为落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、落叶阔叶灌木林、乔木园地、乔木绿地6种(表4)。其中，最主要的为落叶阔叶林和落叶阔叶灌木林2类，2010年这两种林地生态系统分别占林地总面积的48.40%和45.69%。10年间，这两种林地生态系统分别增长了8711 hm²和10448 hm²，增幅分别为1.98%和2.52%，增加面积基本来自耕地转入(图3)。其中，长江流域的落叶阔叶林的增加面积远高于黄河流域，前者为后者的4.5倍，而落叶阔叶灌木林在2个流域增加面积基本相当。

3.2　生态系统质量与服务监测评估

3.2.1　生态系统质量监测评估

根据统计分析结果，2000-2010年期间小陇山地区叶面积指数(*LAI*)的多年平均值为2.46，并且变化斜率为0.0221，10年间叶面积指数呈上升趋势

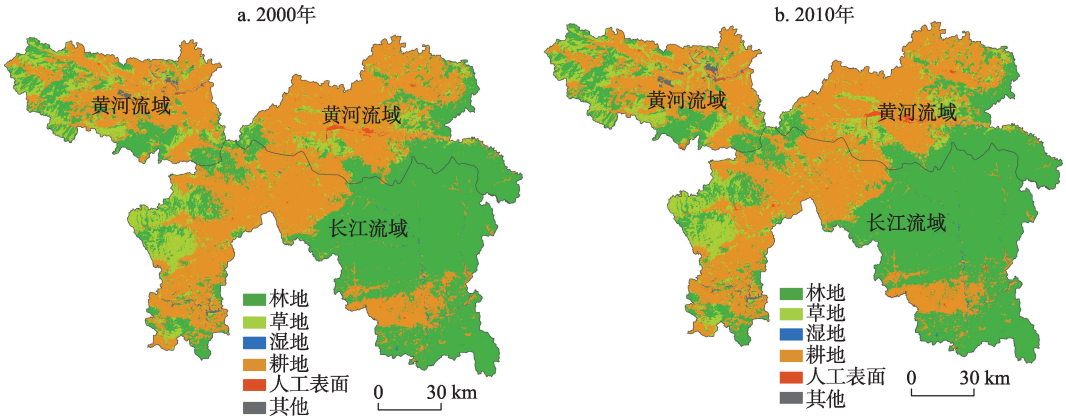


图2　小陇山生态系统类型

Fig. 2　Ecosystem type of the Xiaolongshan region

表4 林地现状及其变化特征

Tab.4 Forest types and change characteristics

林地类别	2000		2010		变化(2000-2010)	
	面积/hm²	占比/%	面积/hm²	占比/%	面积变化/hm²	占比变化/%
落叶阔叶林	441028	48.47	449739	48.40	8711	1.98
常绿针叶林	16149	1.77	16149	1.74	0	0.00
针阔混交林	38673	4.25	38714	4.17	41	0.10
落叶阔叶灌木林	414080	45.50	424528	45.69	10448	2.52
乔木园地	44	0.00	44	0.00	0.00	0.00
乔木绿地	4	0.00	4	0.00	0.00	0.00
林地总面积	909979	100.00	929179	100.00	19199	2.11

(表5)。按流域统计,长江流域叶面积指数值(2.91)高于黄河流域(1.94);但从流域的*LAI*变化趋势看,黄河流域的变化斜率(0.0308)要高于长江流域(0.0147),表明黄河流域生态质量改善更为明显。研究区最大植被覆盖度(*FC*)多年平均值为74.29%,并且斜率为0.5099,表明植被覆盖度在研究期间呈上升趋势;长江流域的多年最大植被覆盖度平均值(79.81%)大于黄河流域(67.86%);但从变化趋势而言,黄河流域上升趋势更为明显。

3.2.2 生态系统服务监测评估

(1) 固碳功能

统计分析表明,2010年小陇山地区固碳功能为700.20 t/hm² ,相比工程初期的2000年增加了31.37 t/hm²,增幅为4.69%。扭转了工程实施之前的10年间(1990-2000年)的下降趋势(图4,表6)。与此同时,长江流域的固碳功能较高,2010年其固碳功能为899.38 t/hm²;黄河流域的固碳功能相对较低,2010年值为467.49 t/hm²。就变化趋势而言,2个流域工程实施前后都经历了同样的变化趋势,但工程实施后黄河流域的固碳功能增幅(5.31%)大于长江流域(4.42%)。

