

元谋干热河谷林地生态系统服务价值变化

欧朝蓉^{1,2}, 朱清科¹, 孙永玉^{3*}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 西南林业大学生态旅游学院, 云南 昆明 650024;
3. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650216)

摘要: [目的] 以元谋县为研究区, 基于生态学、RS 和 GIS 理论和方法, 研究干热河谷林地利用及生态系统服务价值的变化特征, 以期丰富干热河谷林地生态研究, 为区域生态环境调控提供理论依据。 [方法] 以 2008 年 Landsat 7 ETM 及 2016 年 Landsat 8 OLI 2 期遥感影像、国家基础地理信息系统及 ASTER GDEM 数字高程模型为数据源, 利用 ENVI 和 ArcGIS 软件对 2 期遥感影像进行解译, 获取林地土地利用数据, 分析林地的时空特征; 调整林地生态系统服务当量因子系数, 计算单位面积农田食物生产功能价值及单位面积林地生态系统服务价值系数, 分析林地生态系统静态价值特征及其变化; 以支付能力指数、支付意愿指数和环境能力指数为参数构建林地生态系统服务动态价值调整系数, 分析林地生态系统服务动态价值特征及其变化。 [结果] 林地主要分布在研究区南部和东部的中高山, 在西部、西南部和北部及东部边缘的中高山有少许分布, 在河谷坝区有零星分布; 2008—2016 年林地面积增长了 64.24 hm², 变化幅度达到 11.42%; 有 90.53 km² 的林地转为非林地, 有 154.77 km² 非林地转为林地。林地向草地转移了 73.61 km², 草地向林地转移 123.11 km²; 2016 年研究区林地生态系统服务静态价值为 14.97 亿元, 较 2008 年的 13.44 亿元提高了 1.53 亿元。2016 年林地在研究区生态系统总静态价值的比例为 56.41%, 较 2008 年的 51.73% 提高了 4.68%; 2008 年和 2016 年林地生态系统服务动态价值分别为 4.758 亿元和 9.027 亿元, 仅为同期林地生态系统服务静态价值的 35.40% 和 60.30%。 [结论] 研究区林地面积迅速增长, 林地与非林地相互转换频繁, 林地净增长明显; 林地面积的增长提升了生态系统服务的静态价值。林地的单项生态系统服务价值中, 土壤形成与保护、气体调节和生物多样性保护的价值最大, 食物生产的价值最小; 林地生态系统服务动态价值虽然远低于静态价值, 但其变化幅度明显高于静态价值。高生态系统服务价值的林地对社会和环境调节能力的增长更为敏感。

关键词: 干热河谷; 林地; 生态系统服务价值; 当量因子; 静态价值; 动态价值

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)05-0831-10

Forest Ecosystem Service Value Change in Yuanmou Dry-hot Valley

OU Zhao-rong^{1,2}, ZHU Qing-ke¹, SUN Yong-yu³

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Research Institute of Resources Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650216, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] Yuanmou county was selected to studied the change of forest land utilization and forest ecosystem service value in the dry-hot valley so as to enrich forest ecology research and provide theoretical basis for regional ecological environment regulation. [Method] Taking remote images of Landsat 7 ETM in 2008 and Landsat 8 OLI in 2016, national basic geographic information system and ASTER GDEM digital elevation model as data sources, the ENVI and ArcGIS software was used to interpret the remote sensing images, obtain the forest land-use

收稿日期: 2017-05-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0505102); 中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAF-YBB2017ZA002-4)

作者简介: 欧朝蓉(1978—), 女, 湖南衡阳人, 博士研究生, 讲师。主要研究方向: 生态环境地理学。E-mail: flymoon97@163.com

* 通讯作者: 孙永玉(1974—), 男, 山东济宁人, 博士, 副研究员。主要研究方向为干热河谷恢复生态学。E-mail: cafsdrn@163.com

data, and to analyze the temporal and spatial characteristics of forest land, and calculate the function value of farmland food production per unit area and coefficients per unit area of forest ecosystem service value. Then, the forest ecosystem service value and its changing characteristics were analyzed. The adjustment of coefficient of dynamic value of forest ecosystem service was constructed on the basis of payment ability, willingness to pay and land by using ENVI and ArcGIS software. Forest ecosystem equivalent coefficients were adjusted, as well as environmental capacity as main parameters in order to analyze the dynamic value characteristic and its change of forest ecosystem service. [Result] Forest land is mainly distributed in southern and eastern parts of the middle-high mountains in the study area. A small amount of forest scatters in western, southwest, north and eastern foothills of the middle-high mountains. Few parts are sporadic in the valley dam area. Forest area increased by 64.24 hm², and variation range reached 11.42% from 2008 to 2016. The area of forest land converted into non-forestland reached 90.53 km², while the forest area converted from other land-use types was 154.77 km². There were 73.61 km² of forest land converting to grassland and 123.11 km² converted from grassland. In 2016, the static value of forest ecosystem service in the study area was ¥1.497 billion, an increase of ¥153 million over ¥1.344 billion in 2008. In 2016, the proportion of forest land in the total static value of regional ecosystem service in the study area was 56.41%, which increased by 4.68% compared with 51.73% in 2008. The dynamic value of forest ecosystem service in 2008 and 2016 were respectively ¥475.8 million and ¥902.7 million, which only accounted for 35.40% and 60.30% of static value of forest ecosystem service in the same period. [Conclusion] The forest land area increased rapidly, the forest land and non-forest land converted to each other frequently, leading to an obvious net increase of forest area. The area increase of forest land resulted in static value growth of forest ecosystem service. Among individual value of forest ecosystem service, soil formation and protection, gas regulation and biodiversity conservation scored the highest, while the food production had the lowest score. Although the dynamic value of forest ecosystem service is far less than the static value, the range of dynamic value change is obviously higher than that of static value. The forest land with high ecosystem service value is more sensitive to the growth of social and environmental regulation.

