

基于 3S 技术的水库集水区桉树 人工林生态系统服务动态

王贺亚¹, 黄沈发², 郭晋川³, 王 卿², 李荣辉³, 吴建强²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620;

2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 广西壮族自治区水利科学研究院, 南宁 530000)

摘要:为了从理论上论证经济利益导向下的桉树人工林种植与区域生态质量的关系,基于遥感技术(RS)、全球定位系统(GPS)与地理信息系统(GIS),通过文献调研、现场调查、解译、反演(NDVI、FVC、生物量、NPP)与空间分析运算,获得了近 10 年广西元宵水库集水区桉树人工林与马尾松群落的生态系统服务(水源涵养、环境净化、产品提供、固碳释氧、土壤保育、生物多样性保护)价值时空动态分布格局。结果表明:(1) NDVI 与 FVC 适用于开展多种植被参量的遥感反演;(2) 马尾松群落的单位面积生态系统服务价值明显优于桉树人工林;(3) 桉树群落的生态系统服务随树龄的增加而提高,桉树成熟林的服务价值接近马尾松群落,说明桉树本身不会引发水分、养分消耗过量等问题;在马尾松砍伐期与桉树轮伐期,水库集水区的生态系统结构波动剧烈,生态系统服务下降。因此,经济利益导向下的剧烈人为扰动成为桉树人工林种植区生态质量显著下降的主要原因。

关键词:水库; 集水区; 桉树人工林; 3S 技术; 生物量; 净初级生产力; 生态系统服务

中图分类号: X24; X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0227-10

Dynamic Ecosystem Service of *Eucalyptus* spp. Plantation in Reservoir Watershed Based on 3S Technology

WANG Heya¹, HUANG Shenfa², GUO Jinchuan³, WANG Qing², LI Ronghui³, WU Jianqiang²

(1. School of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Guangxi Institute of Water Resources Research, Nanning 530000, China)

Abstract: The study aimed at theoretically demonstrating the relationship between regional ecological quality and *Eucalyptus* spp. plantation planting driven by economic benefit. Based on remote sensing technology (RS), global positioning system (GPS) and geographic information system (GIS), as well as document research, field investigation, RS interpretation, RS inversion (NDVI, FVC, biomass, NPP) and spatial analysis, we took Guangxi Yuanxiao Reservoir watershed as an object and did some research on dynamic spatio-temporal ecosystem service of *Eucalyptus* spp. plantation community and *Pinus massoniana* community. The ecosystem service included water conservation, environment purification, carbon fixed and oxygen emission, product provision, soil conservation and biodiversity protection. The results are as follows. (1) NDVI and FVC were applicable to remote sensing inversion of various vegetation parameters. (2) Average unit ecosystem service value of *Pinus massoniana* community was much better than that of *Eucalyptus* spp. plantation community. (3) Ecosystem services of *Eucalyptus* spp. plantation increased with the growth of year and the ecosystem values of mature trees were close to *Pinus massoniana*, which meant that the plantation itself would not lead to problems such as water and nutrient excessive consumption; *Pinus massoniana* deforestation and *Eucalyptus* spp. plantation rotation influenced ecological quality of the reservoir watershed greatly. In conclusion, violent human disturbance driven by economic benefit was the main reason for the significant decline in ecological quality of *Eucalyptus* spp. plantation area.

收稿日期: 2017-08-13

修回日期: 2017-09-14

资助项目: 水利部公益性行业科研专项“速生桉树人工林对水库的生态效应与影响机制研究”(201301044); 国家自然科学基金“水位梯度驱动下鱼类群体迁移诱发机制研究”(51409050)

第一作者: 王贺亚(1990—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向为环境遥感应用。E-mail: why296741304@126.com

Keywords: reservoir; watershed; *Eucalyptus* spp. plantation; 3S technology; biomass; net primary productivity; ecosystem service

森林与水体所构成的系统是城市空气交换、水源涵养、生物多样性保护的重要媒介^[1]。水库生态系统属于人工生态系统,生态学特征独特^[2],随着社会经济的发展,供水成为水库继防洪、发电之后的又一重要功能,水库集水区的生态环境安全,直接影响水库的供水质量与城市人居安全^[3]。较之于大型水库^[4](库容>1 亿 m³),小型水库(库容 10 万~1 000 万 m³)集水区内的 大气、水体、土壤等会对水库的生态质量产生更大影响^[5]。20 世纪 60 年代中期以来,广西南宁桉树人工林的种植规模大幅增加^[6]。人工林是指通过人工播种、栽植或扦插等技术方法培育而成的森林^[7],具有培育时间短、单位面积产量高、相对收益高、集约经营管理等特点^[8]。种植人工林有利于发展地区经济、提高林农收入、缓解资源短缺等问题。在我国,对桉树人工林的争论主要有三,是否过度消耗水分?是否过度消耗养分?是否会造成生物多样性下降^[9]?

元宵水库是南宁市武鸣县的重要饮用水源地之一,兼具水源供给、气候调节等多种社会效益与生态效益。近 10 年间,水库集水区的马尾松生态林几乎全部被桉树人工林取代,鉴于种植桉树后开始显现的多种生态问题^[10],本文基于地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)与遥感技术(RS)(3S 技术),通过研究两种植物群落的分布格局、植被覆盖度、生物量、净初级生产力、生态系统服务等多项指标,从理论上论证经济利益导向下的桉树人工林种植与区域生态质量的关系^[11]。

1 研究区概况

元宵水库位于广西壮族自治区南宁市武鸣县府城镇进元村北侧,水域面积约为 81 hm²,集水区面积约为 826 hm²,有效库容为 1 123 万 m³,是武鸣县的重要饮用水水源之一。水库集水区地处南亚热带季风气候区,年均日照总数为 1 674 h,年均降雨量为 1 261 mm,多年平均气温为 21.7℃,年均相对湿度为 78%,多年平均风速为 1.9 m/s。水库库区处于三迭统粉砂岩、泥页岩地层,未发现区域构造断裂通过。水库及周边地区多为海拔 500 m 以下的低矮丘陵,土壤类型以砂页岩、砂岩和第四纪红土母质发育而成的台地赤红壤、丘陵赤红壤为主,肥力中等、土层比较厚实、土壤质地比较疏松。植被以桉树(*Eucalyptus* spp.)人工林与马尾松(*Pinus massoniana*)林为主。近年来,元宵水库集水区桉树人工林种植面积不断扩