(2) 水源涵养功能

水源涵养功能的变化特征由水源涵养量、水源涵养量斜率、水源涵养保有率、水源涵养保有率斜率这些指标来反映。统计分析表明,小陇山区域工程实施后水源涵养功能呈上升趋势,其水源涵养量的平均值相对于实施前增加了0.35万 m³/km²,增幅为7.20%(表6)。工程实施后水源涵养量变化斜率为0.08,扭转了工程实施前10年的下降趋势。水源涵养保有率在工程实施后的多年平均值为50.08%,高于工程实施前多年平均值(46.67%)。与此同时,工程实施前后水源涵养保有率斜率均为正值,但工程实施后研究区保有率斜率大于工程实施前,进一步说明工程实施后水源涵养功能的上升趋势。按流域统计,2个流域变化趋势基本与全区一致,但黄河流域的水源涵养量以及水源保有率的上升趋势要略高于长江流域。

(3) 土壤保持功能

土壤保持功能采用土壤侵蚀量、土壤侵蚀量斜率、土壤保持量、土壤保持量斜率、土壤保持保有率以及土壤保持保有率斜率的变化特征来反映。对土壤侵蚀相关指标统计分析表明,小陇山地区工程实施后10年的土壤侵蚀量平均值为21.28 t/hm²,比工程实施前10年平均值下降了9.57 t/hm²,下降幅

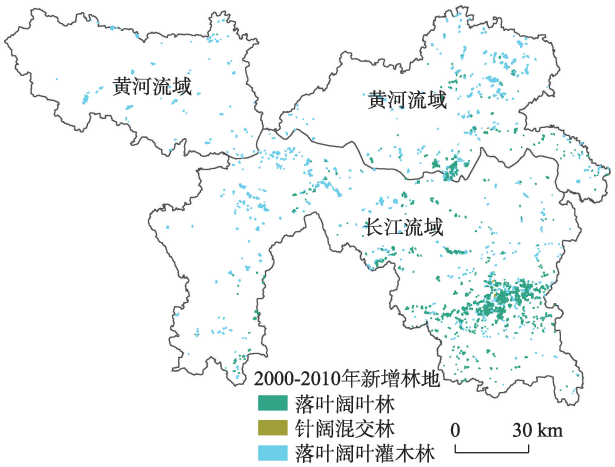


图3 2000-2010年小陇山地区林地增加图

Fig.3 Increase in forest distribution, 2000-2010

表5 2000-2010年生态系统质量相关指标多年平均值及其变化趋势

Tab.5 Average values and trends of ecosystem quality indicators, 2000-2010

	LAI		*FC*	
	多年平均值	斜率	多年平均值/%	斜率
全区	2.46	0.0221	74.29	0.5099
黄河流域	1.94	0.0308	67.86	0.6765
长江流域	2.91	0.0147	79.81	0.3673

