

DOI: 10.5846/stxb201809192042

王希义, 彭淑贞, 徐海量, 凌红波, 岳俊生. 基于生物量的塔里木河下游胡杨 (*Populus euphratica*) 生态服务价值评估. 生态学报, 2019, 39(1): - - .  
Wang X Y, Peng S Z, Xu H L, Ling H B, Yue J S. Assessment of ecological service value based on biomass of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - - .

## 基于生物量的塔里木河下游胡杨 (*Populus euphratica*) 生态服务价值评估

王希义<sup>1,2</sup>, 彭淑贞<sup>1</sup>, 徐海量<sup>2,\*</sup>, 凌红波<sup>2</sup>, 岳俊生<sup>1</sup>

1 泰山学院, 泰安 271000

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

**摘要:** 胡杨是塔里木河下游荒漠河岸林的重要组成部分, 研究塔里木河下游胡杨生物量及生态服务价值变化特征, 可以为塔里木河下游生态输水的效益评估提供科学依据。以塔里木河下游胡杨为研究对象, 采用实地调查采样与遥感解译分析相结合的方法, 评估了不同年份胡杨地上生物量特征, 并结合遥感方法提取不同年份胡杨面积, 估算了不同年份胡杨的生态服务价值。结果表明: (1) 胡杨主要分布在离河道 0—700 m 的范围内, 此范围内的生物量占总生物量的 90% 以上; 在离河道 700 m 以外, 胡杨的生物量不足 10%。英苏断面胡杨平均生物量最高, 阿拉干断面次之, 依干不及麻与喀尔达依断面胡杨生物量较低。(2) 2000 年, 胡杨单位面积平均生态服务价值为 78.96 元/hm<sup>2</sup>, 2010 年为 177.14 元/hm<sup>2</sup>, 2016 年为 313.55 元/hm<sup>2</sup>; 胡杨总服务价值在 2000 年为 43.24×10<sup>4</sup> 元, 2010 年为 93.00×10<sup>4</sup> 元, 2016 年为 184.27×10<sup>4</sup> 元。(3) 2016 年胡杨的有形服务价值为 22.74×10<sup>4</sup> 元, 无形服务价值为 161.53×10<sup>4</sup> 元, 胡杨的无形生态服务价值为有形生态服务价值的 7.1 倍。生态输水对胡杨生物量与服务价值具有显著的影响, 输水效益十分显著。

**关键词:** 生态服务价值; 生物量; 树木年轮; 胡杨; 塔里木河下游

## Assessment of ecological service value based on biomass of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River

WANG Xiyi<sup>1,2</sup>, PENG Shuzhen<sup>1</sup>, XU Hailiang<sup>2,\*</sup>, LING Hongbo<sup>2</sup>, YUE Junsheng<sup>1</sup>

1 Taishan University, Tai'an 271000, China

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

**Abstract:** *Populus euphratica* is an important part of the desert riparian forest in the lower reaches of the Tarim River. Changes of biomass characteristics and the ecological service value of *P. euphratica* were studied in this paper, that can provide scientific basis to the benefit assessments of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River. Firstly, characteristics of the biomass of *P. euphratica* in different years were evaluated by the methods includes field survey and remote sensing interpretation; Secondly, the area of *P. euphratica* in different years were extracted; Thirdly, the ecological service value of *P. euphratica* in different years were estimated. The results were as follows: (1) *P. euphratica* distributed in the range of 0—700 m distances from the river mainly, and the biomass in this range accounted for more than 90% of the total biomass; The average biomass of *P. euphratica* on Yingsu was the highest, Alagan was the next, Karday and Yiganbjm were very low. (2) Based on the revised formula, the average ecosystem service value of *P. euphratica* was 78.96 yuan/hm<sup>2</sup> in 2000, and that was 177.14 yuan/hm<sup>2</sup> and 313.55 yuan/hm<sup>2</sup> in 2010 and 2016, respectively. The total

基金项目: 国家自然科学基金(41471099, 31400466); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(XBBS-2014-13)

收稿日期: 2018-09-19; 修订日期: 2018-11-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

ecological service value of *P. euphratica* was  $43.24 \times 10^4$  yuan,  $93.00 \times 10^4$  yuan, and  $184.27 \times 10^4$  yuan in 2000, 2010, and 2016, respectively. (3) In 2016, the visible service value of *P. euphratica* was  $22.74 \times 10^4$  yuan; However, the invisible service value, which was 7.1 times more than the visible service value, was  $161.53 \times 10^4$  yuan. There was amount of significant effects of ecological water conveyance on the biomass and service value of *P. euphratica*, and the benefit of ecological water conveyance was very significant.

**Key Words:** ecological service value; biomass; tree ring; *Populus euphratica*; lower reaches of Tarim River

森林是陆地生物光合产量的主体,具有复杂的层次结构与生命周期<sup>[1]</sup>,在维护全球气候系统、减缓温室效应、调节碳平衡、保护生物多样性等方面具有重要作用<sup>[2]</sup>。森林生物量是森林生态系统的重要指标之一,反映了系统中个体、种群或群落生物质数量的多少,是森林环境质量的综合体现<sup>[3-4]</sup>,也是评估生态服务价值的重要参数<sup>[5]</sup>。森林不仅可以为人类的生存和发展提供林副产品和木材等物质资源,而且还具有调节气候、净化空气、防风固沙、涵养水源、固土保肥等生态功能。因此,估测森林生物量并评估其生态服务价值有助于提高人们的环保意识,对于森林资源合理利用和经济可持续发展具有重要意义。

20 世纪 50 年代,美国、德国、前苏联等国家的相关学者开始对森林的生态服务价值进行研究<sup>[6-7]</sup>。20 世纪 60 年代,国外一些专家开始采用能值分析法对森林服务价值进行估算,对评估方法进行了完善<sup>[8-9]</sup>。20 世纪 90 年代,国外针对森林生态服务价值的研究方法得到了进一步发展,主要包括市场价值法、旅行费用法和意愿调查法等<sup>[10-12]</sup>。进入 21 世纪以后,随着 3S 技术的广泛应用,适合大尺度森林生态系统服务价值的评估模型逐渐增多,评估的准确性也逐渐升高。我国一些学者在 20 世纪 80 年代开始针对森林的生态服务价值进行研究,研究对象主要包括城市森林、流域森林、山区森林等<sup>[13-16]</sup>。这些研究大都采用国外的研究方法,即基于森林的面积数据,将服务功能分成若干方面进行评估。然而,在不同区域,森林内部植株的分布密度、高矮特征、树干粗细程度均有所不同,这导致不同区域单位面积内森林生物量的差异较大。一般而言,生物量越大,生态系统服务功能越强<sup>[17]</sup>。因此,仅采用森林面积数据对其生态服务价值进行评估并不严谨,需要结合区域内森林的单位面积生物量进行评估。但是,目前依据森林生物量对生态服务价值进行评估的研究比较少见。

