

藏中联网工程生态系统服务功能重要性评价

蔡德峰² 张扬建^{1,3,4} 丛楠^{1*} 殷国栋⁵ 王荔⁶ 张明勋² 俎佳星^{7,8} 周全⁹
陈宁^{1,3} 刘瑶杰^{1,3} 蓝健均¹⁰ 蔡绍荣⁹ 张戈¹¹

(¹中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ²国家电网西藏电力有限公司, 拉萨 850000; ³中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190; ⁴青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; ⁵中节能咨询有限公司, 北京 100082; ⁶北京大学深圳研究生院, 广东深圳 518000; ⁷南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001; ⁸南宁师范大学广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001; ⁹国家电网公司西南分部, 成都 610041; ¹⁰国家电网四川省电力公司, 成都 610041; ¹¹辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁大连 116029)

摘要 对电网工程沿线区域的生态系统服务功能进行评价是规避和降低工程对沿线区域生态破坏的重要前提。本研究选取水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性保护等 4 项生态系统服务功能为主体, 基于遥感与 GIS 技术对藏东南地区生态系统服务功能的重要性进行评价, 在此基础上分析了不同电网工程标段影响区的生态系统服务功能重要性。结果表明: 藏东南地区生态系统服务功能重要性总体上呈现出“东西部高、中部低”的空间分布格局, 极重要区面积为 74843 km², 占区域总面积的 18.47%, 主要分布在藏东南的森林区, 包括澜沧江沿线及其以东地区、雅鲁藏布江沿线及错那县、墨脱县南部。藏中联网工程东、西两端标段影响区内的生态系统服务功能重要性相对较高, 在施工过程中应根据影响区内主导的生态系统服务功能分布状况采取相应措施加强生态环境保护。本研究方法可为其他输电工程的设计和施工提供生态标准及科学依据。

关键词 净初级生产力; 生态系统服务功能重要性; 输电工程; 青藏高原

Assessment on the importance of ecosystem services along the Transmission Line of Tibet Networking Project. CAI De-feng², ZHANG Yang-jian^{1,3,4}, CONG Nan^{1*}, YIN Guo-dong⁵, WANG Li⁶, ZHANG Ming-xun², ZU Jia-xing^{7,8}, ZHOU Quan⁹, CHEN Ning^{1,3}, LIU Yao-jie^{1,3}, LAN Jian-jun¹⁰, CAI Shao-rong⁹, ZHANG Ge¹¹ (¹Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²State Grid Tibet Electric Power Company Limited, Lhasa 850000, China; ³College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ⁴Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ⁵CECEP Consulting Co., Ltd., Beijing 100082, China; ⁶Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518000, Guangdong, China; ⁷Nanning Normal University, Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning 530001, China; ⁸Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning 530001, China; ⁹Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China; ¹⁰State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; ¹¹School of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China).

Abstract: Evaluating ecosystem services along the line of power grid projects is critical for avoiding or reducing the negative impacts of grid construction on ecosystems. Based on remote sensing and GIS technologies, we selected four kinds of primary ecosystem services (i.e., water conser-

国家自然科学基金项目(41801083, 42071133)、国家电网公司科学技术项目(SGxzslwhbGCJS1700095)、国家杰出青年科学基金项目(41725003)和中国博士后科学基金项目(2019M660781)资助。

收稿日期: 2020-06-27 接受日期: 2020-10-16

* 通讯作者 E-mail: congnan@igsnr.ac.cn

vation, soil and water conservation, windbreak and sediment conservation, and biodiversity protection) to evaluate the importance of ecosystem services in southeastern Tibet. We further evaluated the importance of ecosystem services for the influenced areas of each bid section of the Tibet Networking Project. The results showed that the pattern of the importance of ecosystem services over southeastern Tibet was high in east and west parts and low in central region. The area with extremely important service was 74843 km², accounting for 18.47% of the total area. This area was mainly distributed in the forest region of southeastern Tibet, containing area along and east to Lancang River, area along Yarlung Zangbo River, and the southern part of Cuona and Motuo counties. The sections located in east and west terminals showed a relatively high importance of ecosystem services. Measures for ecological and environmental protection should therefore be adopted by considering the distribution of primary ecosystem services. This study could provide the ecological criterion and scientific reference for the design and construction of other similar transmission projects.

Key words: net primary productivity (NPP); importance of ecosystem services; transmission project; Tibetan Plateau.

大型输电工程以及电力系统联网工程的建设是促进区域经济发展的重要保障,对现阶段我国西部地区经济发展尤为重要。然而,输电工程的建设有时难以完全避开自然保护区等生态敏感、脆弱区,可能造成植被破坏、水土流失、土壤成分改变等生态环境破坏现象(郭明凡等,2010;马士新等,2010;闫超等,2010)。

青藏高原被称为世界“第三极”,具有独特的自然地理格局和丰富的生物多样性,对我国乃至亚洲生态安全都起着重要的屏障作用(孙鸿烈等,2012)。同时,青藏高原属于典型的高寒生态脆弱区,生态环境对人类活动干扰极为敏感(姚檀栋等,2006;于伯华等,2011;Chen *et al.*,2014)。近年来,青藏高原的电力建设进入快速发展时期,然而电力工程建设势必也会对高原生态环境带来巨大冲击,甚至威胁区域生态安全(陈利顶等,2007)。也有很多学者着眼于长距离重大工程对生态环境的影响,但研究多以沿线两侧一定空间为对象,存在一定主观性(高江波等,2008;董仁才等,2011),而从大尺度分析生态系统服务功能可更好为长距离工程前期选址、后期评估提供科学支撑。因此,对青藏高原电网工程沿线区域的生态系统服务功能进行评估,是保障电网施工项目安全运行以及保护该地区脆弱生态环境的重要前提。

生态系统服务是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务(Repetto,1992;Costanza *et al.*,1997;谢高地等,2003)。生态系统服务是人类生存和发展的基础,其功能重要性是评估生态环境保护的重要依据,目前已经受到了广泛的关注(李丽锋等,2013;郭荣中