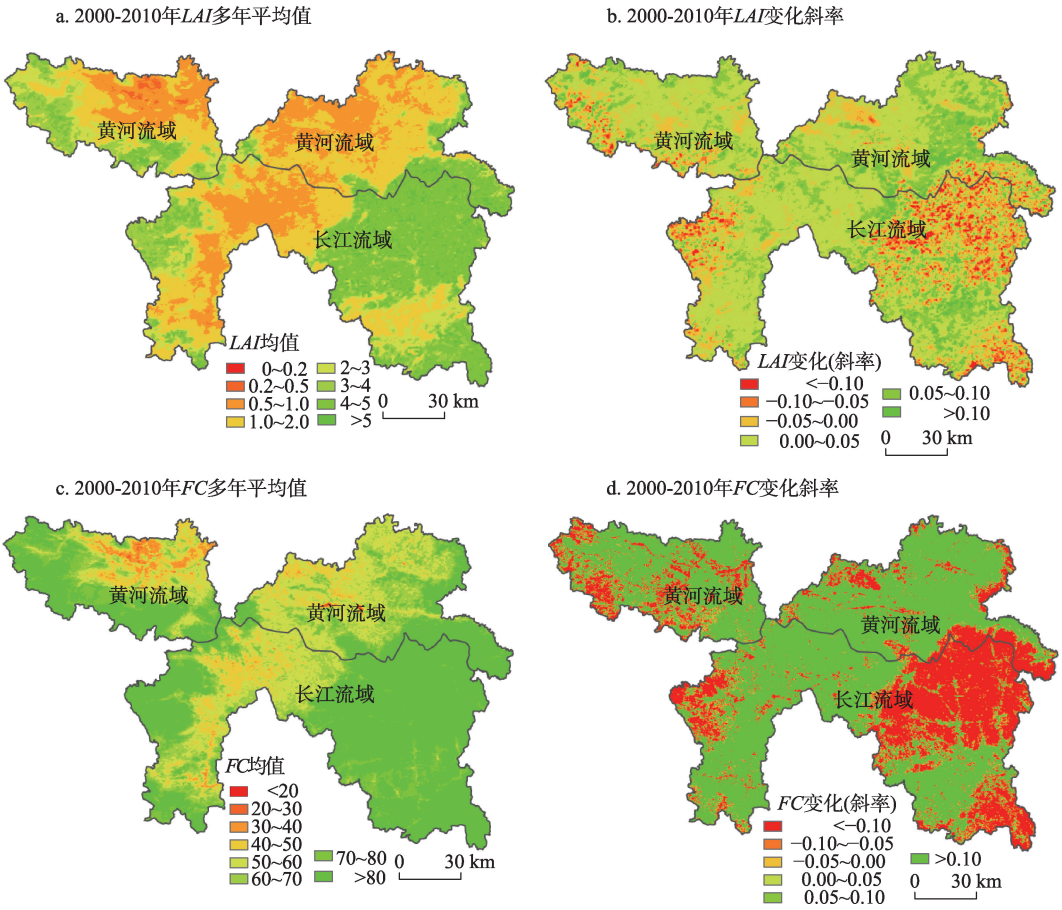


图4　2000-2010年生态系统质量相关指标变化特征

Fig.4　Characteristics of change of ecosystem quality indicators, 2000-2010

度高达31.02%(表6)。与此同时，工程实施前后10年土壤侵蚀变化斜率均为负值，表明工程实施前后土壤侵蚀量均呈下降趋势。且后10年土壤侵蚀的斜率大于前10年的斜率，表明后10年土壤侵蚀下降趋势不及前10年。就流域而言，黄河流域土壤侵蚀的下降趋势与全区较为一致，但长江流域后10年的下降趋势明显大于前10年。

对土壤保持量相关指标的统计分析表明，小陇山地区后10年土壤保持平均保持量为69.25 t/hm^2，比前10年高出9.80 t/hm^2，增幅为16.48%。与此同时，研究区后10年土壤保持量斜率为正，扭转了前10年土壤保持量下降的趋势。就流域而言，长江流域的土壤保持水平要高于黄河流域，但黄河流域土壤保持量前后10年的增幅(28.99%)高于长江流域(9.64%)。

对土壤保持功能保有水平相关指标的统计分析表明，土壤保持保有率在工程实施后的多年平均值为72.84%，大于工程实施前多年平均值(60.53%)。同时，后10年土壤保持保有率斜率(0.0189)也大于前10年斜率平均值(0.0001)，表明后10年土壤保持保有率呈微小上升趋势。就流域而言，黄河流域后10年土壤保持保有水平上升趋势略大于长江流域。

4　讨论

小陇山地区生态系统格局、质量、服务等方面的指标变化特征基本上反映了该区天保工程实施后生态有了明显改观。并且，无论是生态系统宏观格局的改变，还是生态系统质量及其服务的改变，相关指标都表明黄河流域天保工程生态的改善程度要高于长江流域。指标数值变化的一致性在一定程度上反映了各方面指标选取具有相互印证的关系，这也从侧面说明了生态系统格局、质量、服务相关指标选取的科学性。

(1) 生态系统宏观格局相关指标科学性。林草植被覆盖情况是天保工程实施生态成效的重要指标。本文中，林地和草地这2种植被类型面积上升

表6 工程实施前后各项服务指标变化特征

Tab.6 Characteristics of change of ecosystem service indicators after the implementation of the natural forest protection project (NFPP)