Keywords: dry-hot valley; forest land; ecosystem service value; equivalent factor; static value; dynamic value

生态系统服务价值是生态系统服务功能的货币化形式。区域生态系统服务价值越高在一定程度上表明区域生态服务功能越好,人们的生态意识越强,越有利于区域生态安全。20世纪90年代以来,随着人类对生态系统功能认识的加强,生态系统服务价值研究受到广泛关注,最具代表性的是 Costanza 等^[1]提出的“生态系统服务价值与自然资本”理论,然而其研究中的“全球静态部分平衡模型”是基于全球生态系统服务价值均值化的处理,在地域性生态系统服务价值评估中会产生较大误差。谢高地等^[2]在 Costanza 等^[1]研究基础上结合中国的自然特征制定了青藏高原单位面积生态系统服务价值当量因子,成为国内生态系统服务价值研究的理论基础和主要方法参考。近30年来,国内外学者从景观尺度、单一生态系统、物种和生物多样性等方面开展了生态系统服务价值多角度研究^[3-8],不仅夯实了生态系统功能及价值评估的理论基础,同时也较有力的推动了该领域研究方法的创新^[9-15]。森林是陆

地生态系统的重要组成部分,在维护区域生态平衡中具有关键作用。国外研究侧重于林地的单一生态服务功能的测评及森林生态系统服务与局地生态环境的关系分析等方面^[16-20],国内研究则侧重于从土地利用角度评估区域生态系统服务价值,王丽等^[21]从涵养水源价值、土壤保持价值、固定 CO₂ 价值、净化空气价值、社会与文化价值5个方面评估了青城生态系统服务价值,郑江坤等^[22]利用马尔科夫链模型评估了潮白河流域森林生态服务价值的动态变化,马国军等^[23]和汪有奎等^[24]对干旱和半干旱区的森林生态系统服务价值进行了评价。

干热河谷是中国西南地区一种局地特殊的地理景观和气候类型,气候炎热、干燥,水分蒸发极为失衡,土壤侵蚀和水土流失严重,植被类型为“河谷型萨瓦纳植被”,特殊的自然生态环境使干热河谷成为西南地区典型的生态脆弱区。林地是干热河谷山地生态系统的重要组成部分,具有水源涵养和气候调节等多种功能,是维护干热河谷区生态系统功能

的主要地类,林地的数量及时空分布对干热河谷区域生态安全的影响显著。现有的干热河谷林地研究侧重于林木育苗^[25-26]、种群结构^[27]和植被恢复^[28-29]等方面,这些研究虽从单一角度部分探讨了林地的生态功能,但是无法有效系统量化林地生态系统服务价值。尽管有学者曾研究了林地生态系统服务静态价值^[30],但没能深入评估林地生态系统动态价值的变化,不能揭示社会、经济和环境因素对干热河谷林地生态系统服务价值的影响。鉴于此,本文以具有干热河谷典型环境特征的元谋县为案例,研究干热河谷林地的时空格局及生态系统服务静态价值和动态价值的变化特征,辨明影响林地生态系统服务价值变化的主要因素,以期为干热河谷林地可持续发展及区域生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

研究区(本研究指元谋县全境)地处滇中高原北部金沙江下游龙川江河谷盆地内,介于 $101^{\circ}35' \sim 102^{\circ}06' E$, $25^{\circ}23' \sim 26^{\circ}06' N$ 之间,全县国土面积 $2\,021.69\text{ km}^2$ 。除元谋盆地底部为河谷冲积平原外,其余均为山地丘陵地形(图1)。气候干热,光热资源丰富,年平均气温 $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。降水少,年均降水量仅为 624 mm ,年蒸发量高达 $3\,507\text{ mm}$,降水蒸发比失衡。全年干湿季分明,90%降水量集中在6—10月(雨季)^[31]。地貌垂直分异显著,从河谷到山顶可分为4个垂直自然带:海拔 $900 \sim 1\,100\text{ m}$ 为河谷坝区, $1\,100 \sim 1\,350\text{ m}$ 为坝周低山区, $1\,350 \sim 1\,600\text{ m}$ 为中低山区, $1\,600 \sim 2\,835\text{ m}$ 为中高山^[32]。区内海拔 $1\,600\text{ m}$ 以下植被以稀树灌草丛为主, $1\,600\text{ m}$ 以上多为灌丛草地,也有片状森林分布^[33]。

2 研究方法

2.1 数据源及数据预处理

本研究的数据源为:(1)遥感数据,选取2008年Landsat7 ETM及2016年Landsat8 OLI卫星遥感影像,过境日期分别为2008年1月28日和2016年1月4日,分辨率为 30 m 。两景遥感影像时段均处于研究区旱季。数据由中国科学院地理空间数据云平台提供。(2)地理信息系统数据,选取研究区 $1:100\,000$ 的国家地理基础信息系统数据,包括水系、道路和居民点等基本信息。数据由国家基础地理信息中心提供。(3)DEM数据,选取ASTER