胡杨是塔里木河下游的植被建群种,对于区域内环境状况和植被恢复程度具有最直接的指示作用<sup>[18]</sup>。目前,针对塔里木河下游胡杨的研究主要集中在胡杨变化与生态输水的关系、胡杨生态分布与胡杨生理特征等方面<sup>[19-21]</sup>,而利用生物量评估生态经济价值的研究未见报道。研究胡杨生态服务价值,将生态系统资本货币化,对国家资产的核算及区域“绿色 GDP”核算都具有重要意义。本文考虑到胡杨生态特征,首先构建了胡杨生物量评估模型;其次,利用树木年轮方法对不同年份胡杨的生物量进行了模拟;之后,依据生态服务价值订正公式,对不同年份胡杨的生态系统服务价值进行了评估。本研究可以使人们恰当认识胡杨在生活和生产中的作用,也为今后开展植被生态服务价值评估工作提供一些基础的研究数据和方法,对生态输水的效益评估具有重要科学指导意义。

## 1 研究区概况

塔里木河流域地处亚欧大陆腹地,是中国典型的干旱荒漠区。塔里木河下游是指从大西海子水库至尾间湖台特玛湖,总长度为 363 km(图 1)。区域内属温带荒漠干旱气候,年降水量 20—50 mm,而潜在蒸发量高达 2500—3000 mm<sup>[22]</sup>。由于受到地下水以及河水的补给,河漫滩以及河道两侧低阶地内形成了大面积的乔灌草带,并且随着与河道距离的增加,呈现出有规律分布<sup>[23]</sup>。

塔里木河下游地区乔木主要为胡杨(*Populus euphratica*),灌木包括怪柳(*Tamarix chinensis*)、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等,草本主要有芦苇(*Phragmites communis*)、鹿角草

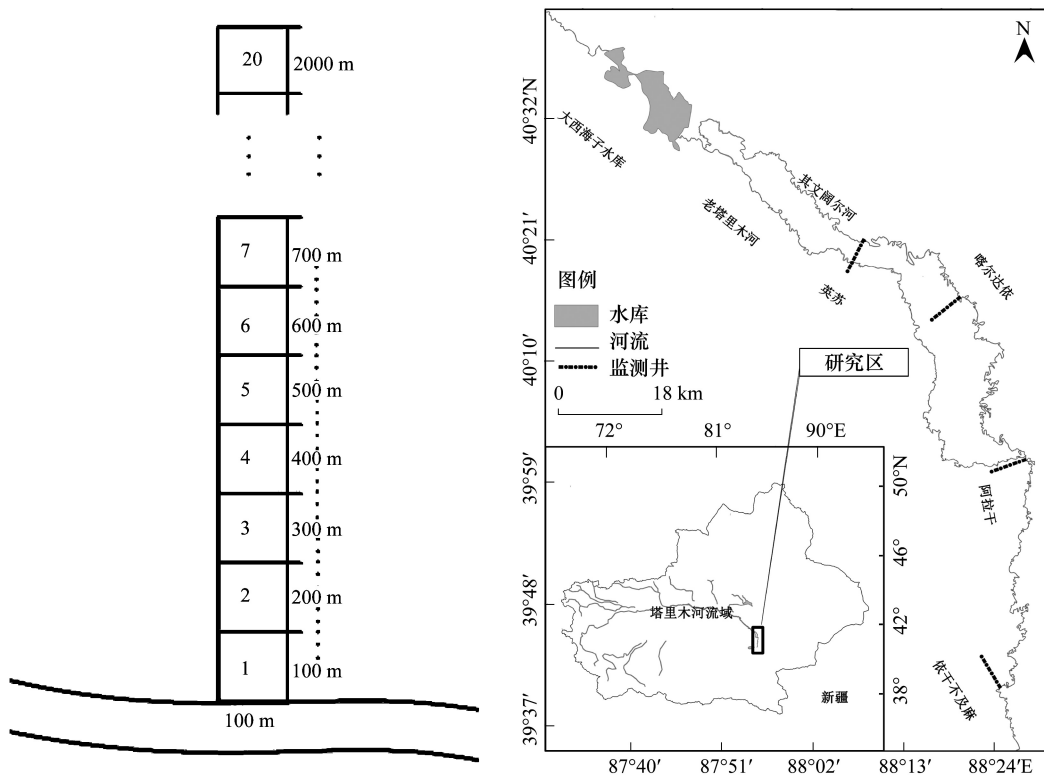


图1 塔里木河下游各断面分布

Fig.1 Distribution of each section in the lower reaches of the Tarim River

(*Glossogyne tenuifolia*)、骆驼刺(*Alhagi sparsif*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)等。自2000年开展生态输水以来,塔里木河下游地区受到大量下泄水的补给,大面积死亡或濒临死亡的植被又出现复苏,植被盖度和物种多样性有所回升。胡杨大都沿河道分布,随着离河道距离的增加,胡杨分布密度呈递减趋势,即单位面积内胡杨的数量呈降低趋势<sup>[24-25]</sup>。对于整个塔里木河下游地区而言,胸径为16-36 cm的胡杨林木株数所占比例最大,占到70%以上<sup>[26]</sup>。在距离河道0—20 m的范围内,幼龄胡杨所占比重较多,比例达到13.24%;随着离河道距离的增加,幼龄胡杨所占比例逐渐下降,过熟林和衰老林所占比例逐渐增多;在离河道400 m之外,过熟林和衰老林所占比例达到90%以上<sup>[27-28]</sup>。

## 2 资料来源与研究方法

### 2.1 野外监测与数据提取

在本研究中,选取塔里木河下游的英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻4个典型断面上的胡杨为研究对象。在2000年,生态输水工程开始实施,本研究的课题组人员也开始对4个断面的胡杨进行监测。在2000年,对于每一个监测断面,首先布设一条监测样带,样带长2000 m,宽100 m;其次,将样带平均分成20个100 m×100 m的大样方。