大,2015 年,桉树人工林面积约为 729.18 hm²,占总面积的 97.88%。与 2005 年相比,桉树人工林种植面积增幅达到 129.78%。

2 材料与方法

2.1 数据源

2.1.1 遥感影像 传统的森林资源调查方法成本高、耗时长、工作量大、技术标准难以统一,受时间、空间、人员等多种因素限制,难以在短期内形成具有可比性的调查结果^[12]。遥感影像具有空间宏观性、周期性、多分辨率、所含信息量大等特点,有效避免了传统调查方法的不足^[13]。如表 1 所示,本研究的遥感数据源包括中分辨率遥感影像和高分辨率遥感影像。其中,高分影像用于解译,中分影像用于反演。为了提高地物信息的吻合程度,选取中分影像时,优先选择成像时间与高分影像最为接近的影像。

表 1 遥感影像数据源

类型	卫星	传感器	成像时间(年-月-日)
高分影像	SPOT-5	全色波段 多光谱	2005-10-16,2006-11-10,2007-11-11
			2008-04-29,2009-12-05
	ALOS		2010-10-11
	Quickbird		2011-09-18
	ZY-3		2013-12-06,2014-11-10,2015-02-21
中分影像	Landsat-5	TM	2005-10-11,2006-09-12,2007-05-26,2008-11-27, 2009-10-06,2010-10-01,2011-11-06
	Landsat-8	OLI	2013-12-04,2014-10-11,2015-01-15

2.1.2 现场调查 现场调查是解译的前提。首先根据资料调研与人员访谈开展高分影像的信息预判读工作,初步确定地物类型与空间分布;随后确定地面控制点,通过现场核查匹配地物信息与影像信息,提高解译精度。对于预判读阶段难以识别的区域,需要加密布点;在植物群落内布设 60 个样方,样方尺寸为 15 m×15 m。划定样方时,必须保证样方内树种一致,植株长势正常,并且需要避开道路等人为扰动频繁的区域。

本次地面调查的测量指标包括树龄、树高、胸径、株距、行距、覆盖度等。其中,树木生长锥用于测量样方中部分植株的年轮(即树龄);美国 APRESYSTP 2000 激光测高仪用于逐一测量样方中各植株的树高;胸径尺用于逐一测量样方中各植株距地面 1.3 m 处的直径(即胸径);使用鱼眼相机在样方 2 条对角线上均匀选取 5 个点,保持鱼眼相机垂直,避免采样方向与栽种的行或列平行,获得植被覆盖度。此外,现场调查发现,刚刚完成桉树轮伐的地块,由于放火烧

山等迹地清理活动,地表基本呈现裸露状态;随着桉树树龄的增加,林下植被基本呈现逐渐加密的趋势,群落结构由上到下依次为乔木、灌木与草本植物。与桉树相比,马尾松的林下植被更为茂盛,种类与桉树林下植被类似。

2.1.3 其他 除植物群落参数外,该资助项目的另一专题还对研究区域不同植物群落的蒸腾、蒸散数据开展了实地测量。此外,气象数据、物价、水库运行参数与流域管理文件等主要由广西壮族自治区水利科学研究院(简称水科院)提供,少部分则通过文献调研获取。

2.2 研究方法

2.2.1 解译

(1) 影像预处理。影像预处理包括大气校正、几何校正、正射校正、影像融合、影像镶嵌与精度检验^[14]。

(2) 解译方法。基于像元与面向对象是两类常用的遥感解译方法,为了获得最为精确的解译结果,本研究选取了人机交互目视解译法^[15]。

2.2.2 反演 遥感的本质是反演,即借助观测信息(遥感数据)与物理模型,求解目标参数的过程。植被覆盖度、生物量^[16]与净初级生产力^[17]等植被参量是反映生态系统结构与功能的重要指标^[18],同时也是开展植物群落生态系统服务评价的重要参量。开展植被参量的遥感反演时,需要引入植被指数(VI, Vegetation Index)。VI由卫星不同波段探测数据组合而成,可以定性、定量地评价植物生长状况^[19]。目前可用的VI已有40余种,其中归一化差分植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)的应用范围最为广泛^[20]。

(1) NDVI反演。NDVI是表征植物生长状况的重要参量,范围为-1~1,负值表示云、水、雪等对可见光具有高反射率的物体,0表示有岩石或裸土等,正值表示有植被覆盖,且与植被覆盖度呈线性关系^[21],反演方法为:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$$

式中: ρ_{nir} 与 ρ_{red} 分别代表遥感影像红外波段与红光波段的反射率。

(2) FVC反演。植被覆盖度(FVC, Fractional Vegetation Cover)指植物群落总体或个体的地上部分的垂直投影面积与样方面积之比(%),反演方法为:

$$FVC = \frac{NDVI_i - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

式中: i 表示第 i 个像元;veg表示纯植被区;soil表示裸土或无植被区。由于植被覆盖度与NDVI呈线性关系,因此基于NDVI的植被覆盖度反演能够较好

地反映研究区域的植被覆盖情况,有利于开展涵养水源、保育土壤等多项生态系统服务研究。

(3) 生物量反演。生物量是指植物群落在一定时间内积累的有机质总量(干重)。通过对若干生物量拟合模型进行比选,选取下列公式计算植株地上生物量^[22-23]。

$$\text{桉树: } W = 0.0567 D^{1.8663} \times H^{0.8116}$$

$$\text{马尾松: } W = 0.0561 D^{2.0727} \times H^{0.6148}$$

式中: W 为地上生物量(t/hm^2); D 为某一样方内植株胸径平均值(cm); H 为对应样方内植株树高平均值(m)。

(4) NPP反演。净初级生产力(NPP, Net Primary Productivity)是单位时间、单位面积上绿色植物通过光合作用积累有机物的量(总初级生产力)与自身呼吸消耗量的差值,计算方法如下:

$$NPP = APAR \times \epsilon$$

式中:APAR为吸收的光合有效辐射 $[g/(m^2 \cdot 月)]$; ϵ 为实际光利用率(g/MJ)。

$$APAR = SOL \times FPAR \times 0.5$$

$$FPAR = \min \left\{ \frac{SR - SR_{min}}{SR_{max} - SR_{min}}, 0.95 \right\}$$

$$SR = \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI}$$

式中:SOL为太阳总辐射量 $[MJ/(m^2 \cdot 月)]$,根据中国气象局发布的全国太阳能总辐射量与年均日照当量数据,IV类地区的太阳总辐射量均值为4603 MJ/ $(m^2 \cdot a)$; FPAR为植被层对入射光合有效辐射(PAR)的吸收比例;0.5为植被所能利用的太阳有效辐射(波长为0.4~0.7 μm)占太阳总辐射的比例;SR为植被指数的简单比率。