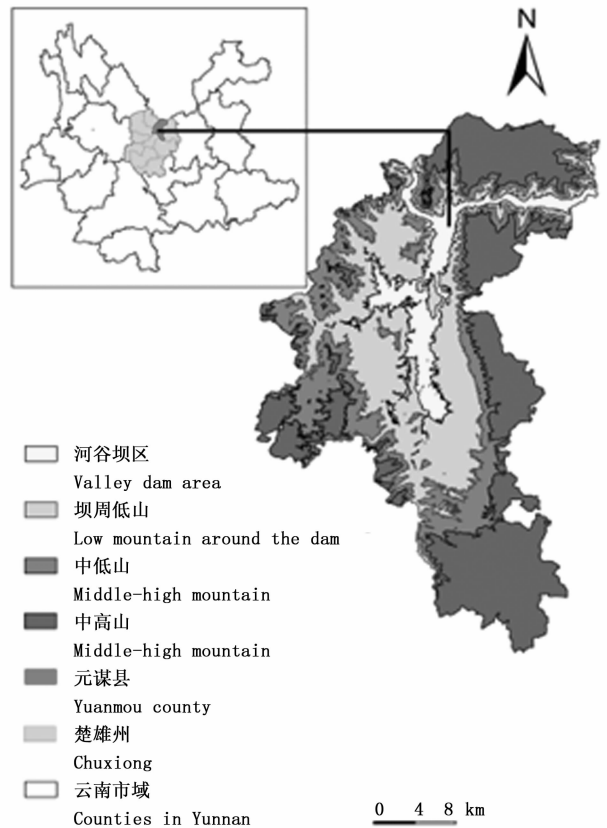


图1 研究区区位示意及地形图

Fig.1 Sketch map of geographical location and topography of the study area

GDEM V2产品,分辨率为 30 m 。研究区共涉及到4个图幅(ASTGTM2 _ N26E 101、ASTGTM2 _ N26E 102、ASTGTM2 _ N25E 101、ASTGTM2 _ N25E102)。数据由中国科学院地理空间数据云平台提供。

在ArcGIS中利用Mosaic工具对4个图幅的DEM进行拼接,拼接图幅包含了研究区区域范围。利用水系和高程点为控制点完成拼接的DEM图幅与 $1:100\,000$ 基础地理信息系统数据的空间配准,以研究区范围的矢量数据裁剪拼接的DEM图幅获得研究区范围DEM,利用ArcGIS栅格计算功能提取研究区4个垂直自然带的空间范围,利用ENVI软件完成两景遥感影像的去云、去条带、标准假彩色合成及几何精校正等图像处理工作。完成2个时段遥感影像与 $1:100\,000$ 地形图的空间配准,并以研究区矢量边界为掩膜对裁切遥感影像获得了研究区范围内的遥感影像。

2.2 土地利用分类体系

根据《国家森林资源连续清查技术规定》地类划分标准和研究区遥感影像特征,结合前人研究成

果^[30-33]和实际研究需要,将研究区分为林地和非林地2个大类别,非林地包括草地、耕地、建设用地、未利用地和水域5种一级土地利用类型。

2.3 土地利用数据的提取

综合运用非监督分类、监督分类及目视解译等方法进行遥感图像解译。以土地利用类型历史图件与GPS野外采点调研验证了土地利用类型的解译精度。2期遥感图像的解译精度均在88%以上,符

合解译精度要求(表1)。在ENVI软件中以像元二分法提取研究区2008年和2016年的植被覆盖度。利用ArcGIS软件提取主要土地利用类型的基本统计数据,计算林地土地利用指数和土地状态指数^[34],利用Dissolve和Intersect工具对2008年和2016年2个时段土地利用类型进行叠置分析,得到研究区土地利用转移矩阵。

表1 土地利用类型解译精度

Table 1 Interpretation accuracy of land use types

年份 Year	林地 Forest land	草地 Grassland	耕地 Arable land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	水域 Water land	综合精度 Synthetic accuracy
2008	86.1	86.4	90.6	86.3	88.4	93.2	88.5
2016	88.9	86.9	91.4	85.7	87.2	94.5	89.1
均值 Mean							88.8

2.4 林地生态系统服务静态价值系数调整

2.4.1 林地生态系统服务当量因子系数调整 谢高地等^[2]的研究以一级土地利用类型为研究基础,将不同的林地类型归为一种,不能有效揭示植被种类之间的差异性导致的生态系统服务价值的差别。李晓赛等^[35]在方精云等^[36]对植被生物量差异性研究的基础上,基于材积源生物量法提出了有林地、灌木林和其它林地的生态系统服务当量因子系数的调整方案,取3种林地的功能性调整系数平均值为林地生态系统服务静态价值当量因子调整系数,即1.032(表2)。研究区的林地主要类型为有林地、灌木林和其它林地。为了更好地反映干热河谷不同林地的生态系统服务价值的差异性,本研究采用李晓赛等^[35]的研究方法设定研究区林地生态系统服务当量因子的调整系数为1.032。

表2 林地生态系统服务当量因子系数调整

Table 2 Coefficients adjustment of equivalent factors of forest ecosystem service

土地利用类型 Land use type	二级分类 Second level classification	调整系数 Adjustment coefficient
林地 Forest land	有林地 Woodland	1.320 0
	灌木林 Shrub land	1.055 0
	其它林地 Other woodland	0.722 2
均值 Mean		1.032 0

注:本表来源于李晓赛等^[35]和方精云^[36]等的研究成果。

2.4.2 单位面积食物生产功能价值当量因子 单位面积食物生产功能价值当量因子是指1 hm²农田每年自然粮食的平均产量的产值,林地生态系统服务价值当量因子则以林地生态系统产生该生态服务相对于农田食物生产服务贡献的大小:

$$Ea = 1/7 \times T_i/M_i \quad (1)$$

式中: Ea 为单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值(元·hm⁻²); T_i 是研究区每年粮食作物的经济产值(元·a⁻¹); M_i 是研究区粮食作物的总面积。1/7是指在没有人工干预的自然生态系统提供的经济价值与现有单位面积农田提供的食物生产服务经济价值的比值。以2008年和2016年研究区农田粮食作物(水稻、玉米和杂粮)的价格为生态系统服务价值系数计算的基本依据,依据统计资料计算得到2个年份的单价分别为979.36、1 142.55元·hm⁻²,取二者的平均值1 060.96元·hm⁻²作为单位面积农田食物生产功能价值。结合调整后的林地生态系统服务当量因子,通过公式(1)计算研究区林地及其它地类单位面积生态系统服务价值。

2.5 林地生态系统动态服务价值系数调整

经济学研究表明,对物品的支付水平与区域内某时段人们的支付能力和基于物品的需求程度的支付意愿有关^[35],同时由于研究区所提供生态资源并非一成不变,而是受生态环境变化的影响,因此,本研究将支付能力、支付意愿^[37]和环境能力等指标纳入生态系统服务动态价值评估体系,对动态价值进行系数调整,获得研究区生态系统服务动态价值系数。