等,2014;付奇等,2016;何玲等,2016;熊善高等,2018;刘军会等,2018;刘世梁等,2018)。生态系统服务功能重要性的评估方法主要有模型法(白杨等,2013;Leh *et al.*,2013;刘智方等,2016)和定量指标法(张立伟等,2016;陈涛等,2018;朱立晨等,2018)。模型法对生态系统内在机制的分解较为透彻,但庞大的参数需求导致多数区域研究难以保障数据集的完整,现阶段理想的模型综合评估往往难以实现(吕一河等,2013)。而定量指标法具有一定的生态学原理,确定不同的生态系统服务量值的算法相对简单,注重生态系统服务功能在空间表达上的实用性和准确性。植被生产力作为生态系统功能的重要描述参数(Cramer *et al.*,1999;Scurlock *et al.*,2002;朱文泉等,2007),随着遥感技术在生态系统生态学领域的逐渐推广(de Araujo Barbosa *et al.*,2015;张扬建等,2017),高时空分辨率的植被生产力可以通过遥感定量反演得到。因此,植被生产力在生态系统服务功能评价中是一个比较理想的定量指标(Barral *et al.*,2012;Carreño *et al.*,2012)。

因此,本研究选用生态系统净初级生产力(net primary productivity,NPP)作为定量指标,综合利用RS和GIS手段,对西南电网典型工程——藏中联工程的生态系统服务功能重要性进行综合评价,为工程施工的线路选择、区域环境保护以及植被快速恢复提供理论依据和技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

藏中联工程属于跨区域输变电工程,包括藏中和昌都电网联网工程及川藏铁路拉萨至林芝段供

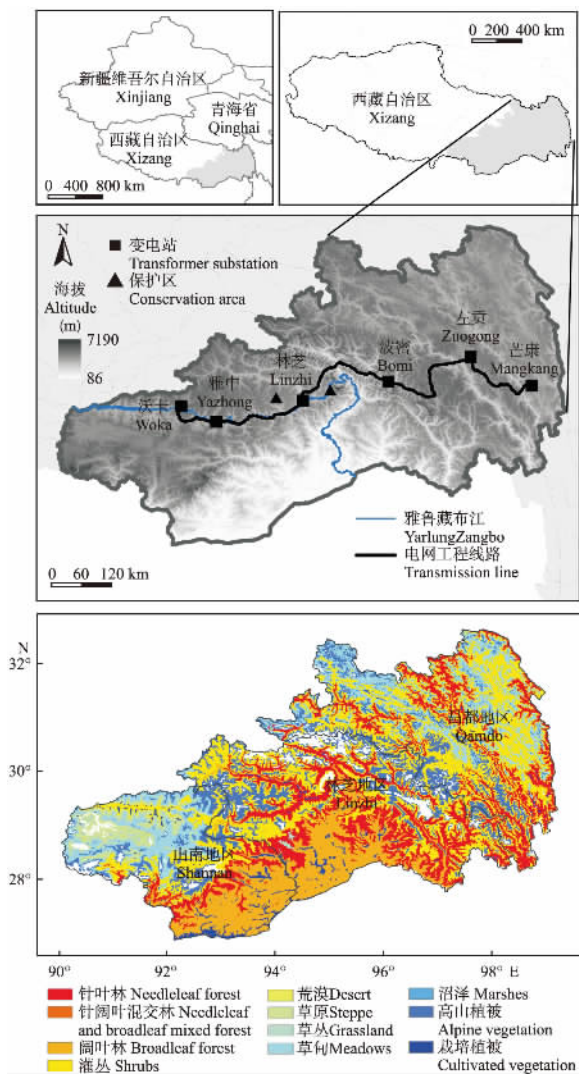


图1 研究区的地理位置及植被类型
Fig.1 Location and vegetation classification of the study area

表1 数据精度及来源
Table 1 Data accuracy and sources

名称 Name	类型 Data type	分辨率 Spatial resolution	时间 Period	数据来源 Data source
NPP 数据集	栅格	500 m	2000—2015 年	美国国家航空航天局(NASA) 网站 (https://ladsweb.nascom.nasa.gov)
DEM 数据集	栅格	90 m	2010 年	地理空间数据云网站 (http://www.gscloud.cn/)
中国 1 : 100 万土壤数据集(v1.1)	栅格	1 km	2003 年	寒区旱区科学数据中心 (http://westdc.westgis.ac.cn)
气象(逐月气温、降水、风速) 数据集	文本	/	1980—2016 年	中国气象科学数据共享服务网 (http://data.cma.cn/)
土壤渗流能力因子 F_{sic}	栅格	1 km	2009 年	世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD)
多年平均降水量 F_{pre}	栅格	1 km	2000—2015 年	中国科学院资源环境科学数据中心
坡度因子 F_{slo}	栅格	1 km	/	中国科学院资源环境科学数据中心
土壤可蚀性因子 K	栅格	1 km	2009 年	世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD)
多年平均气候侵蚀力 F_q	栅格	1 km	1981—2010 年	中国地面累年值气候值数据集插值得到
多年平均温度 F_{tem}	栅格	1 km	2000—2015 年	中国科学院资源环境科学数据中心
海拔因子 F_{alt}	栅格	1 km	/	中国科学院资源环境科学数据中心

电工程两段,横跨昌都、林芝、山南 3 个行政区,10 个县、38 个乡(图 1)。输电通道沿线周边环境恶劣,平均海拔达到 3750 m 以上。工程新建 500 千伏变电站(开关站)6 座、220 千伏变电站 2 座,扩建变电站 6 座,新建 500 千伏及以上线路近 2000 km。线路穿越中国第二大林区西南林区以及雅鲁藏布大峡谷自然保护区等 10 个国家级自然保护区。

工程线路位于西藏自治区东南部,地形和地质条件复杂,坡度一般在 35°~65°。该地区气候以温带湿润、半湿润气候为主,且具有明显垂直分布差异。受印度洋孟加拉湾的暖湿气流影响,夏季降水丰沛,森林、草甸、草原等自然景观多样,生物群落丰富。但研究区属于典型的高寒生态脆弱区,生态环境极其敏感、脆弱,容易受人类活动干扰,一旦遭到破坏难以恢复。

1.2 数据及预处理

本研究所使用的数据主要有 NPP、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、土壤和气象数据集等(表 1)。月平均温度以及月总降水的空间栅格数据由站点气象数据经克里金插值得到。所有空间数据最终均转换为 Albers 投影坐标系,并重采样为 1 km 空间分辨率。