$$\epsilon = \sigma_E \times \sigma_T \times \epsilon^*$$

$$\sigma_T = \frac{1}{1 + e^{\frac{-220000 + 710 \times (T_s + 273.16)}{8.314 \times (T_s + 273.16)}}}$$

$$\sigma_E = 1.2 \times e^{-0.35 \times E_v} - 0.2$$

$$E_v = 0.611 \times \left(e^{\frac{17.27 \times (T_s - 273.16)}{T_s - 35.86}} - e^{\frac{17.27 \times (T_d - 273.16)}{T_d - 35.86}} \right)$$

$$T_d = \frac{\ln(\omega + 0.0001) + 0.981}{0.0341}$$

$$\omega = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 \times e^2$$

式中: σ_E 和 σ_T 分别为大气水分含量和温度对植物生长的影响系数; ϵ^* 为理想条件下的最大光能转化率,在CASA模型中全球植被最大光能利用率为0.389 g/MJ; E_v 为大气水汽压差; T_s 为近地层气温或地表温度(K); T_d 为近地层露点温度(K); ω 为整层大气水汽含量(g/cm^2); φ 为地理纬度(rad); e 为地面水汽压(hPa); α 为经验系数, α_0 取0.369 1, α_1 取0.236 7, α_2 取0^[24]。

2.2.3 生态系统服务评价 生态系统服务是指生态

系统与生态过程形成并维持着的人类赖以生存的自然环境条件与效应^[25]。生态系统服务评价方法问世以来,便受到了各界学者的广泛关注^[26-27]。1997年, Costanza 等^[28]基于生态服务供求曲线,逐项估算各生态系统的服务价值,进而得到全球生态系统服务价值。2001年,谢高地等^[29]基于 Costanza 的研究方法,利用生物量修正服务价值,估算得到我国自然草地生态系统的服务价值。2008年国家林业局发布了《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008)林业行业标准。经过数十年的讨论与验证,基于 3S 技术的生态系统服务评价方法已经成为应用最为广泛的评价方法^[30]。根据研究区域特点,本研究选取涵养水源、保育土壤、固碳释氧、净化大气环境、生物多样性保护与产品提供 6 项服务。

(1) 产品提供。产品提供体现了森林生态系统服务的直接经济价值,采用市场价值法计算桉树人工林的产品提供价值^[31]。

$$V_p = \sum A_j \times V_j \times P_j$$

式中: V_p 为森林生态系统提供产品的总价值(元/a); j 表示不同森林类型; A_j 为第 j 种森林类型的分布面积(hm^2),通过遥感解译获得; V_j 为第 j 种森林类型单位面积净生长量或产量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$,通过 NPP 反演获得; P_j 为第 j 种森林类型木材的市场价格(元/t),根据当地物价水平确定。同时,桉树抚育需要耗费经济成本,基于蒋焱等^[32]的研究成果,包括土地、树苗、肥料、管理 4 部分费用,约为 $5\,291.25$ 元/ $(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2) 固碳释氧。采用造林成本法和碳税法计算森林生态系统的固碳释氧价值。

$$V_q = \sum \text{NPP}_j \times (1.63 \times R_c \times P_c + 1.2 \times P_o)$$

式中: V_q 是固碳释氧价值(元/a); NPP_j 为第 j 类森林类型的净初级生产力 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; R_c 为 CO_2 中碳的含量,为 27.27%; P_c 为固定 CO_2 的价格(元/t),取 1 200 元/t; P_o 为制造 O_2 的价格(元/t),取 1 000 元/t^[33]。

(3) 涵养水源。基于 InVEST(Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型的产水量模型,通过径流调节量评估研究区域的水源涵养能力^[34]。

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}\right) \times P_x$$

式中: Y_{xj} 是 j 类土地利用类型中像元 x 的年产水量(mm); AET_{xj} 是 j 类土地利用类型中像元 x 的年实际蒸散量(mm),不同植物群落类型的蒸散量存在明显差别^[35],本研究的蒸散量数据为实测数据,同时,需要结合 ArcGIS 的空间分析工具,采用“反距离权重法”,以获得覆盖研究区域的蒸散数据; P_x 为像元

x 的年降雨量(mm)。最后,利用影子价值法估算森林水源涵养价值,以建造水库成本估算森林生态系统水源涵养价值,单位库容造价为 6.11 元/ m^3 ^[36]。

(4) 保育土壤。3S 技术与通用土壤流失方程(USLE, Universal Soil Loss Equation)被广泛应用于评价土壤侵蚀风险、流域管理与规划、模拟水土保持方案等领域^[37]。在一定范围内,土壤侵蚀速率越小,其保育土壤功能越好,其计算方法为:

$$\text{USLE}_x = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \times C_x \times P_x$$

$$T_h = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \times (1 - C_x \times P_x)$$

$$V_a = T_h \times \sum (C_i \times P_i)$$

式中: USLE_x 表示栅格 x 的土壤侵蚀量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; T_h 为保育土壤量 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; V_a 为保持土壤养分价值; R_x 为降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ^[38]; K_x 为土壤可蚀性因子; LS_x 为坡度、坡长因子; C_x 为植被与管理因子; P_x 为水土保持措施因子; i 为土壤中养分种类,仅考虑氮、磷、钾三项; C_i 为土壤中第 i 类养分含量(t/t),根据郑国东^[39]、王月容等^[40]的研究成果,水库集水区氮、磷、钾含量分别为 1.43, 0.52, 1.0 mg/g; P_i 为第 i 类养分的市场价格(元/t),根据研究区域的物价水平,尿素为 2 000 元/t,过磷酸钙为 500 元/t,氯化钾为 2 000 元/t。

① 降雨侵蚀力因子 R 。采用年均降雨量估测法估算 R 值。

$$R = \alpha \times P^\beta$$

式中: R 为年均降雨量(mm); α, β 为模型参数,蔡崇法等^[41]结合 EI30 法(Wischmeier 经典法)估算不同年降雨量时的 R 值,获得良好效果,通过数据拟合,确定 α 为 0.001, β 为 1.787。

② 土壤可蚀性因子 K 。土壤可蚀性(Soil erodibility)是衡量土壤抗侵蚀能力和抗冲击能力的重要因子^[42]。研究区域的土壤类型为赤红壤, K 取 0.238^[43]。