2.5.1 支付能力指数(P_i) 支付能力是个人经济能力的直接表现。个人支付能力越强,越有可能承受对生态系统服务功能的支付。本研究将研究区人均国内生产总值与当年中国人均国内生产总值的比

值作为支付能力指数,其计算公式如下:

$$P_i = GDP_i / GDP_{i\text{mean}} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (2)$$

式中: GDP_i 表示第*i*年元谋县人均国内生产总值; $GDP_{i\text{mean}}$ 表示第*i*年中国人均国内生产总值。利用统计数据通过公式(2)计算研究区2008年和2016年生态系统服务价值支付能力指数。

2.5.2 支付意愿指数(N_i) 人们对生态系统价值的认识和需求通常与社会发展阶段相关^[35]。社会发展阶段越高,人们的生态环境意识及对生态服务功能的需求越多(直至饱和状态),支付意愿也越强。因此,本研究对支付意愿指数(N_i)进行调整以反映社会发展阶段对生态系统服务价值的动态影响。支付意愿通常用Logistics生长曲线模型来刻画,其表达式为:

$$N_i = \frac{2}{1 + ae^{-bt}} \quad (3)$$

式中: N_i 为代表生长特性的参数,在此表示第*i*年社会发展阶段系数; t 在此表示社会经济发展阶段; a 、 b 为常数取值为1, e 为自然对数。当*t*值很小时,即社会发展水平很低, N_i 值趋于0;当*t*值很大时,社会发展水平很高, N_i 值趋于饱和值^[35]。社会发展阶段的计算通常与反映生活支出结构的恩格尔系数(E_n)的倒数对应起来,表达式如下:

$$t = 1/E_n - 2.5 \quad (4)$$

利用统计数据由公式(4)计算得到研究区2008年和2016年的*t*值分别为-0.46、-0.32,以公式(3)计算研究区2008年和2016年生态系统服务价值支付意愿指数。

2.5.3 环境能力指数(S_i) 植被的生物量不仅与植被的类型有关,同时受当年水分和热量等环境条件的影响。植被覆盖度是反映植被生长状况的主要指标,能较客观的反映植被的生产力和生物量的变化。本研究以植被覆盖度作为基本参数构建环境能力指数(S_i)反映研究区生态系统服务价值因环境条件而产生的动态变化,其公式为:

$$S_i = \sqrt{\frac{S_d}{S_{\text{mean}}}} \quad (5)$$

式中: S_d 表示该年度研究区植被覆盖度, S_{mean} 表示研究区多年植被覆盖度均值。根据遥感图像运算结果,以公式(5)计算研究区2008年和2016年的生态系统服务价值环境能力指数。

基于上述研究成果,同时参考相关^[37-40]研究,提出生态系统服务动态价值调整系数(M_{ij}),在此基

础上构建研究区生态系统服务动态价值评估模型(Q_{ij}),其具体模型如下:

$$M_{ij} = P_{ij} \times N_{ij} \times S_{ij} \quad (6)$$

$$Q_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \times E_{ij} \times M_{ij} \quad (7)$$

式中:*i*为第*i*个年份,*j*为第*j*种土地利用类型; P_{ij} 表示居民在第*i*年第*j*种土地利用类型生态系统服务价值的支付能力指数; N_{ij} 表示居民在第*i*年第*j*种土地利用类型生态系统服务价值的支付意愿指数; S_{ij} 表示第*i*年第*j*种土地利用类型生态系统服务价值的环境能力指数; Q_{ij} 为研究区第*i*年第*j*种土地利用类型生态系统服务动态价值; C_{ij} 为第*i*年第*j*种土地利用类型的面积; E_{ij} 是第*i*年第*j*种土地利用类型单位面积生态系统服务静态价值(元·hm⁻²);通过公式(6)计算2008年和2016年研究区生态系统服务价值动态调整系数值,林地和其它地类被赋予相同的生态系统服务动态价值调整系数值。利用公式(7)分别计算研究区2008和2016年及林地和其它地类生态系统服务动态价值及区域生态系统服务总动态价值。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

3.1.1 林地的空间变化 2008—2016年期间,研究区林地空间分布的基本格局未发生明显变化,即林地主要分布在南部和东部中高山,在西部、西南部和北部、东部边缘中高山地带带有少许分布,在河谷坝区也有零星分布(图2)。林地是东部和南部中高山的地基景观,与部分耕地和草地混交在一起,在其它区域有少许草地和林地混交。研究区海拔1600m以上属于中高山地带,从亚热带山区逐渐过渡到暖温带山区。海拔的升高明显改善了水热条件,为有林地、灌木林及其它林地的发育提供了条件。林木类型从云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)等滇中高原树种逐渐过渡到亚热带半湿润常绿阔叶林及针叶林。海拔1600~2000m的林木类型为云南松和旱冬瓜(*Alnus nepalensis* D. Don)等乔灌木,海拔2500m以上地区的林木类型以云南松为主,其次为滇栲(*Castanopsis diversifolia* Franch)和马缨花(*Rhododendron delavayi* Franch)等针阔叶混交中幼林^[21]。从研究区林地的空间分布变化看,2016年金沙江沿岸的东部中高山及南部中高山部分耕地转化为林地,表明退耕还林等生态保护工程对林地恢复有积