#### 2.1.1 胡杨生态特征提取

在2000年,首先对各个样地内的胡杨进行编号,然后对胡杨的生态因子进行测量,包括胸径、树高、冠幅、长势等因子。之后,在每一年的7—8月份,课题组人员均针对胡杨的生态特征进行监测。

#### 2.1.2 树木年轮获取

在2016年,针对每一个100 m×100 m的大样方,运用“十字交叉法”对样方内胸径>5 cm的所有胡杨进行钻芯取样,取样位置在测量胸径处(离地面1.3 m)。4条样带内一共80个100 m×100 m的大样方,在这些样方内,胸径>5 cm的胡杨一共469棵,其中英苏断面141株,喀尔达依67株,阿拉干112株,依干不及麻149

株。每棵胡杨以“十字交叉法”获取钻芯,钻芯方向分别为南北和东西向,每棵树取样芯 2 个。钻芯至树干髓心处即可,并装于自制的纸筒软管中,记录所取样芯的胡杨胸径、样芯质量等信息,共获取样芯 938 个。

## 2.2 研究方法

对于每一棵胡杨,在计算胡杨地上生物量之前,首先将胡杨地上部分分为树冠与树干两个部分,然后计算这两个部分的生物量。

### 2.2.1 胡杨树冠生物量模型

董道瑞等<sup>[29]</sup>基于 50 株胡杨的平均冠幅、冠幅面积、树冠周长、枝下高、胸径、树高、枯枝比等分别作为自变量与树冠生物量进行了相关分析,得出冠幅面积的相关性最高,并以冠幅面积为自变量建立了树冠生物量估测模型,并且估测精度较高。因此,本文利用此模型对胡杨的树冠生物量进行估测。树冠生物量估测模型:

$$S = 0.016A^2 + 2.291A + 11.084 \quad (1)$$

式中, $A$  为胡杨冠幅面积, $S$  为树冠生物量。

基于每一年胡杨冠幅面积的监测数据,结合此模型,即可得出每一年胡杨的树冠生物量。

### 2.2.2 胡杨树干体积模型

在本研究中,采用微积分的方法,计算树干的体积。本文假设在树干上,树轮半径随着树干高度均匀变化。首先将胡杨树干视为一个圆锥体,计算该圆锥体的体积(图 2)。

基于图 2,取积分变量为  $x, x \in [0, H]$ 。在  $[0, H]$  上任取一个小区间  $[x, x+dx]$ ,以  $dx$  为底的窄边梯形绕  $x$  轴旋转而成的薄片可近似看作此圆锥体,其体积为:

$$dV = \pi \left[ \frac{R}{H}x \right]^2 dx \quad (2)$$

则圆锥体的体积为:

$$V = \int_0^H \pi \left( \frac{R}{H}x \right)^2 dx = \frac{\pi R^2}{H^2} \left[ \frac{x^3}{3} \right]_0^H = \frac{\pi R H^2}{3} \quad (3)$$

由此即可以计算出树干圆锥体的体积。结合树干密度,即得出胡杨树干生物量。胡杨的树干密度取  $748.43 \text{ kg/m}^3$ <sup>[29]</sup>。

树冠生物量与树干生物量之和即为胡杨地上总生物量。

### 2.2.3 不同年份胡杨生物量

首先,选定一株胡杨,基于每一年测量的胡杨冠幅面积,利用公式(1)即可得出每一年胡杨树冠生物量;其次,将钻取的样芯带回实验室经粘贴、编号、固定、打磨等预处理后,进行交叉定年<sup>[30]</sup>,利用树木年轮分析仪(LINTAB TM-6,精度 0.01 mm)读取径向生长量的值,并借助图表法和 COFECHA 软件进行交叉定年的校准和数据订正,由此可以得出每一年胸径处的树木年轮增加宽度,基于 2016 年胡杨的胸径,可得 2000—2015 年各个年份胡杨的胸径值,然后借助公式(2—3)中的各个参数并结合胡杨树干密度,可以得出每一年胡杨的树干生物量;最后,每一年胡杨树冠与树干生物量之和即为该年度胡杨总生物量。

### 2.2.4 生态服务价值估算方法

本研究利用谢高地等<sup>[31]</sup>的研究方法,对胡杨的生态服务价值进行评估。谢高地等参照 Constaza 等提出的方法,依据生物量特征进行订正,逐项估计各项生态系统服务价值,最后得出森林生态系统服务价值。在本研究中,也依据胡杨的生物量特征进行订正,得出胡杨单位面积生态服务价值计算公式:

$$P = (b/B)P_i \quad (4)$$

式中, $P$  为胡杨的生态服务价值, $b$  为胡杨单位面积生物量, $B$  为我国一级生态系统类型—森林单位面积平均

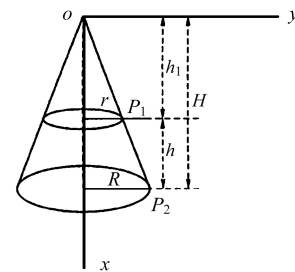


图 2 胡杨树干圆锥体示意图

Fig.2 Schematic diagram of the trunk cone of *P. euphratica*



生物量,  $P_i$  为我国森林生态服务价值基准单位。

### 2.2.5 胡杨林面积的提取

基础数据为塔里木河下游的 Landsat-TM 影像数据和中巴资源卫星数据, 成像时间为 2000 年、2010 年与 2016 年的 7—9 月份, 图像分辨率为 30 m, 每景覆盖范围为 185 km×185 km, 影像主要采用 2、3、4 三个波段合成。首先, 利用 Erdas 软件对 3 期遥感影像进行几何校正与配准, 在 ArcGIS 10 软件支持下利用 ArcInfo 模块分别对塔里木河下游的 3 期遥感影像进行目视判读和数字化工作; 其次, 通过实地考察进行校准, 对流域的解译结果进行修正, 通过精度检验, 使 3 期数据精度均在 80% 以上以符合研究的需求; 第三, 根据国家决策以及本次调查需要, 将调查区的土地利用方式进行分类。最后, 本研究对胡杨林地的面积进行了提取。