1.3 生态系统服务功能重要性评价方法

依据生态环境部发布的《生态保护红线划定指南》(生态环境部,2017),充分考虑到研究区生态系统结构与功能特点以及电网工程特定活动对生态环境产生的影响,本研究主要针对该区域的水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性保护这 4 项与生态安全密切相关的生态系统服务功能分别进行重要性

表2 生态系统服务功能重要性评价方法
Table 2 Evaluation methods for the importance of ecosystem service

评价指标 Evaluation indicators	评估模型 Model	说明 Description
水源涵养功能服务能力指数(WR)	$WR = NPP_{mean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo})$	NPP_{mean} 为区域多年NPP平均值; F_{sic} 为土壤渗流能力因子; F_{pre} 是插值得到的多年平均降水量; F_{slo} 为坡度因子
水土保持功能服务能力指数(S_{pro})	$S_{pro} = NPP_{mean} \times (1 - K) \times (1 - F_{slo})$	K 为土壤可蚀性因子
防风固沙功能服务能力指数(S_{ws})	$S_{ws} = NPP_{mean} \times K \times F_q \times D$	F_q 为多年平均气候侵蚀力; D 为地表粗糙度因子
生物多样性保护服务能力指数(S_{bio})	$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt})$	F_{tem} 是插值得到的多年平均温度; F_{alt} 为海拔因子

评价,最后结合各单因子评价结果对研究区生态系统服务功能重要性进行综合评价。

1.3.1 生态系统服务功能重要性单因子评价 本研究采用 ArcGIS 对生态系统服务功能单因子重要性进行评价。水源涵养、水土保持、防风固沙以及生物多样性保护功能的重要性评价方法如表 2 所示,详细计算方法可参考《生态保护红线划定指南》(生态环境部,2017)。各单因子计算结果经归一化处理得到相应的生态系统服务值栅格图。

1.3.2 生态系统服务功能重要性综合评价 生态系统服务功能重要性综合评价需要综合水源涵养、水土保持、防风固沙以及生物多样性保护等评价因子,而各评价因子的权重应根据区域规划的生态功能进行不同设定。本研究依据《西藏自治区主体功能区规划》(西藏自治区人民政府,2014)中的国家、自治区重点生态功能区名录、禁止开发区名录确定研究区域各县不同生态系统服务功能保护的优先顺

序,将研究区各县划分为森林生态区、生态屏障区、水源涵养区、水源涵养和生物多样性保护区、水源涵养和水土保持区、水源涵养水土保持和生物多样性保护区等 6 个生态功能区(图 2),然后根据 4 种服务功能保护的优先顺序,采用专家打分法对不同生态功能区的各项评价因子赋予权重(表 3)。利用 ArcGIS 对水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性保护等单因子的服务值进行加权叠加,归一化处理后得到生态系统服务功能综合服务值栅格图。

1.3.3 生态系统功能评价分级 在 ArcGIS 中,导出栅格数据属性表,属性表记录了每一个栅格像元的生态系统服务值,将服务值按从高到低的顺序排列,计算累加服务值。累加服务功能值占生态系统服务功能总值比例的 50%以及 80%对应的栅格值,作为生态系统服务功能评估分级的分界点。最后利用 ArcGIS 的重分类工具,将生态系统服务功能重要性对应分为 3 级,即极重要、重要和一般重要。

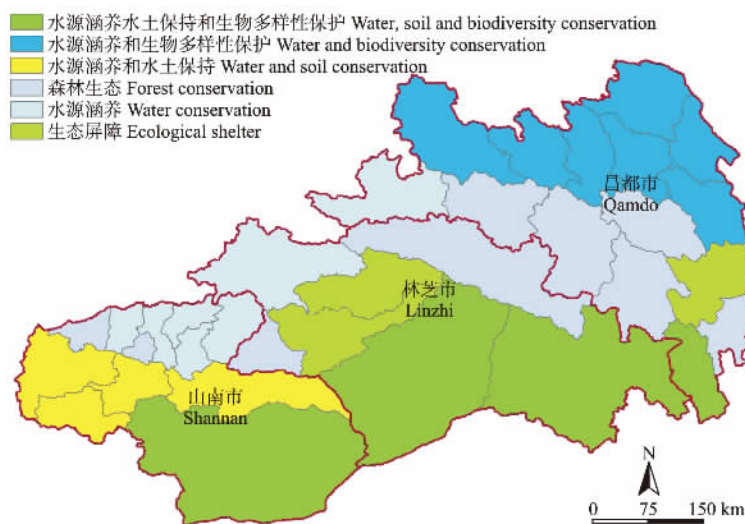


图2 藏东南地区生态功能区划分

Fig.2 Ecological function regionalization of Southeastern Tibet

表 3 不同生态功能区的生态系统服务功能权重表
Table 3 Weights of ecosystem services among ecological function zones

生态功能区 Ecological function zones	服务功能定位顺序 Service function sequence	指标权重 Weights of indicator			
		水源涵养 Water conservation	水土保持 Soil and water conservation	防风固沙 Windbreak and sediment conservation	生物多样性 Biodiversity
森林生态区	生物多样性保护>水源涵养>水土保持>防风固沙	0.2667	0.1333	0.0667	0.5333
生态屏障区	水源涵养=水土保持=生物多样性保护=防风固沙	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
水源涵养区	水源涵养>水土保持>生物多样性保护>防风固沙	0.5333	0.2667	0.0667	0.1333
水源涵养和生物多样性保护区	水源涵养=生物多样性保护>水土保持>防风固沙	0.3636	0.1818	0.0909	0.3636
水源涵养和水土保持区	水源涵养=水土保持>生物多样性保护>防风固沙	0.3636	0.3636	0.0909	0.1818
水源涵养水土保持和生物多样性保护区	水源涵养=水土保持=生物多样性保护>防风固沙	0.2857	0.2857	0.1429	0.2857

1.4 不同电网工程标段影响区的生态系统服务功能重要性分析

为分析电网施工对生态环境的影响,本研究进一步对电网工程标段影响区内的生态系统服务功能重要性进行统计分析。青藏高原地区生态环境极其脆弱,局部的植被破坏扰动可能会降低生态系统的结构和功能,从而造成大范围的生态系统退化(凌文州等,2012)。根据以往研究对青藏高原线性工程采用 50 km 缓冲区域作为大尺度生态环境评价范围(陈辉等,2005;曾业隆等,2017),本研究也将距离输电线路 50 km 以内的范围设置为缓冲区,并且以工程标段的中点为离散点构建泰森多边形,工程标段所在泰森多边形与缓冲区的重叠区域被当作该工程标段的影响区。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务功能重要性单因子评价