极的促进作用;然而,与2008年相比,2016年中这两个区域的林地斑块增多,破碎化程度更明显,主要是

因为人为干扰的加强(特别是人工林的建设)使林地破碎化程度加深。

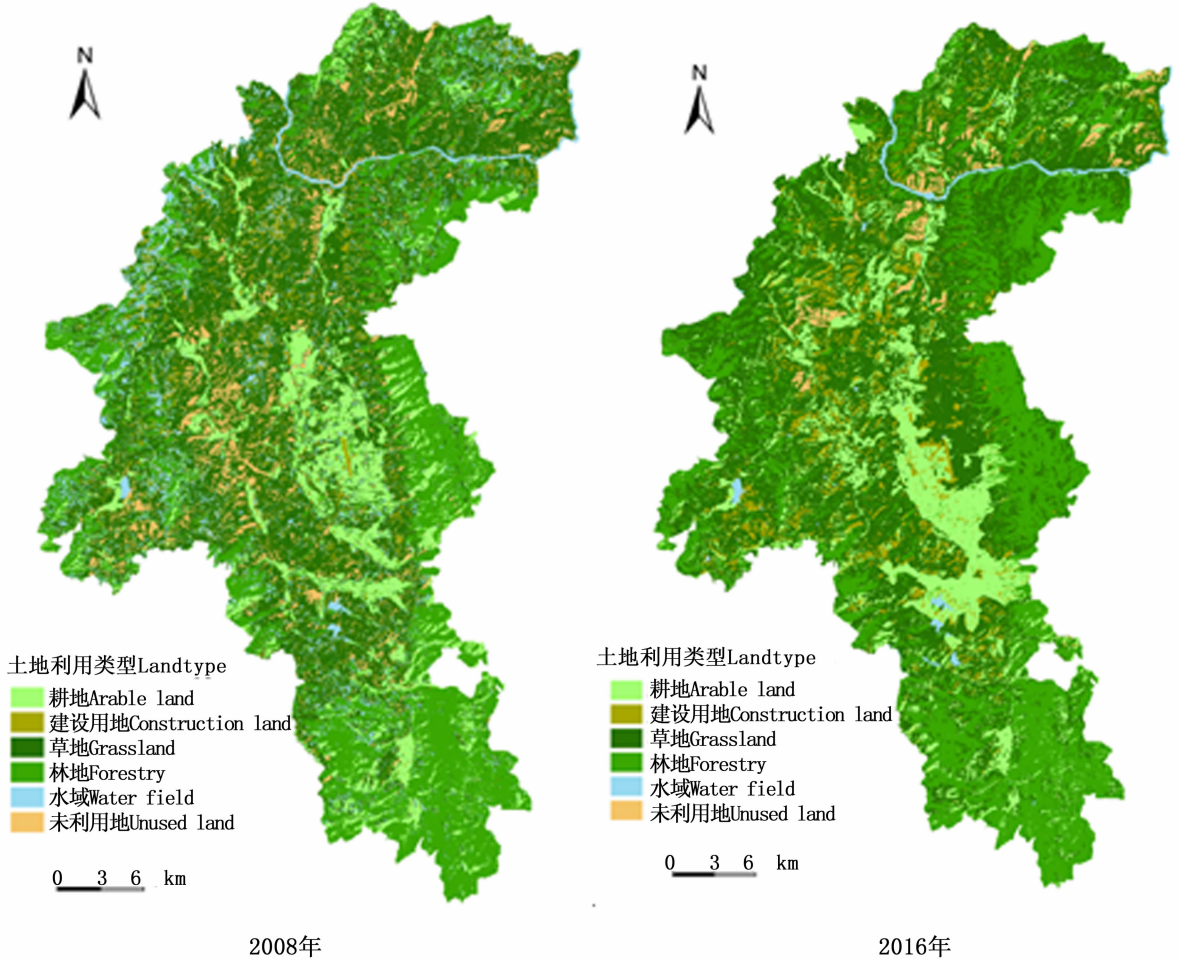


图2 研究区遥感分类结果
Fig. 2 Remote sensing classification result of the study area

3.1.2 林地的时间变化 通过本研究的数据源获得的研究区范围面积为2 032.84 km²。2008—2016年,研究区林地的面积从2008年的562.08 km²增长至2016年的626.32 km²,增长了64.24 km²,变化幅度达到11.42%,年变化率达1.42%。林地占研究区总面积比例由2008年的27.65%增至30.81%,增长了3.16%,增幅较为明显。研究区林地的土地利用综合指数由2008年的55.30增至60.20,增长了4.90,表明林地土地利用指数有所增长且增幅较大。

从表3中可以看出:林地与非林地之间相互转化较为频繁。林地向非林地的转移面积为90.53 km²,由非林地转入为林地的面积为154.77 km²。林地主要与非林地中的草地、耕地和未利用地和建设用地相互转化。林地转为草地的面积最多,达到73.61 km²;其次是林地向耕地和建设用地的转移,

分别达到14.02、2.9 km²。非林地向林地的转移中,草地的转移面积最大,为123.11 km²;其次是耕地和未利用地,分别向林地转移27.22、4.44 km²。林地虽与草地相互转化量最大,但林地以转入为主,有49.5 km²的净增长,主要原因在于研究区林地以灌木林为主,有林地少。灌木林和灌草丛的生境相似,易受水分条件的波动及人为干扰的影响而相互转换,发展人工林使更多的草地转为林地;林地与耕地的相互转化中,林地以转出为主,净减少13.2 km²,主要受耕地空间分布变化的影响。退耕还林和天然林工程及水土保持工作的开展使山区坡度≥25°的耕地转为林地,而坝周低山区和河谷坝区地势较平,坡度小,土地开发难度相对较小,农业经济发展对耕地的强烈需求使更多的林地开发成耕地,因而林地在与耕地的相互转化中表现为净减少;林地与未利

用地的相互转化中,林地以转入为主,净增长 4.44 km²,主要是由于经济利益驱使的土地开发和生态恢复工程的实施使未利用地向林地转化,因而林地获得一定净增长;林地与建设用地的相互转化中,林地以转出为主,净减少 2.9 km²,这主要是由于交通运

输的发展使部分林地转化为道路,居民用地增长使部分林地转为城乡居民用地,因而林地表现为一定的净减少。林地的土地利用状态指数为 0.26,指数为正且数值较小,表明林地以转入为主,且转入转出较为频繁,这与林地转移状况的研究结果一致。