## 3 结果与分析

### 3.1 单位面积胡杨生物量

#### 3.1.1 胡杨地上生态特征

在本研究中, 首先依据 2016 年胡杨生态特征调查结果, 得出各个监测断面胡杨的生态因子(表 1)。

表 1 胡杨地上因子统计

Table 1 Statistics of above ground factors of *P. euphratica*

断面 Transect	胸径 DBH (Diameter at Breast Height)/m				高度 Height /m				单株生物量 Individual biomass /kg			
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
英苏	0.0156	1.321	0.257	0.214	2.000	13.011	6.787	2.536	1.072	687.417	92.104	106.705
喀尔达依	0.031	0.619	0.211	0.125	2.102	13.71	5.242	2.327	2.804	346.302	60.473	63.782
阿拉干	0.029	0.797	0.289	0.155	2.091	29.11	6.335	2.868	2.796	354.914	99.122	72.602
依干不及麻	0.031	0.718	0.187	0.127	1.376	9.551	3.347	1.148	3.292	296.443	37.104	41.381

由表 1 可知, 胡杨胸径的最小值和最大值都出现在英苏断面。胡杨的胸径反映出了树龄的大小<sup>[32]</sup>, 因此英苏断面的胡杨树龄宽度最大。另外, 胡杨单株生物量最小值和最大值均出现在英苏断面, 这表明在英苏断面胡杨龄级跨度大, 胡杨幼苗、幼龄树、中龄树、老龄树的数量均较多。依干不及麻断面胡杨胸径平均值最低, 高度平均值也显著低于其他 3 个断面, 胡杨单株平均生物量也显著低于其他断面, 表明依干不及麻断面的胡杨长势较差。

#### 3.1.2 各断面不同离河道距离生物量特征

胡杨生物量随着离河道距离的变化特征反映出生物量随着水分条件的变化规律。在塔里木河下游地区, 随着离河道距离的增加, 水分条件逐渐变差, 如地下水埋深降低、土壤含水量减少等。胡杨生物量随着离河道距离增加的变化特征如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着离河道距离的增加, 胡杨生物量呈现降低趋势。在离河道 700 m 以内, 胡杨的生物量较多, 占到总生物量的 90% 以上; 在离河道 700 m 以外, 胡杨的生物量很少。这是因为随着离河道距离的增加, 河水漫溢作用减弱, 地下水埋深降低, 胡杨的生长受到抑制, 导致生长衰败, 生物量减少。在英苏断面, 胡杨地上生物量主要分布在距离河道 300 m 和 1400—2000 m 范围内。在离河岸 300 m 范围内, 胡杨密度大, 长势茂盛, 冠幅大且没有枯枝, 地上生物量大; 在 1400 m 之外, 胡杨密度小而长势极度衰退, 活枝少, 出现顶枯和腐芯现象, 濒临死亡。在喀尔达依断面, 胡杨生物量在离河 900 m 附近有一个小的高峰, 阿拉干断面在 500—700 m 处的胡杨生物量也相对较高。这种现象也许与样带的设置方式或是微地形有关, 具体原因需要进一步探讨。

#### 3.1.3 各断面胡杨单位面积生物量

由于样带设置的随机性, 加上胡杨分布的随机性, 导致并非所有的大样方内都有胡杨分布。例如在阿拉

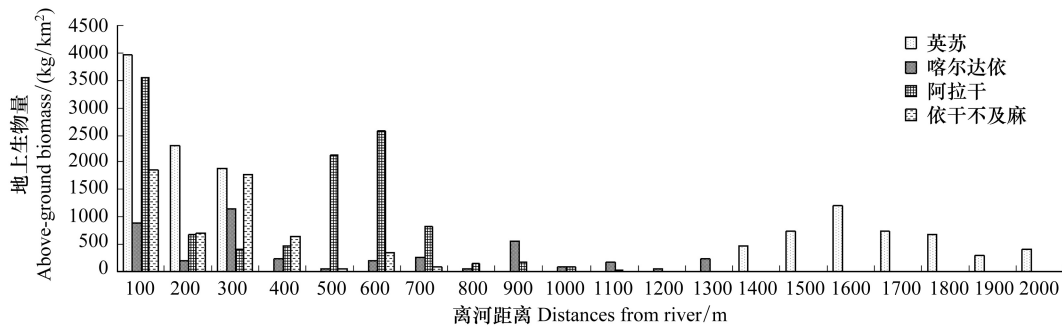


图3 各断面不同与河距离上胡杨单位面积生物量分布特征

Fig.3 The distribution characteristics of *P. euphratica* biomass per unit area in different distances from river on each section

干断面所设置的样带内,离河道 1100 m 以内有胡杨,1100 m 之外没有胡杨;但是在样带之外,离河道 1100 m 以外依然有胡杨分布,直至到 2000 m 以外的区域都有胡杨。因此本研究中,计算样带内年胡杨平均生物量(表 2)依然使用整条样带的面积,而非仅有胡杨分布区域的面积。

表 2 各监测样带内胡杨单位面积生物量

Table 2 Biomass per unit area of *P. euphratica* in each transect

监测断面 Transect	英苏	喀尔达依	阿拉干	依干不及麻
单位面积生物量 Biomass per unit area ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	637.32	208.632	555.085	276.428
平均生物量 Average biomass / ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	419.37			

表 2 中得出了各监测断面内胡杨单位面积平均生物量。英苏断面的胡杨平均生物量最高,这是因为英苏断面离放水源-大西海子水库最近,地下水埋深较高,土壤水含量也较大,可以较好的满足胡杨的生长需求,因此胡杨长势好、数量多。阿拉干断面胡杨平均生物量也较高,这是因为阿拉干断面位于其文阔尔河与老塔里木河两条河流的交汇处,水源也相对充足,胡杨数量多,长势也较好。喀尔达依和依干不及麻断面上河水流量少,地下水埋深低,土壤含水量也较少,胡杨的生长受到抑制,数量少,长势差。

### 3.2 单位面积胡杨生态服务价值变化

#### 3.2.1 不同年份胡杨单位面积生物量

本研究基于树木年轮分析法,依据胡杨生物量计算模型,得出 2000、2010、2016 年各监测断面胡杨单位面积生物量(图 4)。

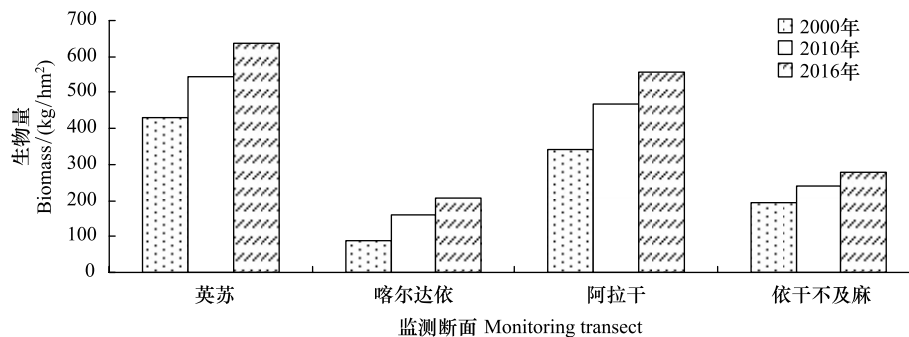


图 4 各断面不同年份胡杨单位面积生物量

Fig.4 Biomass per unit area of *P. euphratica* in different years on each transect