	服务指标	时间	黄河流域	长江流域	全区
固碳功能	固碳量/(t/hm^2)	1990	448.60	869.63	675.45
		2000	443.90	861.35	668.83
		2010	467.49	899.38	700.20
水源涵养功能	水源涵养量/(万 m^3/km^2)	1990−2000	3.53	6.11	4.92
		2000−2010	4.11	6.28	5.28
	水源涵养量斜率	1990−2000	−0.09	−0.14	−0.12
		2000−2010	0.05	0.10	0.08
	水源涵养保有率/%	1990−2000	41.13	51.33	46.67
		2000−2010	45.54	53.90	50.08
	水源涵养保有率斜率	1990−2000	0.0025	0.0025	0.0025
		2000−2010	0.0072	0.0063	0.0067
土壤保持功能	土壤侵蚀量/(t/hm^2)	1990−2000	38.21	24.55	30.85
		2000−2010	26.63	16.70	21.28
	土壤侵蚀量斜率	1990−2000	−2.50	−0.78	−1.57
		2000−2010	−1.91	−1.13	−1.49
	土壤保持量/(t/hm^2)	1990−2000	45.53	71.37	59.45
		2000−2010	58.73	78.25	69.25
	土壤保持量斜率	1990−2000	−1.94	−2.34	−2.15
		2000−2010	0.85	2.39	1.68
	土壤保持保有率/%	1990−2000	52.22	67.64	60.53
		2000−2010	67.13	77.72	72.84
	土壤保持保有率斜率	1990−2000	0.0011	−0.0007	0.0001
		2000−2010	0.0218	0.0165	0.0189

趋势可较好地反映工程实施后工程区生态本底的改善程度。同时,森林保护和恢复也是天保工程最主要任务。因此对林地分类分析可较好地反映工程实施后森林结构与总量变化特征。分流域来看,落叶阔叶林和落叶阔叶灌木林这2类主要林地在2个流域的增长差异较大,森林结构变化具有明显的异质性。生态系统转类指数指标可定量地反映区域宏观生态改善情况。生态系统转类指数数值大小在一定程度上取决于对生态级别的定义。本文按照各类生态系统的自然禀赋,参照土地覆被生态质量差异,定义研究区各生态类型的生态级别,具有区域适用性,但不具有普遍推广意义,因为在其他区域中,各生态系统的重要性程度可能不同。因此在将此指标应用到其他区域时,需要根据当地生态系统特点调整生态级别。

(2) 生态系统质量与服务相关指标科学性。植被恢复是生态环境改善的前提。植被覆盖度和叶面积指数可较好地表征区域植被状况,同时植被状况是水源涵养和土壤保持服务功能计算的重要参数。采用这2项参数数值在工程实施期间的变化斜率能在时间序列上反映工程实施的生态成效。水源涵养、土壤保持、固碳3项服务功能是森林最重要的3种服务功能。其中,水源涵养、土壤保持生态系统服务功能变化特征采用工程实施前后10年相关指标的数值变化差异及其变化斜率差异表示,可较好地体现这2项服务功能在长时间序列上的变化特征,评估结果更为客观和科学。由于固碳量指标只有1990年,2000年以及2010年3个时间节点数据,难以反映长时间序列固碳功能的变化,但也在一定程度上显示了其在工程实施前后10年的变化对比。

(3) 气候和其他生态建设工程对区域生态环境的影响。气候因素是植被活动年际变化的重要影响因素(Weltzi et al, 2003),气温和降水量是影响植被生长的主要非生物因素(Zhou et al, 2014)。气候的干湿状况和水资源供需平衡会对植被的生长产生较大影响。对小陇山地区工程实施前后10年的平均气温和降水量的统计表明,工程实施后10年年平均气温为5.90 ℃,比工程实施前10年上升0.13 ℃;工程实施后10年平均降水量为855 mm,比前10年平均值增加30.23 mm,这反映了研究区近年来气候趋向暖湿变化趋势,有利于植被恢复与生长,这也是小陇山地区生态环境质量改善的重要因

素。尽管水源涵养保有量和土壤保持功能保有量2项指标剔除了气候变化对生态环境的影响，但气候因子对生态环境改善的贡献率还有待进一步加强。与此同时，研究区还同时实施了退耕还林工程，其中部分林草植被的增长来源于退耕还林还草，这对于生态环境的改善也起到一定的促进作用。因此，综合叠加各项生态建设工程对生态环境影响及其贡献率的研究还需进一步加强。

5 结论

本文在生态系统宏观格局、质量、服务等方面建立了一套系统、全面的天保工程实施生态成效评估指标体系，并利用多源长时间序列数据对研究区的天保工程实施成效进行了评估，得出了具有空间异质性特征的评估结果，并在消除气候因素对生态成效的影响上作了初步探索。主要得出以下结论：