表 3 土地利用转移矩阵
Table 3 Land use transfer matrix

土地利用类型 Land use type	林地 Forest land	草地 Grassland	耕地 Arable land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	水域 Water land	2008 年面积 Area in 2008
林地 Forest land	471.55	73.61	14.02	2.90	0.00	0.00	562.08
草地 Grassland	123.11	812.12	70.39	7.34	3.66	0.00	1 016.62
耕地 Arable land	27.22	25.66	192.86	10.17	2.87	0.00	258.78
建设用地 Construction land	0.00	0.00	0.00	82.34	2.23	0.00	84.57
未利用地 Unused land	4.44	6.26	18.91	1.53	42.27	4.04	77.45
水域 Water land	0.00	0.38	0.00	0.00	5.08	27.88	33.34
2016 年面积 Area in 2016	626.32	918.03	296.18	104.28	56.11	31.92	2 032.84

表 4 林地生态系统服务当量因子及林地单位面积生态系统服务价值

Table 4 Equivalent factor of forest ecosystem service and forest ecosystem service value per unit area

生态系统服务功能 Ecosystem service function	气体调节 Gasadjust	气候调节 Climate adjust	水源涵养 Water source conservation	土壤形成与保护 Soil formation With protection	废物处理 waste deal	生物多样性保护 Biological diversity protection	食物生产 Food produce	原材料 Raw materials	娱乐文化 Entertainment	合计 Total
当量因子 Equivalent factor	3.61	2.79	3.30	4.02	1.35	3.36	0.10	2.68	1.32	
价值系数 Value factor	0.383	0.296	0.350	0.427	0.143	0.356	0.011	0.284	0.140	2.390

× 10⁴ (元 · hm⁻²)

3.2 林地生态系统服务静态价值变化

通过对林地生态系统服务当量因子系数的调节,结合谢高地等^[2]的生态系统服务当量因子基础值确定研究区林地生态系统服务当量因子及林地单位面积生态系统服务价值(表 4)。

综合研究区土地利用变化(表 3)及林地单位面积生态系统服务价值研究(表 4),分析 2008 年和 2016 年研究区生态系统服务静态价值的变化状况(表 5)。2008 年和 2016 年研究区生态系统服务总静态价值分别为 25.98 亿元和 26.54 亿元,2016 年较 2008 年增长了 0.56 亿元,增长了 2.16%,平均增幅为 0.27%,总价值增长幅度不大。2016 年林地生态系统服务静态价值为 14.97 亿元,较 2008 年的 13.44 亿元增长了 1.53 亿元。2016 年林地在研究区生态系统服务静态服务总价值比例为 56.41%,较 2008 年的 51.73% 提高了 4.68%。2 个年份林地在研究区生态系统服务静态价值的比重都在 50%

以上,远高于草地及其它地类(表 5)。林地在区域生态系统服务静态价值的比重大且增幅明显,表明林地是干热河谷生态安全服务价值的关键类型,且其作用力不断增强,主要原因在于林地自身的单位面积生态系统服务静态价值高,林地面积的增长使其生态系统服务静态价值增长更为明显,在区域生态系统服务价值的比重也提升较快。自 20 世纪 50 年代以来,人类大幅砍伐森林用于薪材及其它生活和生产活动,导致 20 世纪 80 年代研究区的森林覆盖率不足 10%,森林的生态功能遭到毁灭性的破坏,极大的危害了长江流域的水土安全,引起了国家和各级政府的高度关注。作为长江上游水土保持重点区域之一,元谋强化了天然林工程、退耕还林还草工程及其它植被恢复措施的实施,林地比例的不断增长促进了元谋干热河谷生态环境的恢复。

表5 不同年份土地利用类型的生态系统服务静态价值

Table 5 Static value of ecosystem service of all land use types in different years

土地利用类型 Land use type	2008年		2016年		变化值 Change value / × 10 ⁹ 元	变化率 Change rate/%	年变化率 Annual change rate/%
	价值 Value/ × 10 ⁹ 元	比例 Percentage/%	价值 Value/ × 10 ⁹ 元	比例 Percentage/%			
林地 Forest land	13.44	51.73	14.97	56.41	1.53	11.38	1.42
草地 Grassland	9.83	37.84	8.87	33.41	-0.96	-9.77	-1.22
耕地 Arable land	1.90	7.31	2.17	8.18	0.27	14.21	1.78
建设用地 Construction land	-0.86	-3.31	-1.06	-3.99	-0.20	-23.26	2.91
未利用地 Unused land	1.63	6.28	1.56	5.88	-0.07	-4.29	-0.54
水域 Water land	0.04	0.15	0.03	0.11	-0.01	-25.00	-3.13
合计 Total	25.98	100	26.54	100	0.56	2.16	0.27

林地9个单项生态系统服务功能按价值量的大小排序依次为:土壤形成与保护 > 气体调节 > 生物多样性保护 > 水源涵养 > 气候调节 > 原材料 > 废物处理 > 娱乐文化 > 食物生产(表6)。林地在土壤形成与保护、气体调节和生物多样性保护的作用最大,食物生产价值最弱。由于研究区林地以灌木林为主,灌木林是研究区的景观基质,较好的适应了当地的干热气候。林木根系在土壤中的延伸为土壤的形成和保护提供了丰富的养分和水分来源,是固土和

水土保持的关键因素,因而林地的土壤形成与保护单向价值高。林木的光合作用在固定 CO₂ 和释放 O₂ 方面具有重要作用,故气体调节功能价值高。林地植被覆盖度高,生态环境质量好,为研究区动植物生存提供了良好的生境,因而生物多样性保护价值高。灌木林与有林地相比生物量偏低,食物产出少,以灌木林为主的林地结构导致林地食物生产价值弱。各单项生态系统服务价值虽有一定差异,但林地总体具有较高的生态系统服务价值。