由图 4 可以得出,2000—2016 年各个断面胡杨单位面积平均生物量均有显著增加。

在对塔里木河下游整个区域胡杨单位面积生物量进行评估时,首先将 4 条样带视作一个整体,得出 4 条

样带 80 个样方胡杨总生物量;其次,可以计算出每一个样方内胡杨平均生物量。2000、2010、2016 年,塔里木河下游胡杨单位面积平均生物量分别为 264.63、352.80、419.37 kg/hm<sup>2</sup>。

### 3.2.2 胡杨生态系统单位面积生态服务价值

胡杨是极端干旱区天然分布的唯一成林高大乔木树种。因此,在生态服务价值评估时,本研究采取森林的生态服务价值。基于统计年鉴数据以及文献查询资料,得出 2000、2010、2016 年全国森林单位面积生物量分别为 77.4、80.07、81.76 t/hm<sup>2</sup>,单位面积服务价值分别为  $2.31 \times 10^4$ 、 $4.02 \times 10^4$ 、 $6.11 \times 10^4$  元/hm<sup>2</sup>[33-36]。借鉴订正公式(4),可以得出各个监测断面 2000、2010、2016 年胡杨单位面积生态服务价值(表 3)。

表 3 各断面不同年份胡杨单位面积生态服务价值/(元/hm<sup>2</sup>)

Table 3 Ecological service value of the unit area of *P. euphratica* in different sections of each section

年份 Year	2000	2010	2016	年份 Year	2000	2010	2016
英苏	128.45	273.01	476.51	阿拉干	102.39	235.74	415.03
喀尔达依	26.51	79.82	155.97	依干不及麻	58.50	120.00	206.68

由表 3 可知,随着胡杨单位面积生物量的增加,2000—2016 年各个断面单位面积生态服务价值也呈增加趋势。英苏断面单位面积生态服务价值最高,阿拉干断面也相对较高;喀尔达依和依干不及麻胡杨单位面积生态服务价值较低。

### 3.2.3 塔里木河下游胡杨单位面积服务价值变化

在估算塔里木河下游胡杨单位面积平均生态服务价值时,首先将 4 个监测断面视为一个整体,计算出胡杨单位面积的平均生态服务价值(图 5)。

由图 5 可以看出,2000—2016 年,胡杨单位面积生态服务价值明显增加。2000 年,胡杨单位面积平均生态服务价值为 78.96 元/hm<sup>2</sup>,2010 年为 177.14 元/hm<sup>2</sup>,到 2016 年增加到 313.55 元/hm<sup>2</sup>。

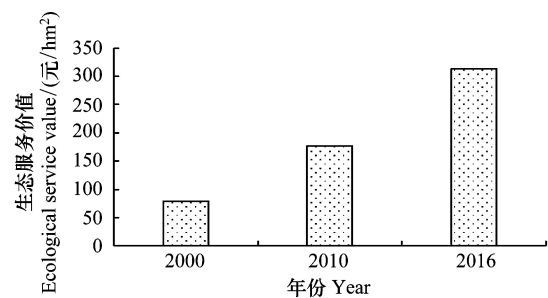


图 5 各年份胡杨单位面积生态服务价值

Fig.5 Ecological service value per unit area of *P. euphratica* in different years

## 3.3 区域胡杨总服务价值变化

### 3.3.1 塔里木河下游植被面积变化

本研究基于遥感解译资料,提取了塔里木河下游在 2000、2010、2016 年胡杨林地、灌木林地、草地面积图(图 6)。

鉴于研究的需要,在此只选取了 2000、2010、2016 年胡杨林面积(图 7)。

由图 6 与图 7 可知,2000—2010 年,塔里木河下游胡杨面积有所降低,减少了 4.24%。生态输水虽然促进了胡杨面积的扩大,但是 2007 年输水量很少,仅为  $1410 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,2008 年没有输水,2009 年输水量仅为  $1066 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,这导致胡杨的生长受到抑制,胡杨面积不断衰退,到 2010 年胡杨的面积已经低于 2000 年。2010—2016 年,胡杨面积增加了 11.58%,这是由于 2010—2016 年生态输水状况良好,总输水量达  $354351 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,胡杨生态朝着良性的方向发展。

### 3.3.2 区域胡杨服务价值变化

在本研究中,基于胡杨单位面积生态服务价值以及相应年份的胡杨面积数据,得出当年的胡杨总生态服务价值(图 8)。

图 8 指出,2000—2016 年,塔里木河下游胡杨总生态服务价值逐年增加,在 2000 年为  $43.24 \times 10^4$  元,2010 年为  $93.00 \times 10^4$  元,到 2016 年达到  $184.27 \times 10^4$  元。

### 3.3.3 胡杨生态服务功能类型

基于中国森林单位面积生态系统服务功能分类特征[37],从服务功能类型角度出发,食物生产和原材料生产是有形服务,而其余的服务功能是无形的服务。本研究借鉴中国森林生态系统单位面积生态服务价值当