2.1.1 水源涵养功能重要性 水源涵养是生态系统对降水的截留保持量,主要功能有削减洪峰流量、调节地表径流、增加可利用水资源、减少土壤侵蚀和

净化水质等。研究区水源涵养极重要区面积为 65306 km²,占总面积的 16.12%(表 4),主要分布在昌都市东部的昌都县、生达县、妥坝县、察雅县、贡觉县和芒康县境内,以及错那县、墨脱县的南部(图 3)。重要区面积为 88338 km²,占研究区总面积的 21.80%,主要分布在雅鲁藏布江和澜沧江沿线。一般重要区面积最大,达到 251576 km²,面积比重为 62.08%,主要分布在山南市的中西部、林芝市的东部以及昌都市的西部。

2.1.2 水土保持功能重要性 水土保持是生态系统通过其结构与过程减少由于水蚀所导致的土壤侵蚀的作用。藏东南地区水土保持极重要区、重要区以及一般重要区的面积为 88588、94442 和 222190 km²,分别占区域总面积的 21.86%、23.31% 和 54.83%(表 4)。极重要区主要分布在昌都市东部的生达县、江达县、妥坝县、贡觉县、芒康县和盐井县境内,雅鲁藏布江沿线的贡嘎县、扎囊县、加查县和隆子县境内,研究区南部的错那县和墨脱县境内也有较广分布(图 4)。重要区主要分布在澜沧江周边的类乌齐县、昌都县、妥坝县和察雅县境内,山南市

表 4 生态系统服务功能重要性评价结果
Table 4 Evaluation of the importance of ecosystem services

生态系统服务功能 Ecosystem service function	极重要区 Extremely important zone		重要区 Very important zone		一般重要区 General important zone	
	面积 Area (km ²)	面积比例 Proportion of area (%)	面积 Area (km ²)	面积比例 Proportion of area (%)	面积 Area (km ²)	面积比例 Proportion of area (%)
水源涵养	65306	16.12	88338	21.80	251576	62.08
水土保持	88588	21.86	94442	23.31	222190	54.83
防风固沙	63979	15.79	89881	22.18	251360	62.03
生物多样性	44511	10.98	62995	15.55	297714	73.47
综合服务功能	74843	18.47	131698	32.50	198679	49.03

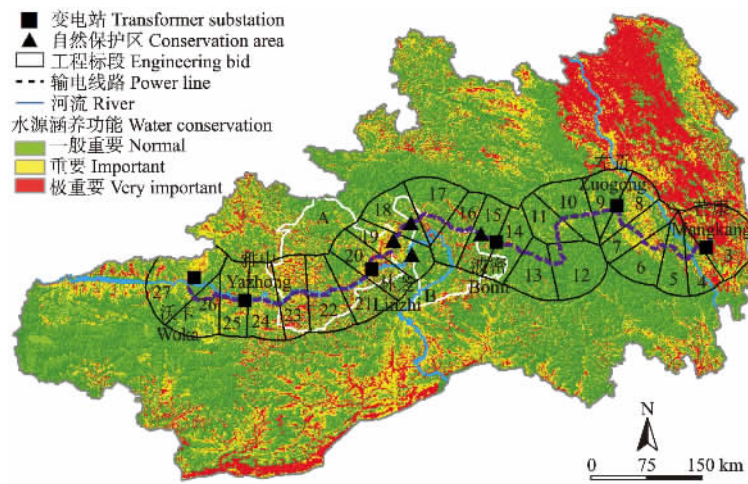


图3 水源涵养功能重要性分布

Fig.3 Spatial distribution of importance evaluation of water conservation

中西部的琼结县、乃东县、桑日县、曲松县和措美县。一般重要区则主要分布在研究区中部的波密县、八宿县、左贡县以及察隅县境内,以及研究区西部的浪子卡县、洛扎县、隆子县和错那县境内。

2.1.3 防风固沙功能重要性 防风固沙是生态系统通过其结构与过程减少由于风蚀所导致的土壤侵蚀的作用。藏东南地区防风固沙极重要区、重要区以及一般重要区的面积分别为 63979、89881 和 251360 km², 对应面积比重分别为 15.19%、22.18% 和 62.03%(表 4)。其中,极重要区和重要区主要分布在东北生达县至西南错那县沿线一带,包括雅鲁藏布江东西流向段(图 5),尤其生达县和错那县的极重要区面积分布较广。另外,研究区东南部分地区的防风固沙功能处于重要等级。雅鲁藏布江南北

流向段与澜沧江之间的区域,防风固沙的重要性较为一般。

2.1.4 生物多样性保护功能重要性 生物多样性保护功能是生态系统在维持基因、物种、生态系统多样性发挥的作用。藏东南地区生态多样性保护功能重要性类型以一般重要为主,面积达到 297714 km², 占总面积的 73.47%; 其次是重要区,面积为 62995 km², 占区域总面积的 15.55%; 极重要区面积为 44511 km², 占区域总面积的 10.98%(表 4)。极重要区主要分布在错那县和墨脱县南部,而重要区主要分布在澜沧江以东的县,包括生达县、昌都县、妥坝县、贡觉县、察雅县、芒康县以及盐井县(图 6)。一般重要区则主要分布在山南市西部、林芝市与昌都市交界处的周边区县。