③ 坡度坡长因子 LS 。 LS 因子是基于通用水土流失模型开展区域土壤侵蚀评价的重要因子^[44],需要借助数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model)开展空间分析。 LS 因子的计算方法为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin\theta + 0.036 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \times \sin\theta - 0.05 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \times \sin\theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases}$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta < 1^\circ \\ 0.2 & 1^\circ \leq \theta < 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ \leq \theta < 5^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 5^\circ \end{cases}$$

式中: S 为坡度因子(无量纲); θ 为坡度(度); L 为坡长因子(无量纲); λ 为坡长(m); m 是坡长指数(无量纲);22.1为22.1 m标准小区坡长。

④ 植被与管理因子 C 。植被与管理因子 C 是表征植被覆盖度和管理措施对土壤侵蚀影响的重要因子,直接反映人为活动对保育土壤与土壤流失的影响程度^[45],取值介于0~1。目前应用较为广泛的是基于植被覆盖度的植被与管理因子估算方法^[41],其计算方法为:

$$C = \begin{cases} 1 & c \leq 1\% \\ 0.6508 - 0.3436 \times \lg c & 1\% < c \leq 78.3\% \\ 0 & c > 78.3\% \end{cases}$$

式中: c 为植被覆盖度(%)。针对桉树群落,由于其林下植被基本伴随桉树树龄的增加而增加,因此植被覆盖度能够反映 C 的优劣,不致出现“远看绿油油,近看黄水流”的现象。

⑤ 水土保持措施因子 P 。水土保持因子是特定水土保持措施下土壤流失量与起伏地耕作的土壤流失量之比, P 介于0~1^[46],选取等高带状耕作模式下不同坡度对应的 P 值($P_{\text{坡度} < 5^\circ} = 0.3$, $P_{\text{坡度} 5^\circ \sim 10^\circ} = 0.5$, $P_{\text{坡度} > 10^\circ} = 0.6$)^[47]进行计算。

(5) 净化大气环境。森林生态系统对大气中的二氧化硫、氮氧化物、氟化物和粉尘均具有良好的吸收效果,其净化功能与树种、环境污染物浓度等有关^[9]。基于生物量估算森林净化大气环境功能价值,计算方法为:

$$FP_i = \sum_{j=1}^n A_j \times C_j \times P_j$$

$$C_j = \frac{B_j}{\sum_{j=1}^n \frac{B_j}{n}}$$

$$U = \sum_{i=1}^4 K_i \times FP_i$$

式中: i 为污染物质种类,包括二氧化硫、氮氧化物、氟化物和粉尘; j 为林分类型; FP_i 为森林吸收 i 类污染物的质量(kg/a); A_j , B_j , C_j 分别为 j 类植物群落类型的面积(hm²)、单位面积生物量[t/(hm²·a)]和生态服务单价的修正系数; P_i 为未考虑生物量时单位面积森林吸收 i 类污染物的质量[kg/(hm²·a)],根据赵金龙^[9]的研究成果,松类吸收二氧化硫、氮氧化物、氟化物和粉尘的能力分别为108.77,9.26,9.11,31 880.69 kg/(hm²·a);桉类吸收二氧化硫、氮氧化物、氟化物和粉尘的能力分别为88.91,11.20,12.42,45 246.18 kg/(hm²·a); n 表示植物群落数目; U 为林分的大气净化价值(元/a); K_i 为治理费用(元/kg)。按照当地物价水平,二氧化硫、氮氧化物、氟化氢、粉尘的治理费用分

别为0.12,0.069,0.063,0.015元/kg。

(6) 生物多样性保护。条件价值评估法在非市场价值评估技术中占有重要地位^[48],本研究基于InVEST模型的生境质量指数模型,参照Costanza等^[29]对森林生物多样性保护价值的研究成果估算生物多样性保护价值^[49],计算方法为:

$$Q_{xj} = H_j \times \left(1 - \frac{D_{xj}}{D_{xj} + K}\right)$$

式中: Q_{xj} 为地类 j 中栅格 x 的生境质量; H_j 为地类 j 的生境适合性,数值介于0~1,其中,0~0.25为次要生态廊道,0.25~0.5为主要生态廊道,0.5~0.75为次要生态适宜区,0.75~1为主要生态适宜区; K 为半饱和常数,是栅格单元尺度大小的一半; D_{xj} 为地类 j 栅格 x 的生境胁迫水平,其计算方法为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) \times r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr}$$

$$i_{rxy} = 1 - \frac{d_{xj}}{d_{rmax}}$$

式中: R 为威胁因子数量,研究区内仅含道路,取1; w_r 为威胁因子权重,取0.5; Y_r 为威胁因子的栅格数量; r_y 为每个栅格上的威胁因子个数,取1; β_x 保护法律到达度; S_{jr} 为敏感度强弱,马尾松(森林)对道路的敏感度为0.9,桉树(人工林)取0.8^[47]; i_{rxy} 为威胁因子的影响程度; d_{xy} 为地类 x 与地类 y 的空间距离; d_{rmax} 为威胁因子 r 的最大影响距离,取10 km。

(7) 生态系统服务价值。

$$V_t = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^6 V_{ij}$$

式中: V_{ij} 为第 j 类森林类型的第 i 种服务功能价值。

3 结果与分析

3.1 植物群落时空动态分布格局

现场调查结果表明,研究区域主要包括桉树群落、马尾松群落(记为P)、水体、建设用地等土地覆被类型。桉树长势迅速,年际植被参量差异明显,为了表征桉树的生态系统服务,已按树龄对桉树群落进行细分。数据显示,我国、巴西等国桉树人工林的轮伐周期为4~7 a^[50],结合研究区域的实际情况,本研究将桉树人工林划分为3个龄级,即幼龄林(树龄≤幼年,记为E—I)、中龄林(2 a<树龄≤龄年,记为E—II)和成熟林(树龄>4 a,记为E—III)。

根据上述分类标准,元宵水库2005—2015年土地覆被信息遥感解译结果表明(图1),研究区域桉树人工林面积逐年增加,由2005年的317.34 hm²增至2015年的729.18 hm²,2015年时,水库集水区马尾

松面积仅为 15.58 hm²,约为 2005 年的 3.64%。如图 2 所示,2008 年与 2011 年,水库集水区西北部、南方大部及北方大部区域的马尾松先后被幼龄桉树取代,桉树面积分别增加了 122.13,149.57 hm²。