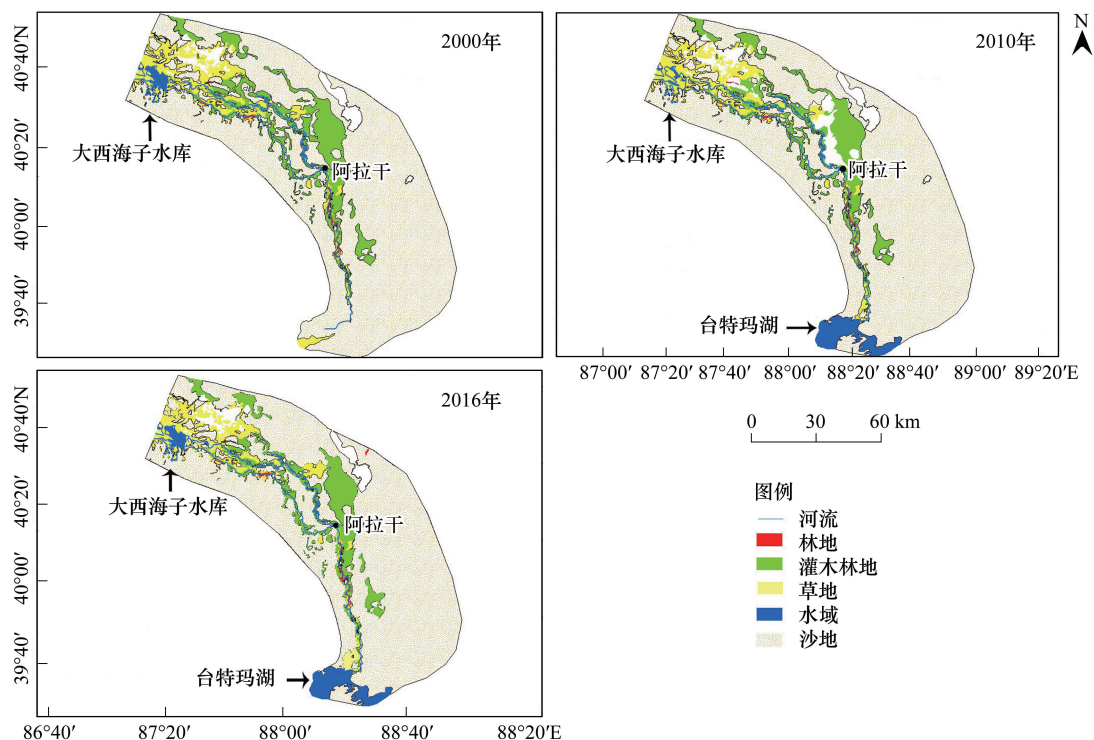


图6 塔里木河下游不同年份植被分类结果

Fig.6 Classification of vegetation in different years in the lower reaches of Tarim river

量<sup>[37]</sup>以及订正公式,可得2016年胡杨的有形服务价值为 $22.74 \times 10^4$ 元,无形服务价值为 $161.53 \times 10^4$ 元,胡杨的无形生态服务价值为有形生态服务价值的7.1倍(图9)。

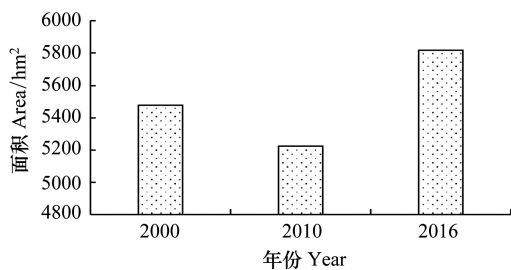


图7 不同年份胡杨林面积

Fig.7 The area of *P. euphratica* in different years

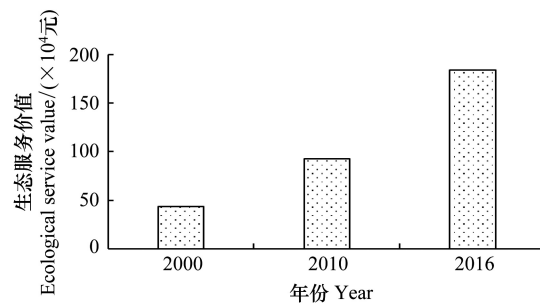


图8 不同年份胡杨生态服务价值

Fig.8 The total ecological service value of *P. euphratica* in different years

## 4 讨论

### 4.1 塔里木河下游胡杨生物量特征

本研究中胡杨的单株生物量是树冠生物量与树干生物量两部分之和。树冠生物量是引用董道瑞等<sup>[29]</sup>的研究成果,通过一级枝生物量估测模型计算而获取,此种方法肯定存在误差。但是胡杨林是国家保护公益林,如果将胡杨树冠全部获取称重并不具有可适性,因此建立树冠生物量估测模型是一条简单易行的解决途径。在本研究中,树干密度也是采用董道瑞等<sup>[29]</sup>所得出的结果,而本结果是基于新疆林业科学研究所提供的基础方法(结合胸径、高度)计算而得,结果具有一定的可信性。此外,考虑胡杨树干的实际生长特点,胡杨的树干并非圆柱形,而是呈圆锥形,即胡杨树干直径在靠近地面处最大,随着高度的增加,树干直径逐渐减小<sup>[38]</sup>。



在其他一些研究中,对胡杨树干体积的计算经常将胡杨树干作为圆柱体,这样误差较大。在本研究中,按照圆锥体体积的计算方法对胡杨的树干体积进行估算,提高了计算结果的准确度。

塔里木河下游的胡杨分布与生态输水密切相关。在离河道近处,地下水埋深较浅,胡杨根系与地下水的接触面积相对较大,水分较为充足,并且漫溢作用较强,植被长势较好,单位面积生物量较大;随着与河距离的增加,地下水埋深加大,植物根系与地下水的接触面积越来越小,水分条件逐渐变差,植被长势逐渐衰弱,单位面积生物量减小<sup>[39]</sup>,这正与本研究的结果相符合。在英苏断面,离河道 300—1400 m 的范围内没有胡杨,这是因为胡杨在荒漠环境中呈斑块状分布<sup>[40]</sup>。塔里木河下游胡杨林十分衰败,老化与退化现象十分严重<sup>[41]</sup>,

2016 年胡杨平均生物量仅为 419.37 kg/hm<sup>2</sup>,远低于我国的东部地区<sup>[42-43]</sup>。在塔里木河下游地区,不仅仅分布有胡杨,还有怪柳、骆驼刺、花花柴、鹿角草等灌木和草本植物,胡杨的生长发育与这些林下植被有密切关系,如胡杨根系提水作用促进灌草的生长,而灌草的物种多样性维持了生态系统的稳定<sup>[44]</sup>等,以后应加强此方面的研究。