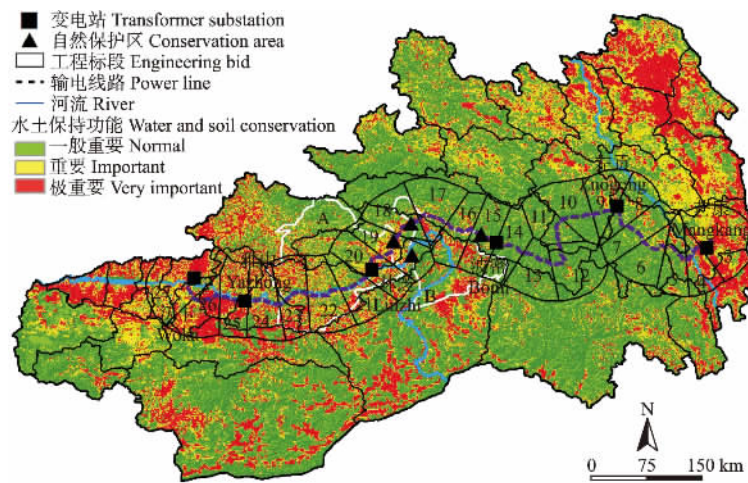


图4 水土保持功能重要性分布

Fig.4 Spatial distribution of importance evaluation of soil and water conservation

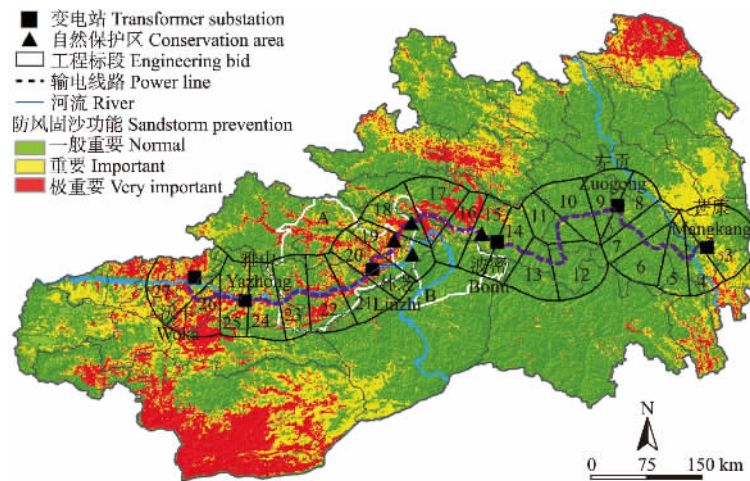


图5 防风固沙功能重要性分布
Fig.5 Spatial distribution of importance evaluation of windbreak and sediment conservation

2.2 生态系统服务功能重要性综合评价

藏东南地区生态系统服务功能一般重要区面积最大,达到 198679 km²,占区域总面积的 49.03%;其次为重要区,面积为 131698 km²,占区域总面积的 32.50%;极重要区面积最小,为 74843 km²,占区域总面积的 18.47%(表 4)。总体上,重要性大致呈现出“东西部高、中部低”的空间分布格局(图 7)。极重要区主要分布在研究区东部的生达县、江达县、妥坝县、贡觉县、芒康县和盐井县,雅鲁藏布江沿线区域以及错那县、墨脱县的南部。重要区主要分布在极重要区外缘,在澜沧江和雅鲁藏布江沿线、研究区北部的丁青县、洛隆县、类乌齐县以及八宿县均有较大面积分布。一般重要区则主要分布在研究区中部林芝昌都交界处以及山南市的中西部地区,具体来

看,主要分布在研究区中部地区的察隅县、波密县、左贡县西部、碧土县北部和西部地区的浪卡子县、洛扎县西部、错那县北部和墨脱县北部。

2.3 电网工程标段影响区的生态系统服务功能重要性

藏中联网工程标段影响区内的生态系统服务功能重要性在空间上也呈现出“东西两端高、中部低”的分布格局(图 7)。图 8 是电网工程各标段影响区内生态系统服务功能重要性面积统计表。从标段影响区内生态系统服务功能极重要区面积比例来看,最东端的标段 3 影响区内的极重要面积比例最大,达到 52.22%;标段 23 和 4 影响区对应的面积比例次之,均超过了 30%;再其次,标段 20、22、24~27 影响区对应的面积比例均在 20%以上。从标段影响

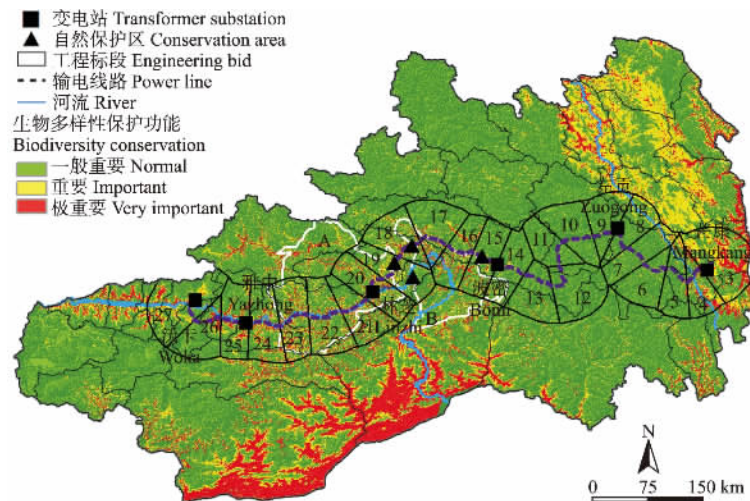


图6 生物多样性保护功能重要性分布
Fig.6 Spatial distribution of importance evaluation of biodiversity protection

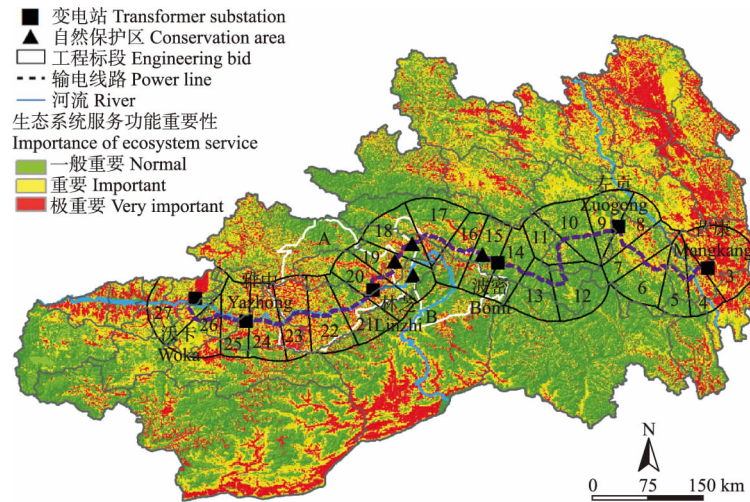


图7 生态系统综合服务功能重要性分布

Fig.7 Spatial distribution of importance evaluation of comprehensive ecosystem services