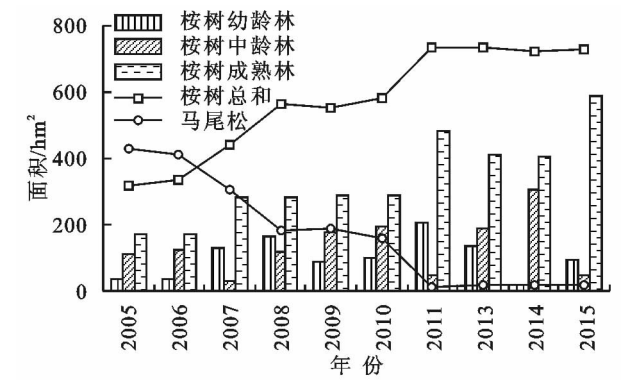


图 1 植物群落面积动态

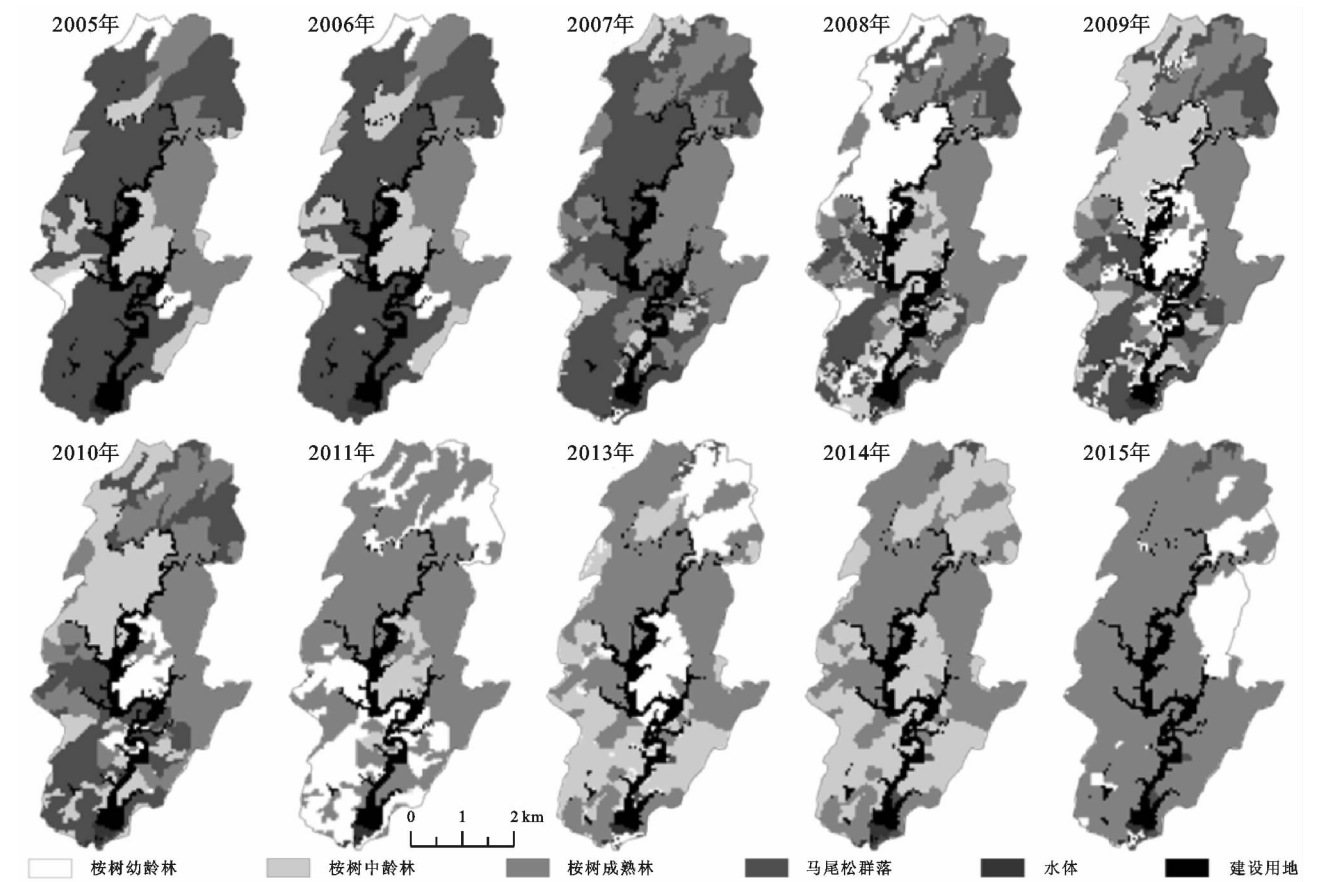


图 2 2005—2015 年土地覆被类型信息动态

表 2 生物量反演公式		
群落类型	FVC—生物量/(t·hm ⁻²)	R ²
E—I	$y=203.02FVC^2+100.88FVC+3.73$	0.82
E—II	$y=20.25FVC^2+192.46FVC+6.03$	0.88
E—III	$y=91.68FVC^2+62.88FVC+86.97$	0.91
P	$y=322.32FVC^2-147.71FVC+114.94$	0.93

NPP 反演结果表明,2005—2015 年 E—I,E—II,E—III 和 P 的 NPP 均值分别为 87.86 万,186.65 万,209.73 万,143.65 万 g/(hm²·a)。

3.2 FVC 反演结果

FVC 反演结果表明,E—I,E—II,E—III 和 P 的 FVC 均值分别为 24.39%,45.06%,73.14%,76.06%。

3.3 生物量反演

基于生物量与 FVC 分析结果构建 FVC—生物量拟合曲线(表 2)。拟合结果表明,在线性、二次多项式、指数、对数等回归分析类型中,以 FVC 为自变量的二次多项式与生物量的拟合效果最好^[51]。

生物量反演结果表明,2005—2015 年研究区域 E—I,E—II,E—III 和 P 的平均生物量分别为 30.8,166.0,708.2,432.0 t/(hm²·a)。

3.4 NPP 反演

以 FVC 为自变量的二次多项式与 NPP 具有更好的拟合效果(表 3)。

表 3 NPP 反演公式		
群落类型	FVC—NPP/(10 ⁴ g·hm ⁻² ·a ⁻¹)	R ²
E—I	$y=953.57FVC^2+147.61FVC+22.64$	0.89
E—II	$y=163.38FVC^2+174.29FVC+57.17$	0.91
E—III	$y=-499.87FVC^2+861.87FVC-75.52$	0.92
P	$y=-487.99FVC^2+762.99FVC-117.66$	0.95