#### 4.2 塔里木河下游胡杨生态服务价值评估

干旱区森林生态系统服务价值受到越来越多的学者关注。在塔里木河下游地区,胡杨分布稀疏,生态服务价值也较小,2016 年胡杨单位面积平均生态服务价值仅为 313.55 元/hm<sup>2</sup>,这远远低于全国森林的平均生态服务价值 61130 元/hm<sup>2</sup>。和田河流域也位于中国的内陆干旱区,流域内分布有大片胡杨。杨丽雯等<sup>[45]</sup>得出,在和田河流域,胡杨林的单位面积生态服务价值约为 21105 元/hm<sup>2</sup>,与塔里木河下游胡杨单位面积服务价值差距很大,这主要与胡杨林单位面积株数、生长状况有关。和田河流域单位面积内胡杨分布较多,并且水资源比塔里木河下游丰富<sup>[46]</sup>,胡杨长势较好,这导致了在相似干旱区内不同区域胡杨的平均生态服务价值差距很大。在我国的东部地区,森林单位面积生态服务价值普遍较高,如九华山森林单位面积生态服务价值为 18.87 × 10<sup>4</sup>元/hm<sup>2</sup><sup>[47]</sup>,海南岛尖峰岭地区森林单位面积生态服务价值为 1.49 × 10<sup>4</sup>元/hm<sup>2</sup><sup>[48]</sup>,这都远远高于塔里木河下游地区的胡杨单位面积服务价值。因为影响森林单位面积生态服务价值的因素主要是森林质量状况,而森林质量受到区域气候条件的影响<sup>[49]</sup>。在中国的东部和南部地区,受到太平洋和印度洋季风的影响,海洋湿润气团可以从东部和南部深入到较远的区域,山坡上的森林分布茂密,单位面积生态服务价值高;西北内陆地区,受海洋气团的影响较弱,森林分布较为稀疏,单位面积生态服务价值低。此外,在对森林生态系统服务价值评估的过程中,每个专家所选取的指标有所不同,造成了研究结果的差异<sup>[50-51]</sup>。因此,建立一个系统的、成熟的干旱区森林生态系统服务价值评估指标体系具有重要意义。

#### 4.3 塔里木河下游胡杨生态服务价值评估结果误差分析

在野外取样的过程中,本研究采用每木检尺、实地测量与取样的方式。在理论上,各项实测的数据应该没有什么问题,但是在实际操作的过程中,由于人为因素、仪器影响等因素,计算结果会有一些的误差。但是与机械角规样地实测法、样圆实测法、角规典型选择调查法等方法相比,这种取样的方法精度最高<sup>[52]</sup>,结果最为可信。因此,在以后的研究中应深入分析模型误差的范围、来源及影响因素,提高建模过程中各个环节的精确度。本研究的立题依据是生物量与生态服务价值之间存在线性相关关系,在对生物量进行野外实地调查的基础上,运用生物量对生态系统服务功能价值进行单价订正。然而,生物量的偏差必然会导致生态服务价值的差异<sup>[53]</sup>。因此,在以后的研究中,需要借鉴国内外的研究经验,不断更新测试仪器与测试技术,寻求更为精确

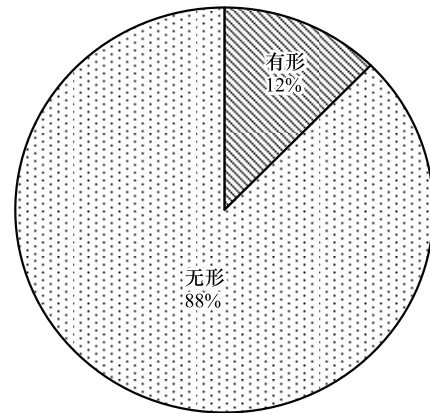


图9 胡杨有形服务价值与无形服务价值所占比例

Fig.9 Proportion of tangible service value and intangible service value of *P. euphratica*

的生物量估算模式,提出适合干旱区的生态服务价值评估方法。在今后的研究中,重点针对以下几个方面开展实施:干旱区森林生态系统服务机制、干旱区生态服务价值评估指标参数的合理性选取以及参数的精度研究、森林生态调节与生态变化过程之间的关系等。另外,塔里木河下游胡杨的无形服务价值为有形服务价值的 7.1 倍,即胡杨最为重要的是其无形服务价值,即间接经济价值。但是现有的国民经济核算体系以国内生产总值为中心,过于注重森林的直接经济价值而忽视其巨大的间接经济价值。这不仅导致森林生产力低下、木材质量下降以及病虫害蔓延等严重后果,而且也会对整个系统的长远发展产生不利影响。因此,应尽快将森林的间接经济价值估算纳入国民经济核算范围,建立绿色国民经济核算体系。