表6 不同年份林地的单项生态系统服务静态价值

Table 6 Individual static value of forest ecosystem service in different years

× 10⁹元

年份 year	生态系统服务功能 Ecosystem service function									
	气体 调节 Gasadjust	气候 调节 Climate adjust	水源 涵养 Water source conservation	土壤形成 与保护 Soil formation With protection	废物 处理 waste deal	生物多样性 保护 Biological diversity protection	食物 生产 Food produce	原材料 Raw materials	娱乐 文化 Entertainment	合计 Total
2008年	2.15	1.66	1.97	2.40	0.81	2.00	0.06	1.60	0.79	13.44
2016年	2.40	1.85	2.19	2.67	0.90	2.23	0.07	1.78	0.88	14.97
变化值 Change value	0.25	0.19	0.22	0.27	0.09	0.23	0.01	0.18	0.09	1.53

3.3 林地生态系统服务动态价值变化

2008年和2016年生态系统服务动态价值调整系数值分别为0.354和0.603(表7)。2008年和2016年研究区林地生态系统服务动态价值分别为4.758亿元和9.027亿元,仅为同期林地生态系统服务静态价值的35.40%和60.30%,这主要是因为研究区经济发展水平较落后,人均GDP与全国平均水平的差异较大,恩格尔系数高,因此人们对林地生态系统服务价值的支付能力和支付意愿较低,导致林地生态系统服务动态价值总体偏低。2008年和2016年研究区生态系统服务总动态价值分别为9.197亿元和16.004亿元,林地生态系统服务动态价值占研究区生态系统服务总动态价值的比例分别为51.73%和56.41%,表明林地是区域生态系统服务价值的关键类型。

表7 林地生态系统服务动态价值调整系数

Table 7 Adjustment coefficient of dynamic value of forest ecosystem service

年份 Year	支付能力 Payment ability	支付意愿 Payment willingness	环境能力 Environment capacity	调整系数 Adjustment coefficient
2008	0.456	0.774	1.004	0.354
2016	0.712	0.840	1.008	0.603

从林地生态系统服务动态价值变化状况看,8年间其值增长了4.269亿元,增幅达89.72%,远超过同期林地生态系统静态服务价值增长率(11.38%)。这是由于较2008年相比,2016年研究区人均GDP增长非常迅速,与全国平均GDP水平的差异缩小了25.6%,支付能力提高明显。社会和经济的迅速发展较大的提升了社会发展阶段,恩格尔

系数降低,逐渐接近0.40的拐点,支付意愿得到提升,因而生态系统服务动态价值显著提升。随着支付能力和支付意愿的迅速提升,研究区林地生态系统服务动态价值将会显著增加。林地生态系统服务动态价值增长速度(89.72%)高于区域生态系统服务动态价值的增长均值(74.01%),表明高生态价值的土地利用类型对社会和环境调节能力增长更为敏感。

4 讨论

Costanza 等^[1]和谢高地等^[2]的研究为基于土地利用类型的生态服务价值评估奠定了基础。在不同地域和类型的林地生态系统服务价值研究中,学者们多结合研究区的自然和植被特征对生态系统服务当量因子进行适当的调整,李晓赛等^[35]的生态系统服务当量因子调整方法较好的体现了林地类型间生物量差异对林地生态系统服务价值的影响,因此,本研究借鉴了李晓赛等^[35]的研究方法,调整了研究区的林地生态系统服务当量因子系数。研究表明,林地对研究区水土、气候和生物保护起关键作用,是提供区域生态系统服务功能的主要类型,生态系统服务价值高,这与干热河谷生态系统实际状况是相符的;然而,干热河谷林地植被类型较复杂,且不同的林地植被演替阶段的差异亦会导致生物量和生态系统服务价值的差别,但此方面的研究却处于空白阶段,因此,难以完全真实的反映干热河谷林地生态系统的功能和价值。为提高干热河谷林木生态系统服务价值研究的精确性,应结合实际调查更细致的测量不同植被类型和生长阶段的林地生态系统单向服务价值。在生态系统动态价值系数研究中,恩格尔系数常作为反映支付意愿的指标。虽然恩格尔系数和支付意愿之间存在一定的相关关系,但二者之间是否存在明确的定量相关性却没有得到有效研究,而支付意愿同时也是居民的社会属性和心理特征的反映,应开展社会发展阶段、社会属性特征及心理特征与支付意愿的量化关系研究以深入探讨支付意愿对生态系统服务动态价值的影响。

5 结论

(1)中高山地带是研究区林地的主要分布区,人为干扰使林地空间分布更破碎。林地主要分布在南部和东部中高山,在西部、西南部和北部、东部边缘中高山地带带有少许分布,河谷坝区也有零星分布。

退耕还林等生态保护工程促进了林地的生态恢复,而人为干扰的作用(主要是人工林的建设)加深了林地的破碎化程度。

(2)林地面积有明显增长,林地与非林地之间相互转化频繁。8年来研究区的林地面积,增长了64.24 km²,变化幅度达到11.42%,年变化率达1.42%,总体幅度变化较大。林地以转入为主,但转入转出较为频繁,林地与草地的相互转化尤为明显,土地利用类型的变化对林地的干扰作用加强。

(3)林地是提供干热河谷生态系统服务价值的关键类型。林地占生态系统服务的静态价值,在区域生态系统服务总静态价值中的比重在50%以上,且比重不断提高,对区域生态系统服务的作用力不断增强。林地的土壤形成与保护、气体调节和生物多样性保护单向生态系统服务价值最高,食物生产价值最弱。

(4)林地生态系统服务静态价值和动态价值差异性大。现阶段人们对林地生态系统服务价值的支付能力和支付意愿较低,使林地生态系统服务动态价值总体偏低。研究区林地生态系统服务动态价值远低于同期静态价值,但其变化幅度远高于静态价值,反映人们支付能力和生态环境意识的提升。具有高生态系统服务价值的林地对社会和环境调节能力的增长更敏感。

参考文献:

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R S, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [3] Mcneely J A, Miller K R, Reid W V, *et al.* *Conserving the world's biological diversity*[M]. Gland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 1990.
- [4] Pearce D W. *Blueprint 4: Capturing global environmental value* [M]. London: Earthscan, 1995.
- [5] Sutton P C, Costanza R. Global estimates of market and non-market values derived from night time satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 509-527.
- [6] Potschin M B, Hainesyoung R H. Ecosystem services[J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(5): 575-594.
- [7] Lal P. Economic valuation of mangroves and decision-making in the Pacific[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2003, 46(9-10): 823-844.
- [8] Kroeger T, Casey F. An assessment of market-based approaches to providing ecosystem services on agricultural lands[J]. *Ecological E-*

- conomics, 2007, 64(2): 321–332.
- [9] Jenkins W A, Murray B C, Kramer R A, *et al.* Valuing ecosystem services from wetlands restoration in the Mississippi Alluvial valley [J]. *Ecological economics*, 2010, 69(5): 1051–1061.
- [10] Chee Y. An ecological perspective on the valuation of ecosystem services[J]. *Biological Conservation*, 2004, 120: 549–565.
- [11] Mendoza-González G, Martínez M L, Lithgow D, *et al.* Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico [J]. *Ecological Economics*, 2012, 82(20): 23–32.
- [12] Toman M. Why not to calculate the value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 57–60.
- [13] Heal G. Valuing ecosystem services [J]. *Ecological Economics*, 2000, 35(3): 24–30.
- [14] Wilson M A, Howarth R. Discourse based valuation of ecosystem services: establishing fair outcomes through group deliberation [J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 431–443.
- [15] Mathias J D, Bonté B, Cordonnier T, *et al.* Using the viability theory to assess the flexibility of forest managers under ecological intensification [J]. *Environmental Management*, 2015, 56(5): 1170–1183.
- [16] Vedel S E, Jacobsen J B, Bo J T. Forest owners' willingness to accept contracts for ecosystem service provision is sensitive to additionality. *Ecological Economics*, 2015, 113: 15–24.
- [17] Dawson N, Martin A. Assessing the contribution of ecosystem services to human wellbeing: A disaggregated study in western Rwanda [J]. *Ecological Economics*, 2015, 117: 62–72.
- [18] Foelker C J, Christopher Standley C R, Parry D, *et al.* Complex ecological relationships among an assemblage of indigenous hymenopteran parasitoids, the exotic European wood wasp (*Sirex noctilio*; Hymenoptera: Siricidae), and a native congener [J]. *Canadian Entomologist*, 2016, 148(5): 532–542.
- [19] Vibrans A C, Moser P, Oliveira L Z, *et al.* Generic and specific stem volume models for three subtropical forest types in southern Brazil [J]. *Annals of Forest Science*, 2015, 72(6): 865–874.
- [20] Matsushita K, Tomotsune M, Sakamaki Y, *et al.* Effects of management treatments on the carbon cycle of a cool-temperate broad-leaved deciduous forest and its potential as a bioenergy source [J]. *Ecological Research*, 2015, 30(2): 293–302.
- [21] 王 丽. 青城山高保护价值森林的生态服务功能评价研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [22] 郑江坤, 余新晓, 夏 兵, 等. 潮白河流域林地转化及森林生态服务价值动态分析 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(S1): 308–314.
- [23] 马国军, 林 栋. 石羊河流域生态系统服务功能经济价值评估 [J]. *中国沙漠*, 2009, 29(6): 1173–1177.
- [24] 汪有奎, 郭生祥, 汪 杰, 等. 甘肃祁连山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1905–1911.
- [25] 龙会英, 沙毓沧, 朱红业, 等. 8份圭亚那柱花草在元谋干热河谷的引种研究 [J]. *西南农业大学学报*, 2007, 20(5): 1078–1083.
- [26] 马姜明, 李 昆, 张昌顺. 元谋干热河谷苏门答腊金合欢、新银合欢人工林天然更新初步研究 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1365–1369.
- [27] 方海东, 段昌群, 纪中华, 等. 金沙江干热河谷自然恢复区植物种群生态位特征 [J]. *武汉大学学报: 理学版*, 2008, 54(2): 177–182.
- [28] 高文学, 王志和, 周庆宏, 等. 金沙江干热河谷稀树灌草丛植被恢复方式研究 [J]. *林业调查规划*, 2005, 30(3): 87–91.
- [29] 李 彬, 唐国勇, 李 昆, 等. 元谋干热河谷20年生人工恢复植被生物量分配与空间结构特征 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1479–1486.
- [30] 周红艺, 熊东红, 杨 忠. 元谋干热河谷土地利用变化对生态系统服务价值的影响 [J]. *山地学报*, 2008, 24(3): 135–138.
- [31] 杨 忠, 熊东红, 周红艺, 等. 干热河谷不同岩土组成坡地的降水入渗与林木生长 [J]. *中国科学 E 辑*, 2003, 33(增刊): 110–119.
- [32] 欧晓昆. 元谋干热河谷的自然生态特点及开发利用意见 [J]. *西部林业科学*, 1987(1): 17–19.
- [33] 何锦峰, 苏春江, 舒 兰, 等. 基于3S技术的金沙江干热河谷区LUCC研究——以云南省元谋县为例 [J]. *山地学报*, 2009, 27(3): 341–348.
- [34] 孙长安. 香溪河流域土地利用与水土流失的关系研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [35] 李晓赛, 朱永明, 赵 丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 373–381.
- [36] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25(4): 414–419.
- [37] 宗跃光, 陈红春, 郭瑞华, 等. 地域生态系统服务功能的价值结构分析——以宁夏灵武市为例 [J]. *地理研究*, 2000, 19(2): 148–155.
- [38] 粟晓玲, 康邵忠, 佟 玲. 内陆河流域生态系统服务价值的动态估算方法 [J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 2011–2019.
- [39] 杜金龙. 土地利用变化及其对生态系统服务价值影响研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [40] 邓舒洪. 区域土地利用变化与生态系统服务价值动态变化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

(责任编辑: 詹春梅)