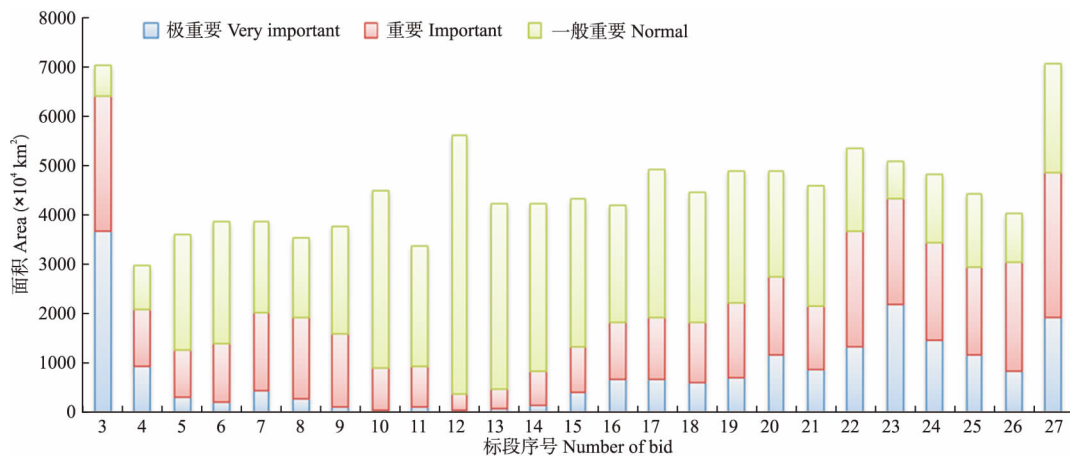


图8 电网工程各标段影响区内生态系统服务功能重要性面积统计

Fig.8 Area statistics of importance of ecosystem services in the influence area of each bid section of the power grid project

区内生态系统服务功能重要区面积比例来看,标段26影响区内的重要面积比例最大,为54.84%;其次,标段7~8、22~25和27对应的面积比例也均超过40%。综合标段影响区内生态系统服务功能极重要区和重要区面积比例之和来看,标段3~4、7~8、20、22~27影响区对应的面积比例在50%以上,其中标段3影响区对应的面积比例最大,达到91.11%;标段7影响区对应的面积比例最小,为51.68%。

3 讨论

目前,有关生态系统服务功能的研究很多,但用于指导电网工程生态保护的相关研究仍比较缺乏,尤其是在需要重点保护的西藏高寒脆弱敏感地区。本研究基于GIS和RS技术对藏中联网工程沿线区

域的生态系统服务功能重要性进行了评价。从生态系统服务功能重要性的空间格局来看,研究区生态系统服务功能极重要区域气候比较温暖湿润,分布大量森林;澜沧江沿线及其以东区域主要分布有亚高山针叶林和温性灌丛;错那县、墨脱县南部属于热带森林分布区;雅鲁藏布江沿线也广泛分布着亚热带森林。这些森林生态系统对藏东南地区的水源涵养、水土保持、防风固沙以及生物多样性保护功能有着重要的支撑作用,符合藏东南地区在全区尺度上的森林生态系统安全屏障的功能定位(王小丹等,2017)。

从各标段影响区来看,藏中联网工程东西两侧标段影响区内的生态系统服务功能重要性相对较高,标段3~4、7~8、20、22~27影响区内50%以上面积均为生态系统服务功能极重要区和重要区(图7、

表5),在联网工程施工过程中需要特别注重加强生态保护。结合各单项生态系统服务功能具体来看,标段3~4地处川、滇、藏三省区交汇处,分布有横断山脉和众多河流,施工中需要加强水源涵养和生物多样性保护。标段7~8则应做好水源涵养和水土保持相关保护工作。标段20主要需要加强水土保持和防风固沙功能的保护。标段22~27位于雅鲁藏布江中游,喜马拉雅山北翼,施工过程中要加强这些标段的水土保持和防风固沙功能保护,另外还需加强保护标段22~23的生物多样性功能以及标段23~24的水源涵养功能。

本研究基于藏东南地区各县的生态功能定位确定生态系统服务功能的保护顺序,再通过专家打分得到了不同生态功能区的各项评价因子权重。该方法在专家打分之前结合当前生态保护政策确认了各单项评价因子的权重大小顺序,一定程度上降低了传统专家打分法的主观性和不确定性。在本研究中,工程线路及变电站是施工单位基于独立勘察后完成选址,与本研究评估过程相互独立,而在对照评价结果与实际选址后表明(图8),评价结果与施工单位客观经验选址结果高度一致,尤其是占用空间相对较高的变电站在选址上都能规避区域范围内的极重要区域,评价结果的准确性也通过勘察结果得到了验证。需要指出的是,本研究所采用的基础数据均由遥感反演或空间插值得到,数据处理过程中存在的误差对分析结果的准确性会有一定影响。根据气象站点进行插值的格网气象数据产品由于空间面积较大都存在一定的不确定性,特别是降水的分布较为随机,进行格网化拟合过程中造成的不确定性更大。基于这一考虑,我们仅在本次研究的研究区范围内进行气象站点数据的克里金插值处理,通过缩小插值范围的方式提高插值精度,以求降低格网数据的不确定性。但整体而言,分析结果仍能充分反映出藏东南地区典型输电工程沿线区域生态系统服务功能重要性的空间分布格局。基于生态系统服务功能重要性评价结果能够客观指导各标段在施工过程中如何采取适当的生态保护措施,但工程标段施工的生态保护还需考虑沿线区域生态环境敏感性(曾业隆等,2017)。另外,生态系统服务功能重要性评价结果并未完全凸显出自然保护区的生态价值,设计施工路线时需尽量避让;如无法避免,需要根据自然保护区的相关保护政策采取严格的施工环保措施,将对环境的负面效应降至最低。此外,具体

施工时还应在小尺度上关注电磁辐射等因素对生态环境的影响。本研究的技术方法具有普适性,对区域环境背景相似的大型廊道类工程具有借鉴意义和参考价值。

4 结 论

藏东南地区水源涵养极重要区面积占比16.12%,主要分布在澜沧江以东区域以及错那县、墨脱县的南部;水土保持极重要区面积比重达到21.86%,主要分布在昌都市东部和雅鲁藏布江沿线区域;防风固沙极重要区面积占比15.19%,主要位于生达县和错那县;生物多样性保护极重要区面积比重为10.98%,主要位于错那县和墨脱县南部。