## 5 结论

生态输水主要通过控制地下水埋深来影响胡杨的生长。胡杨主要分布在离河道 0—700 m 范围内水分条件较好的区域,离河道 700 m 以外胡杨分布较少。2000、2010、2016 年胡杨单位面积平均生态服务价值分别为 78.96、177.14、313.55 元/hm<sup>2</sup>,总服务价值分别为 43.24×10<sup>4</sup>、93.00×10<sup>4</sup>、184.27×10<sup>4</sup>元,并且胡杨的无形服务价值为有形服务价值的 7.1 倍左右。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈禹舟, 马克明, 张育新, 张霜, 牛树奎. 北京东灵山森林植物多样性的网络结构特征. 生态学报, 2015, 35(11): 3702-3709.
- [ 2 ] 殷莎, 赵永华, 韩磊, 王耀斌, 蔡健. 秦岭森林生态系统服务价值的时空演变. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3777-3786.
- [ 3 ] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945-958.
- [ 4 ] Hunter M O, Keller M, Victoria D, Morton D C. Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 8385-8399.
- [ 5 ] Shabani N, Sowlati T. Evaluating the impact of uncertainty and variability on the value chain optimization of a forest biomass power plant using Monte Carlo Simulation. *International Journal of Green Energy*, 2016, 13(7): 631-641.
- [ 6 ] Al-Assaf A, Nawash O, Omari M. Identifying forest ecosystem services through socio-ecological bundles: a case study from northern Jordan. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2014, 21(4): 314-321.
- [ 7 ] Miller W L, Wadsworth H A. Improving measures of economic development. *American Journal of Agricultural Economics*, 1967, 49(5): 1193-1197.
- [ 8 ] Clepper H. Chiefs of the Forest Service. *Journal of Forestry*, 1961, 59(11): 795-803.
- [ 9 ] Tobias D, Mendelsohn R. Valuing ecotourism in a tropical rain-forest reserve. *Ambio*, 1991, 20(2): 91-93.
- [ 10 ] Maille P, Mendelsohn R. Valuing ecotourism in Madagascar. *Journal of Environmental Management*, 1993, 38(3): 213-218.
- [ 11 ] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [ 12 ] 赵煜, 赵千钧, 崔胜辉, 吝涛, 尹锴. 城市森林生态服务价值评估研究进展. 生态学报, 2009, 29(12): 6723-6732.
- [ 13 ] 姜翠红, 李广泳, 程滔, 陈占涛, 张浩然. 青海湖流域生态服务价值时空格局变化及其影响因子研究. 资源科学, 2016, 38(8): 1572-1584.
- [ 14 ] 郑江坤, 余新晓, 夏兵, 信忠保, 贾国栋, Zheng L K. 潮白河流域林地转化及森林生态服务价值动态分析. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 308-314.
- [ 15 ] 樊敏, 李富程, 郭亚琳, 王青. 退耕还林对岷江上游高山聚落区生态服务价值变化的影响. 山地学报, 2016, 34(3): 356-365.
- [ 16 ] 关文彬, 王自力, 陈建成, 张秋岩, 汪西林. 贡嘎山地区森林生态系统服务功能价值评估. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 80-84.
- [ 17 ] 刘勇, 李晋昌, 杨永刚. 基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估. 生态学报, 2012, 32(9): 2699-2706.
- [ 18 ] 王海珍, 韩路, 徐雅丽, 牛建龙, 于军. 干旱胁迫下胡杨光合作用过程模拟与模型比较. 生态学报, 2017, 37(7): 2315-2324.
- [ 19 ] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 凌红波, 张沛. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(8): 864-876.
- [ 20 ] 朱绪超, 袁国富, 邵明安, 易小波, 杜涛. 塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征. 植物生态学报, 2015, 39(11): 1053-1061.
- [ 21 ] 陈亚鹏, 陈亚宁, 徐长春, 李卫红, 付爱红. 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响. 生态学报, 2011, 31(2): 344-353.
- [ 22 ] 白玉锋, 陈超群, 徐海量, 张广朋, 张沛, 凌红波. 塔里木河下游荒漠植被地上生物量空间分布与地下水埋深关系. 林业科学, 2016, 52(11): 1-10.
- [ 23 ] 徐海量, 宋郁东, 王强, 艾合买提. 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响. 植物生态学报, 2004, 28(3): 400-405.

- [24] 塔依尔江·艾山, 玉米提·哈力克, 艾尔肯·艾白不拉, Cvffka B, Opp C. 塔里木河下游阿拉干断面胡杨林空间分布特征及其影响因素. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 156-160.
- [25] 李吉玖, 徐海量, 张青青, 杨红梅, 牛俊勇, 赵新风, 库尔班·克依木. 塔里木河下游荒漠河岸林不同退化区胡杨种群结构和空间分布格局研究. 中国沙漠, 2009, 29(5): 897-904.
- [26] 王金山, 哈力克·玉米提, Cvffka B, 吾斯曼·库尔班, 彭树宏. 塔里木河下游胡杨林胸径结构及林木分布特征. 植物学通报, 2008, 25(6): 728-733.
- [27] 吴俊侠, 张希明, 邓潮州, 刘国军, 阎海龙. 塔里木河下游胡杨种群特征与动态分析. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 164-169.
- [28] 王希义, 徐海量, 潘存德, 凌红波, 苑焯焯. 塔里木河下游珍稀濒危植物胡杨的种群生存特征研究. 西北植物学报, 2017, 37(11): 2282-2289.
- [29] 董道瑞, 李霞, 万红梅, 林海军. 塔里木河下游胡杨(*Populus euphratica*)地上生物量估测. 中国沙漠, 2013, 33(3): 724-730.
- [30] 李江凤, 袁玉江, 由希尧. 树木年轮水文学研究与应用. 北京: 科学出版社, 2000.
- [31] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [32] 唐守正, 张会儒, 胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究. 林业科学, 2000, 36(S1): 19-27.
- [33] 李海涛, 杨柳春, 严茂超, 董孝斌, 胡聃, 张照喜, 杜化堂. 鸡公山自然保护区森林生物量动态模拟及其宏观价值评估. 资源科学, 2005, 27(4): 154-159.
- [34] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [35] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 陈丽华, 饶良懿, 陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [36] 冯继广, 丁陆彬, 王景升, 姚萍萍, 姚帅臣, 王志凯. 基于案例的中国森林生态系统服务功能评价. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1375-1382.
- [37] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [38] 王希义, 徐海量, 潘存德, 凌红波. 胡杨单株蓄积量与生物量关系模型研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 175-179.
- [39] 董道瑞. 塔里木河下游胡杨、柽柳群落地上生物量遥感估测[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.
- [40] 白元, 徐海量, 赵新风, 傅彦仪, 王希义, 杜清. 河水漫溢对胡杨(*Populus euphratica*)分布格局的影响. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1356-1362.
- [41] 张绘芳, 李霞, 王建刚, 杨艳静. 塔里木河下游植物群落结构特征分析. 生态环境, 2007, 16(4): 1219-1224.
- [42] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究. 植物生态学报, 2000, 24(2): 191-196.
- [43] 张茂震, 王广兴, 刘安兴. 基于森林资源连续清查资料估算的浙江省森林生物量及生产力. 林业科学, 2009, 45(9): 13-17.
- [44] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红, 郭斌, 赵锐锋. 胡杨根系水力提升作用的证据及其生态学意义. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1125-1131.
- [45] 杨丽雯, 何秉宇, 黄培祐, 努尔巴依. 和田河流域天然胡杨林的生态服务价值评估. 生态学报, 2006, 26(3): 681-689.
- [46] 喻钰. 和田河流域近期耗水研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [47] 张乐勤, 荣慧芳, 许杨, 许信旺. 九华山森林生态系统生态服务价值评估. 山地学报, 2011, 29(3): 291-298.
- [48] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484.
- [49] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153.
- [50] 王蕾, 罗磊, 刘鹏, 胡东宇, 高亚琪. 塔里木河中下游水分干扰对胡杨林群落物种多样性的影响. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1275-1281.
- [51] 康文星, 吴耀兴, 何介南, 郭清和, 王卫文. 城市森林生态系统服务价值指标体系与评价方法. 林业科学, 2008, 44(12): 129-134.
- [52] 李莹. 森林生态价值核算及生态补偿研究——以牡丹江市为例[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [53] 梁倍, 邸利, 赵传燕, 彭守璋, 彭焕华, 王超. 祁连山天老池流域灌丛地上生物量空间分布. 应用生态学报, 2014, 25(2): 367-373.