3.5 生态系统服务价值动态

3.5.1 总价值 水库集水区的服务价值计算结果表

明,总体而言(图 3A),水库集水区的服务价值呈现逐年下降的趋势,由 2005 年的 6 578 万元降至 2013 年的 2 204 万元,随后稍有增加。10 年间,研究区域的气象条件变化不大,推测,2005—2013 年总服务价值下降主要归因于马尾松面积的减少;2013 年后总价值稍有增加,可能与本阶段桉树轮伐活动少、桉树树龄逐年增加有关。

3.5.2 不同植物群落的生态系统服务价值 比较不同植物群落可知,P 的服务价值贡献率优于各个龄级的 E(桉树群落),为集水区植物群落总价值的 54.15%;E 的贡献率随龄级增长而增加^[52],E—Ⅰ,E—Ⅱ和 E—Ⅲ分别为 0.87%,6.94%和 38.03%。进而比较植物群落单位服务价值,多项研究表明,不同树种的生态系统服务存在明显差异^[52],本研究也得到类似结果(图 3B)。P 的单位生态系统服务总价值为 E 的 3.25 倍,其中,P 的单位生物多样性保护、涵养水源、保育土壤等服务价值明显优于 E,分别为 E 的 10.42 倍、8.72 倍与 7.73 倍;此外,针对产品提供价值(图 3C),2005—2015 年,伴随桉树种植面积的增加,桉树的产品提供价值呈现波动上升的趋势,总价值为 9 040.76 万元,种植成本为 3 026.66 万元,利润约为 6 014.10 万元。

由此可知,2005—2013 年水库集水区总服务价值的下降,主要取决于马尾松面积的下降与桉树幼龄林的种植。这一变化造成区域植被群落结构与功能发生明显变化。因此,以生物资源开发利用为主的生态系统,例如农田、牧场、水产养殖区等,在强化产品提供功能的同时,不可避免地存在生物多样性锐减、水土流失等生态问题^[53-54]。

3.5.3 不同类型的生态系统服务价值 就各项生态系统服务而言(图 3I),其价值贡献率由大到小依次为涵养水源 38.86%、净化空气 18.12%、产品提供 16.81%、固碳释氧 11.15%、生物多样性保护 7.59%与保育土壤 7.47%。如图 3D—3H 所示,除去产品提供价值外,其他生态系统服务基本呈现局部波动、总体下降的趋势。2013 年后,集水区内的各项服务价值稳中有升,但是这一现象无法说明研究区域的生态质量得到改善。此时,桉树成熟林已经取代马尾松群落成为影响区域服务价值的关键,一旦开始桉树轮伐,集水区的服务价值必将显著下降。各个植物群落的多年平均服务价值见表 4。

4 讨论

4.1 遥感解译与反演

所有的遥感解译方法,均存在不同程度的错译现

象。这种现象只能减少,却无法完全避免,仅能通过人工修正减少错译区域。因此,在条件允许的情况下,人机交互目视解译法值得推荐。

表 4 植物群落多年平均生态系统服务价值汇总

元/(hm ² ·a)				
项目	E—Ⅰ	E—Ⅱ	E—Ⅲ	P
固碳释氧	1522.96	4235.39	5635.46	3490.03
涵养水源	1018.35	1545.88	1608.03	12128.45
保育土壤	826.17	1541.94	1836.79	10833.21
净化大气环境	1383.78	3909.61	5207.79	3456.01
生物多样性保护	305.60	747.20	1573.72	9120.96

注:计算结果已将修正系数考虑在内。

理论上,空间分辨率直接影响反演精度。首先,在解译过程中,一个包含多种地物类型的像元会被识别为面积占比最大的一种地物类型,造成地物信息损失;其次,在反演过程中,该像元的 NDVI 实际上是多种地物的综合值,造成数值失真。但是在本研究中,中分遥感影像比高分遥感影像更具优势^[55]。Landsat 系列卫星影像存档数据全、时间连续性好、波段设置相对固定^[56],有利于开展长时间尺度的连续监测。本研究利用 Landsat 系列卫星开展生物量、NPP 遥感反演,旨在开展水库集水区内桉树轮伐区的植物群落动态监测。而高分遥感影像时间分辨率较低、空间分辨率多变、传感器设置不一、价格昂贵。因此,本研究将高分影像作为辅助数据,使用中分遥感影像开展生物量及其他植被参量的反演研究。

随着航空航天技术的不断发展,高分影像的时间分辨率将逐步提高,空间分辨率将进一步提高。届时,将可以实现更小范围、更长时间尺度、更高解译及反演精度的遥感动态监测。

4.2 遥感指数的选择与处理

NDVI 是常用的遥感指数,可有效消除光照条件差异对影像 DN 的影响。但是,尽管 NDVI 已经经过归一化处理,可在一定程度上消除地表光照条件、卫星传感器及成像时间等方面的差异,但由于物候条件的差异,不同季相影像所获得的 NDVI 仍有差异。FVC 与 NDVI 密切相关,经过拉伸处理,有效弥补了 NDVI 在高植被区敏感度较低与低植被区估值偏高这一不足。因此,本研究基于 FVC 反演生物量与 NPP,类似处理方法在杨胜天^[57]、张喜旺^[58]、贾坤^[59]等的研究中均有应用,同样达到了良好的效果。