藏东南地区生态系统服务功能重要性总体上大致呈现出“东西部高、中部低”的空间分布格局,极重要区面积为74843 km²,占区域总面积的18.47%,主要分布在藏东南的森林区,包括澜沧江沿线及其以东地区、雅鲁藏布江沿线及错那县、墨脱县南部。

藏中联网工程东、西两端标段影响区内的生态系统服务功能重要性相对较高。具体而言,标段3~4、7~8、20、22~27影响区内极重要区和重要区面积比例均在50%以上,在施工过程中应根据影响区内水源涵养、水土保持、防风固沙以及生物多样性保护功能重要性的分布状况采取相应措施加强生态环境保护。

参考文献

- 白 杨, 郑 华, 庄长伟, 等. 2013. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. 生态学报, 33(3): 711-717. [Bai Y, Zheng H, Zhuang CW, et al. 2013. Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, 33(3): 711-717.]
- 陈 辉, 李双成, 郑 度. 2005. 基于人工神经网络的青藏公路铁路沿线生态系统风险研究. 北京大学学报(自然科学版), 41(4): 586-593. [Chen H, Li SC, Zheng D. 2005. Ecological risk assessment of regions alongside Qinghai-Xizang highway and railway based on artificial neural network. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 41(4): 586-593.]
- 陈利顶, 吕一河, 田惠颖, 等. 2007. 重大工程建设中生态安全格局构建基本原则和方法. 应用生态学报, 18(3): 674-680. [Chen LD, Lu YH, Tian HY, et al. 2007. Principles and methodology for ecological rehabilitation and security pattern design in key project construction. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(3): 674-680.]
- 陈 涛, 叶有华, 孙芳芳, 等. 2018. 基于SPOT数据的深圳市生态系统服务功能重要性评价. 生态经济, 34(2):

- 151-157. [Chen T, Ye YH, Sun FF, *et al.* 2018. Assessment on the importance of ecosystem service function in Shenzhen City based on SPOT data. *Ecological Economy*, **34**(2): 151-157.]
- 董仁才, 孙晓泽, 李春明, 等. 2011. 青藏铁路沿线生态环境敏感性评价 GIS 模型. *生态学杂志*, **30**(9): 2093-2098. [Dong RC, Sun XZ, Li CM, *et al.* 2011. GIS model for eco-environmental sensitivity assessment of the areas along Qinghai-Tibetan railway. *Chinese Journal of Ecology*, **30**(9): 2093-2098.]
- 付奇, 李波, 杨琳琳, 等. 2016. 西北干旱区生态系统服务重要性评价——以阿勒泰地区为例. *干旱区资源与环境*, **30**(10): 70-75. [Fu Q, Li B, Yang LL, *et al.* 2016. Importance evaluation of typical ecosystem services in arid regions of northwest China: A case study in Altay Prefecture. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, **30**(10): 70-75.]
- 高江波, 赵志强, 李双成. 2008. 基于地理信息系统的青藏铁路穿越区生态系统恢复力评价. *应用生态学报*, **19**(11): 2473-2479. [Gao JB, Zhao ZQ, Li SC. 2008. Evaluation of ecosystem resilience in the regions across Qinghai-Tibet railway based on GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **19**(11): 2473-2479.]
- 郭明凡, 裴华, 徐成, 等. 2010. 电力工程水土保持准入条件. *中国水土保持科学*, **8**(3): 67-73. [Guo MF, Pei H, Xu C, *et al.* 2010. Permitted requirements of soil and water conservation for power projects. *Science of Soil and Water Conservation*, **8**(3): 67-73.]
- 郭荣中, 杨敏华. 2014. 长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测. *农业工程学报*, **30**(5): 238-246. [Guo RZ, Yang MH. 2014. Ecosystem service value analysis and trend prediction in Chang-Zhu-Tan region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **30**(5): 238-246.]
- 何玲, 贾启建, 李超, 等. 2016. 基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟. *农业工程学报*, **32**(3): 275-284. [He L, Jia QJ, Li C, *et al.* 2016. Land use pattern simulation based on ecosystem service value and ecological security pattern. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **32**(3): 275-284.]
- 李丽锋, 惠淑荣, 宋红丽, 等. 2013. 盘锦双台河口湿地生态系统服务功能价值评价. *中国环境科学*, **33**(8): 1454-1458. [Li LF, Hui SR, Song HL, *et al.* 2013. Evaluation of the services provided by the Shuangtai estuary wetland in Panjin based on emergy theory. *China Environmental Science*, **33**(8): 1454-1458.]
- 凌文州, 董晓红, 严福章, 等. 2012. 青藏直连联网工程生态影响预测及保护. *南水北调与水利科技*, **10**(3): 92-97. [Ling WZ, Dong XH, Yan FZ, *et al.* 2012. Prediction of ecological impact and ecological protection of Qinghai-Tibet DC interconnection project. *South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology*, **10**(3): 92-97.]
- 刘世梁, 赵爽, 成方妍, 等. 2018. 市域尺度两种生态系统服务评价方法对比研究. *中国生态农业学报*, **26**(9): 1315-1323. [Liu SL, Zhao S, Cheng FY, *et al.* 2018. Comparative study on two evaluating methods of ecosystem services at city-scale. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, **26**(9): 1315-1323.]
- 刘智方, 唐立娜, 高莉洁, 等. 2016. 生态系统服务模型应用的研究. *环境科学与技术*, **39**(S1): 387-392. [Liu ZF, Tang LN, Gao LJ, *et al.* 2016. Research of the application of ecosystem services model. *Environmental Science and Technology*, **39**(S1): 387-392.]
- 刘军会, 马苏, 高吉喜, 等. 2018. 区域尺度生态保护红线划定——以京津冀地区为例. *中国环境科学*, **38**(7): 2652-2657. [Liu JH, Ma S, Gao JX, *et al.* 2018. Delineating the ecological conservation redline at regional scale: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region. *China Environmental Science*, **38**(7): 2652-2657.]
- 吕一河, 张立伟, 王江磊. 2013. 生态系统及其服务保护评估: 指标与方法. *应用生态学报*, **24**(5): 1237-1243. [Lu YH, Zhang LW, Wang JL. 2013. Assessment of ecosystem and its services conservation: Indicators and methods. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **24**(5): 1237-1243.]
- 马士新, 毕超, 徐化东, 等. 2010. 110 kV 架空输电线路水土保持措施体系配置研究. *水土保持通报*, **30**(6): 162-165. [Ma SX, Bi C, Xu HD, *et al.* 2010. Soil and water conservation measures for 110 kV overhead power transmission lines. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, **30**(6): 162-165.]
- 生态环境部, 国家发展和改革委员会. 2017. 生态保护红线划定指南. 北京: 生态环境部, 国家发展和改革委员会. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2017. Guide of delineation for ecological protection red lines.]
- 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, **67**(1): 3-12. [Sun HL, Zheng D, Yao TD, *et al.* 2012. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, **67**(1): 3-12.]
- 王小丹, 程根伟, 赵涛, 等. 2017. 西藏生态安全屏障保护与建设成效评估. *中国科学院院刊*, **32**(1): 29-34. [Wang XD, Cheng GW, Zhao T, *et al.* 2017. Assessment on protection and construction of ecological safety shelter for Tibet. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, **32**(1): 29-34.]
- 西藏自治区人民政府. 2014. 西藏自治区主体功能区规划. 拉萨: 西藏自治区人民政府. [The People's Government of Tibet Autonomous Region. 2014. Programing of principal function region for Tibet Autonomous. Lhasa: The People's Government of Tibet Autonomous Region.]
- 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 2003. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, **18**(2): 189-196. [Xie GD, Lu CX, Leng YF, *et al.* 2003. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, **18**(2): 189-196.]
- 熊善高, 秦昌波, 于雷, 等. 2018. 基于生态系统服务功能