(1) 多类指标均反映研究区天保工程实施期间生态环境改善的趋势。不论是整个区域还是不同流域，各类评估结果具有一致性，表明时间序列基础数据可增强评估结果的稳定性，可避免仅根据少数几个时间点数据而导致的评估结果的随机性。

(2) 天保工程区各流域生态系统质量及工程实施的生态成效具有差异性。今后天保工程的进一步实施过程中，应更加注重区分流域等自然边界，实施差异化的生态恢复与管理手段。

(3) 未来天保工程的生态成效评估，应重视在计算方法上消除气候因子对评估结果的影响，在指标选取上减少与其他生态工程的叠加影响，增强评估结果的科学性。

参考文献(References)

蔡博峰. 2009. 三北防护林工程监测和评价研究[M]. 北京: 化学工业出版社. [Cai B F. 2009. Sanbei fanghulin gongcheng jiance he pingjia yanjiu[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press.]

国家林业局. 2014. 2013退耕还林工程生态效益监测国家报告[M]. 北京: 中国林业出版社. [Guojia linyeju. 2014. 2013 tuigeng huanlin gongcheng shengtai xiaoyi jiance guojia baogao[M]. Beijing, China: Chinese Forest Press.]

国政, 聂华, 臧润国, 等. 2011. 西南地区天然林保护工程生态效益评价[J]. 内蒙古农业大学学报, 32(2): 65-72. [Guo Z, Nie H, Zang R G, et al. 2011. Eco-benefit evaluation on natural forest protection project in Southwest China[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 32(2): 65-72.]

胡会峰, 刘国华. 2006. 中国天然林保护工程的固碳能力估算[J]. 生态学报, 26(1): 291-296. [Hu H F, Liu G H. 2006. Carbon sequestration of China's national natural forest protection project[J]. Acta Ecologica Sinica, 26(1): 291-296.]

刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 2014. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 69(1): 3-14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. 2014. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 69(1): 3-14.]

欧阳志云, 王桥, 郑华, 等. 2014. 全国生态环境十年变化(2000-2010年)遥感调查评估[J]. 中国科学院院刊, 29(4): 462-466. [Ouyang Z Y, Wang Q, Zheng H, et al. 2014. National ecosystem survey and assessment of China (2000-2010)[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 29(4): 462-466.]

欧阳志云, 张路, 吴炳方, 等. 2015. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系[J]. 生态学报, 35(2): 219-226. [Ouyang Z Y, Zhang L, Wu B F, et al. 2015. An ecosystem classification system based on remote sensor information in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 35(2): 219-226.]

屈红军, 朱颖, 张忠林, 等. 2012. 我国天然林保护工程一期实施效果概述[J]. 林业科技开发, 26(6): 5-8. [Qu H J, Zhu Y, Zhang Z L, et al. 2012. Woguo tianranlin baohu gongcheng yiqi shishi xiaoguo gaishu[J]. Forest Technology Development, 26(6): 5-8.]

邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 2016. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. 地理学报, 71(1): 3-20. [Shao Q Q, Fan J W, Liu J Y, et al. 2016. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region[J]. Acta Geographica Sinica, 71(1): 3-20.]

邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 等. 2010. 近30年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征[J]. 地理研究, 29(8): 1439-1451. [Shao Q Q, Zhao Z P, Liu J Y, et al. 2010. The characteristics of land cover and macroscopical ecology changes in the source region of three rivers on Qinghai-Tibet Plateau during last 30 years[J]. Geographical Research, 29(8): 1439-1451.]

邵瑜. 2012. 浅谈小陇山林区生态恢复的主要对策[J]. 甘肃科技, 28(10): 136- 137, 71. [Shao Y. 2012. Qiantan Xiaolongshan linqu shengtai huifu de zhuyao duice[J]. Gansu Science and Technology, 28(10): 136-137, 71.]

孙传谆, 甄霖, 王超, 等. 2015. 生态建设工程对鄱阳湖区域土地利用/覆被变化的影响[J]. 资源科学, 37(10): 1953-1961. [Sun C Z, Zhen L, Wang C, et al. 2015. Effect of ecological construction projects on land use/cover changes in the Poyang Lake area[J]. Resources Science, 37(10): 1953-1961.]