4.3 管理方式对植物群落的影响

人类活动主要通过改变生态系统的结构与过程来影响生态系统服务^[26]。粗放、片面的管理方式直

接影响桉树人工林种植区的生态质量与流域生态安全^[60]。Wuwer等^[61]认为,在所有的人类活动中,收获薪柴、农业活动对生物多样性的损害最大;对我国

洪湖湿地^[62]和岷江大沟流域^[63]的研究同样表明,生态系统的结构完整性与人类活动强度呈负相关性,人为干扰导致植物群落退化。

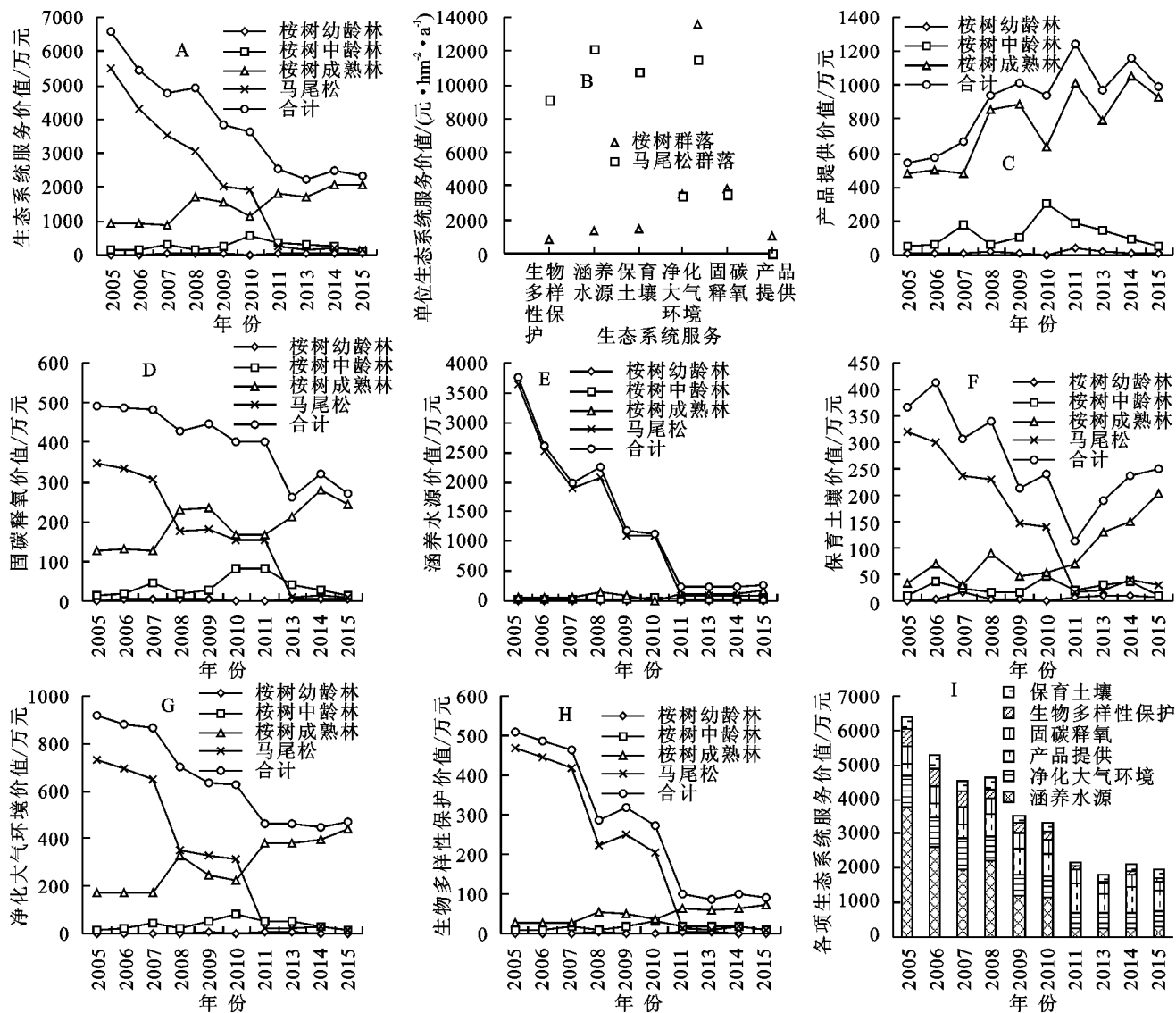


图3 水库集水区服务价值

天然林生态系统结构稳定,生态效益十分可观,与天然林相比,人工林的生态效益明显下降^[64]。对于桉树群落而言,因管理不当造成的异发演替,直接影响其生态系统的能量循环、物质循环和信息循环。在人为活动的干预下,水库集水区各植物群落的面积剧烈变动,致使FVC、生物量、NPP等植被参量变化明显,森林生态系统稳定性受到极大影响^[65]。值得指出的是,研究区域的马尾松同样属于人工林,种植时间约为20世纪70年代。由于人为扰动小,马尾松群落结构日趋完整,系统稳定性长期处于较高水平。不妨假设,若停止集水区内的桉树砍伐,将其作为生态林培育,将对维护与提高区域生态质量产生重大影响。

5 结论

(1) NDVI与FVC适用于开展植物群落生物量、NPP等植被参量的遥感反演;

(2) 桉树人工林的FVC均值与生物量均值明显小于马尾松群落,NPP均值大于马尾松群落;马尾松群落的单位面积生态系统服务价值优于桉树人工林,特别是在生物多样性保护、涵养水源、保育土壤3个方面;

(3) 桉树群落的生态系统服务随树龄的增加而提高,桉树成熟林的服务价值接近马尾松群落,说明桉树本身不会引发水分、养分过量消耗等问题;

在马尾松砍伐期与桉树轮伐期,水库集水区的生

态系统结构波动剧烈,生态系统服务下降。因此,经济利益导向下的剧烈人为扰动成为桉树人工林种植区生态质量显著下降的主要原因。

参考文献:

- [1] 韦毅刚. 广西植物区系的基本特征[J]. 云南植物研究, 2008,30(3):295-307.
- [2] 林秋奇,韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报,2001,21(6):1034-1040.
- [3] 徐礼华,刘素梅. 水库及其环境影响[J]. 工程力学, 2007,24(S2):33-44,74.
- [4] 霍钦超,吴志伟. 广西水库管理信息系统[J]. 广西水利水电,2005(2):47-50.
- [5] 郑江坤,余新晓,贾国栋,等. 密云水库集水区基于LUCC的生态系统服务价值动态演变[J]. 农业工程学报,2010,26(9):315-320.
- [6] 黄国勤,赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J]. 生态学报,2014,34(18):5142-5152.
- [7] Liu Tao, Zhang Huaxing. Summarization on evaluation of ecological value of artificial forest[J]. Chinese Forestry Science and Technology, 2005,4(2):8-14.
- [8] 徐大平,何其轩,杨曾奖,等. 巨尾桉人工林地上部分净生产力及养分循环的研究[J]. 林业科学研究,1997,10(4):365-372.
- [9] 赵金龙. 广西桉树人工林的生态服务功能研究[D]. 南宁:广西大学,2011.
- [10] 黄国勤,赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J]. 生态学报,2014,34(18):5142-5152.
- [11] Rudolf de Groot, Alkemade R, Braat L, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making[J]. Ecological Complexity, 2010,7(3):260-272.
- [12] Goetz S, Dubayah R. Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change[J]. Carbon Management, 2011,2(3):231-244.
- [13] Nord L T, Schumacher J. Estimation of forest resources from a country wide laser scanning survey and national forest inventory data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,119(3):148-157.
- [14] Vanderlinder M S, Neale C M U, Rosenberg D E, et al. Use of remote sensing to assess changes in wetland plant communities over an 18-year period: a case study from the Bear River Migratory Bird Refuge, Great Salt Lake, Utah[J]. Western North American Naturalist, 2014,74(1):33-46.
- [15] 忠锋,王一谋,冯毓荪,等. 基于RS与GIS的榆林地区土地利用变化分析[J]. 水土保持学报,2003,17(2):97-99.
- [16] 张慧芳. 北京地区森林植被生物量遥感反演及时空动态格局分析[D]. 北京:北京林业大学,2008.
- [17] 郑元润,周广胜. 基于NDVI的中国天然森林植被净第一性生产力模型[J]. 植物生态学报,2000,24(1):9-12.
- [18] Garreta V, Miller P A, Guiot J, et al. A method for climate and vegetation reconstruction through the inversion of a dynamic vegetation model[J]. Climate Dynamics, 2010,35(2/3):371-389.
- [19] Liang Liang, Yang Minhua, Zhang Lianpeng, et al. Wheat leaf area index inversion using hyperspectral remote sensing technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011,31(6):1658-1662.
- [20] Yang Guijun, Zhao Chunjiang, Liu Qiang, et al. Inversion of a radiative transfer model for estimating forest LAI from multisource and multiangular optical remote sensing data [J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011,49(3):988-1000.
- [21] 周兆叶,储少林,王志伟,等. 基于NDVI的植被覆盖度的变化分析:以甘肃省张掖市甘州区为例[J]. 草业科学,2008,25(12):23-29.
- [22] 林力. 马尾松人工林生物量模型的研究[D]. 福州:福建农林大学,2011.
- [23] 蔡会德,农胜奇,张伟,等. 广西主要树种立木生物量模型的研建[J]. 林业资源管理,2014(4):58-61,66.
- [24] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学,2007,31(3):413-424.
- [25] 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.
- [26] Seppelt R, Dormann C F, Eppink F V, et al. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead[J]. Journal of Applied Ecology, 2011,48(3):630-636.
- [27] Power A G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences, 2010,365(1554):2959-2971.
- [28] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(1):3-5.
- [29] 谢高地,张钰锂,鲁春霞,等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [30] 肖强,肖洋,欧阳志云,等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报,2014,34(1):216-223.
- [31] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J]. 生态学报,

- 2013, 33(3):726-736.
- [32] 蒋焱, 刘晓蔚, 侯远瑞, 等. 18 种桉树人工林复合经营模式的投入及产出评价研究[J]. 西部林业科学, 2012, 41(1):24-33.
- [33] 马长欣, 刘建军, 康博文, 等. 1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2010, 30(6):1412-1422.
- [34] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. 林业科学, 2012, 48(10):1-5.
- [35] Zhou Guoyi, Yin Guangcai, Morris J, et al. Measured sap and estimated evapotranspiration of tropical *Eucalyptus urophylla* plantations in south China[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(2):202-210.
- [36] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4):480-491.
- [37] 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5):75-79.
- [38] 李玉泉. USLE 和 GIS 在湖北省土壤侵蚀预报中的应用和研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [39] 郑国东. 南宁表层土壤养分的空间分布特征研究[J]. 南方国土资源, 2012, 32(3):28-30, 34.
- [40] 王月容, 卢琦, 周金星, 等. 贵州省岩溶石漠化地区生态服务价值损失评估[J]. 中国岩溶, 2013, 32(1):88-94.
- [41] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):19-24.
- [42] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31(21):6353-6362.
- [43] 梁音, 史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2):48-53.
- [44] 杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣, 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2):203-206, 211.
- [45] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8):1033-1036.
- [46] 高峰, 华瑾, 卢远, 等. 基于 GIS 和 USLE 的钦江流域土壤侵蚀评估[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1):18-22, 28.
- [47] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5):1-20.
- [48] 陈琳, 欧阳志云, 王效科, 等. 条件价值评估法在非市场价值评估中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(2):610-619.
- [49] 肖明. GIS 在流域生态环境质量评价中的应用: 以昌化江下游为例[D]. 海口: 海南大学, 2011.
- [50] 杨钙仁. 桉树人工林对林区地表水的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [51] 刘茜, 杨乐, 柳钦火, 等. 森林地上生物量遥感反演方法综述[J]. 遥感学报, 2015, 19(1):62-74.
- [52] Begum A, Harikrishna S. Evaluation of some tree species to absorb air pollutants in three industrial locations of South Bengaluru, India[J]. E-Journal of Chemistry, 2010, 7(S1):113-116.
- [53] 韩艺师, 魏彦昌, 欧阳志云, 等. 连栽措施对桉树人工林结构及持水性能的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(9):4609-4617.
- [54] 温远光. 桉树生态, 社会问题与科学发展[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [55] Bao Yansong, Gao Wei, Gao Zhiqiang. Estimation of winter wheat biomass based on remote sensing data at various spatial and spectral resolution[J]. Frontiers of Earth in China, 2009, 3(1):118-128.
- [56] Goetz S J, Prince S D. Remote sensing of net primary production in boreal stands[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1996, 78(S3/4):149-179.
- [57] 杨胜天, 李茜, 刘昌明, 等. 应用“北京一号”遥感数据计算官厅水库库滨带植被覆盖度[J]. 地理研究, 2006, 25(4):570-578, 753.
- [58] 张喜旺, 吴炳方. 基于中高分辨率遥感的植被覆盖度时相变换方法[J]. 生态学报, 2015, 35(4):1155-1164.
- [59] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7):774-782.
- [60] 谢耀坚. 中国桉树人工林可持续经营战略初探[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5):59-64.
- [61] Wuver A M, Attuquayefio D K. The impact of human activities on biodiversity conservation in a coastal wetland in Ghana[J]. West African Journal of Applied Ecology, 2009, 9(1):1-14.
- [62] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 人类活动效应对物种多样性影响的动力模拟: 以洪湖湿地生境毁坏对水鸟物种多样性的影响为例[J]. 生态学报, 2006, 26(2):432-438.
- [63] 包维楷, 陈庆恒, 刘照光. 退化植物群落结构汲取物种组成在人为干扰梯度上的响应[J]. 云南植物研究, 2000, 22(3):307-316.
- [64] 温远光. 连栽桉树人工林植物多样性与生态系统功能关系的长期实验研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [65] 潘辉, 黄石德, 张金文, 等. 试论福建省桉树人工林的生态问题及其对策[J]. 中国农业学报, 2009, 17(3):605-609.