- 和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例. 生态学报, **38**(22): 7899–7911. [Xiong SG, Qin CB, Yu L, *et al.* 2018. Methods to identify the boundary of ecological space based on ecosystem service functions and ecological sensitivity: A case study of Nanning City. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(22): 7899–7911.]
- 闫超. 2010. 输变电类生产建设项目水土流失特点及水土保持综合效益评价研究(硕士学位论文). 南京: 南京农业大学. [Yan C. 2010. A Study on Soil Erosion Characteristics and Comprehensive Benefits Evaluation of Power Transmission Engineering (Master's thesis). Nanjing: Nanjing Agricultural University.]
- 姚檀栋, 朱立平. 2006. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. 地球科学进展, **21**(5): 459–464. [Yao TD, Zhu LP. 2006. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy. *Advances in Earth Science*, **21**(5): 459–464.]
- 于伯华, 吕昌河. 2011. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价. 地理研究, **30**(12): 2289–2295. [Yu BH, Lu CH. 2011. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau. *Geographical Research*, **30**(12): 2289–2295.]
- 曾业隆, 周全, 江栗, 等. 2017. 基于遥感与GIS的青藏高原典型电网工程生态环境敏感性分析. 中国环境科学, **37**(8): 3096–3106. [Zeng YL, Zhou Q, Jiang L, *et al.* 2017. Eco-environmental sensitivity analysis of typical power grid engineering on Tibetan Plateau based on RS and GIS. *China Environmental Science*, **37**(8): 3096–3106.]
- 张立伟, 傅伯杰, 吕一河, 等. 2016. 基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究. 地理学报, **71**(5): 768–780. [Zhang LW, Fu BJ, Lu YH, *et al.* 2016. The using of composite indicators to assess the conservational effectiveness of ecosystem services in China. *Acta Geographica Sinica*, **71**(5): 768–780.]
- 张扬建, 范春捆, 黄珂, 等. 2017. 遥感在生态系统生态学上应用的机遇与挑战. 生态学杂志, **36**(3): 809–823. [Zhang YJ, Fan CK, Huang K, *et al.* 2017. Opportunities and challenges in remote sensing applications to ecosystem ecology. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(3): 809–823.]
- 朱立晨, 王豪伟, 唐立娜. 2018. 闽三角区域生态系统服务重要性评价及其空间分布. 生态学报, **38**(20): 7254–7268. [Zhu LC, Wang HW, Tang LN. 2018. Importance evaluation and spatial distribution analysis of ecosystem services in Min triangle area. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(20): 7254–7268.]
- 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 2007. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, **31**(3): 413–424. [Zhu WQ, Pan YZ, Zhang JS. 2007. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, **31**(3): 413–424.]
- Barral MP, Oscar MN. 2012. Land-use planning based on ecosystem service assessment: A case study in the southeast Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **154**: 34–43.
- Carreño L, Frank FC, Viglizzo EF. 2012. Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **154**: 68–77.
- Chen BX, Zhang XZ, Tao J, *et al.* 2014. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, **189**: 11–18.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253–260.
- Cramer W, Kicklighter DW, Bondeau A, *et al.* 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results. *Global Change Biology*, **5**: 1–15.
- de Araujo Barbosa CC, Atkinson PM, Dearing JA. 2015. Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, **52**: 430–443.
- Leh MDK, Matlock MD, Cummings EC, *et al.* 2013. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **165**: 6–18.
- Repetto R. 1992. Accounting for environmental assets. *Scientific American*, **266**: 94–101.
- Scurlock JMO, Johnson K, Olson RJ. 2002. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, **8**: 736–753.

作者简介 蔡德峰,男,1971年生,主要从事电网工程建设运行管理和研究工作。E-mail: 24241011@qq.com
责任编辑 魏中青

蔡德峰, 张扬建, 丛楠, 殷国栋, 王荔, 张明勋, 俎佳星, 周全, 陈宁, 刘瑶杰, 蓝健均, 蔡绍荣, 张戈. 2021. 藏中联网工程生态系统服务功能重要性评价. 生态学杂志, **40**(2): 593–603.
Cai DF, Zhang YJ, Cong N, Yin GD, Wang L, Zhang MX, Zu JX, Zhou Q, Chen N, Liu YJ, Lan JJ, Cai SR, Zhang G. 2021. Assessment on the importance of ecosystem services along the Transmission Line of Tibet Networking Project. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(2): 593–603.