陶蕴之, 吕一河, 李凤全, 等. 2016. 西南天然林保护工程区生态成效评估[J]. 生态与农村环境学报, 32(5): 716-723. [Tao Y Z, Lv Y H, Li F Q, et al. 2016. Assessment of ecological effect of the natural forest protection project in Southwest China[J]. Journal of Ecology and Rural Environ-

ment, 32(5): 716-723.]
余新晓, 谷建才, 岳永杰, 等. 2010. 林业生态工程效益评价[M]. 北京: 科学出版社. [Yu X X, Gu J C, Yue Y J, et al. 2010. Benefit evaluation on forestry ecological projects [M]. Beijing, China: Science Press.]
张海燕, 樊江文, 邵全琴, 等. 2016. 2000-2010年中国退牧还草工程区生态系统宏观结构和质量及其动态变化[J]. 草业学报, 25(4): 1-15. [Zhang H Y, Fan J W, Shao Q Q, et al. 2016. Ecosystem dynamics in the 'Returning Rangeland to Grassland' programs, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 25(4): 1-15.]
张磊, 吴炳方, 李晓松, 等. 2014. 基于碳收支的中国土地覆被分类系统[J]. 生态学报, 34(24): 7158-7166. [Zhang L, Wu B F, Li X S, et al. 2014. Classification system of China land cover for carbon budget[J]. Acta Ecologica Sinica, 34 (24): 7158-7166.]
张志达. 2002. 天保工程的实施背景、进展及对策[J]. 林业经济, (1): 36-39. [Zhang Z D. 2002. Tianbao gongcheng de shishi beijing, jinzhan ji duice[J]. Forestry Economics, (1): 36-39.]
Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, et al. 2008. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(28): 9477-9482.
MA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and human well-being: Synthesis[M]. Washington, D C: Island Press.
Sun C Z, Zhen L, Wang C, et al. 2015. Impacts of ecological restoration and human activities on habitat of overwintering migratory birds in the wetland of Poyang Lake, Jiangxi Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 12(5): 1302-1314.
Wang C, Ouyang H, Maclaren V, et al. 2007. Evaluation of the economic and environmental impact of converting cropland to forest: A case study in Dunhua County, China[J]. Journal of Environmental Management, 85(3): 746-756.
Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, et al. 2003. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation[J]. BioScience, 53(10): 941-952.
Zhen L, Li F, Yan H M, et al. 2014. Herders' willingness to accept versus the public sector's willingness to pay for grassland restoration in the Xilingol League of Inner Mongolia, China[J]. Environmental Research Letters, 9(4): 045003.
Zhou W, Gang C C, Chen Y Z, et al. 2014. Grassland coverage inter-annual variation and its coupling relation with hydrothermal factors in China during 1982-2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 24(4): 593-611.

Assessment of the ecological effects of the first−phase natural forest protection project in the Xiaolongshan region, Gansu Province

SUN Chuanzhun[1], ZHEN Lin[2,3*], WANG Chao[2,3], HU Jie[2,3], DU Bingzhen[4]
(1. College of Public Management, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS，Beijing 100101, China; 3. School of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Holland Wageningen University, Wageningen 6700 HB, Holland)

Abstract: The natural forest protection project (NFPP) is one of the most widely implemented ecological construction projects in China. By establish multiple ecological indicators, this study try to evaluate its ecological effect, which has important scientific value for the future decision. This study used remote sensing and ecosystem quality data and related indicators to assess the characteristics of change of macro ecological pattern, ecosystem quality, and ecosystem services in the Xiaolongshan region, Gansu Province during the NFPP from 2000-2010. The results show that: (1) After the implementation of the NFPP, broadleaved deciduous forest, broadleaved deciduous shrub, and grassland areas increased substantially, and the ecosystem quality in general clearly improved. The improvement was greater in the Yellow River basin as compared to the Yangtze River basin. (2) The average values of the ecosystem quality indicators of LAI and FC was 0.022 and 0.510 during 2000-2010, with an increasing trend. (3) In 2010, the carbon storage value was 700.20 t/hm^2, increased by 4.69% during the first-phase of the NFPP. The slope value of water conservation was 0.08, with an increasing trend as well. The slope value of soil conservation was 1.68, also with an increasing trend.

Key words: natural forest protection project (NFPP); macro ecological pattern; ecosystem quality; ecosystem services; Xiaolongshan; Gansu Province