

DOI: 10.5846/stxb201504280881

张宏锋,袁素芬.东江流域森林水源涵养功能空间格局评价.生态学报,2016,36(24): - .

Zhang H F, Yuan S F. Evaluation of the spatial patterns of the water retention function of the forest ecosystem in the Dongjiang River Watershed. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

东江流域森林水源涵养功能空间格局评价

张宏锋^{1,*}, 袁素芬²

1 广东省环境科学研究院, 广州 510045

2 广东环境保护工程职业学院, 佛山 528216

摘要:东江流域森林水源涵养功能对于保障流域可持续发展具有重要作用。应用 InVEST 模型,结合东江流域土地覆盖分类数据、气候数据、土壤数据评估了东江流域森林水源涵养功能的空间分布。结果表明:东江流域森林生态系统水源涵养总量为 $47.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,水源涵养功能最高为 572.6 mm,平均水源涵养功能为 204.15 mm。东江流域森林水源涵养功能在空间上呈现出不同的分布特征,流域内森林水源涵养功能随海拔升高呈现先上升后降低的趋势,在海拔 900—1200 m 范围,水源涵养功能平均值达到最大值 270 mm;流域内森林水源涵养功能随坡度升高呈增加趋势,在坡度大于 50° 的区域,森林水源涵养功能平均值增加到 327.2 mm,高于流域平均水平 60%。流域水源涵养功能呈现中游>下游>上游的空间格局,流域上、中、下游地区的水源涵养总量占流域的比例分别为 11%、72%、17%。

关键词:森林生态系统;水源涵养功能;空间格局;东江流域

Evaluation of the spatial patterns of the water retention function of the forest ecosystem in the Dongjiang River Watershed

ZHANG Hongfeng^{1,*}, YUAN Sufen²

1 Guangdong Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China

2 Guangdong Vocational College of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China

Abstract: The water retention function of the forest ecosystem refers to the redistribution of precipitation through the canopy, litter layer, and the layer of soil in the forest ecosystem, which can effectively affect water retention and runoff regulation. This function is influenced by various factors including the types of forest ecosystem, climatic conditions, soil physicochemical properties, and topography, and thus shows significant spatial heterogeneity. The Dongjiang River, one of the tributaries of the Pearl River, is the main drinking water resource serving more than 40 million residents from the Hong Kong Special Administrative Region and the cities of the Guangdong province including Heyuan, Huizhou, Dongguan, Guangzhou, and Shenzhen. In recent years, with rapid population growth and economic development, the eco-environment of the Dongjiang River Watershed has been severely disturbed, which consequently has severely affected the water retention function of the forest ecosystem. In the present study, the spatial distribution of the water retention function of the forest ecosystem in the Dongjiang River Watershed was evaluated based on data on the land cover, climate, and soil, using the InVEST (Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs tool) model. The results showed that the total water retention in the forest ecosystem of the Dongjiang River Watershed was $47.29 \times 10^8 \text{ m}^3$, with a peak value in the water retention function of 572.6 mm and a mean value of 204.15 mm. The water retention function of the forest ecosystem showed differences in spatial pattern with changes in elevation and slope. The water retention function increased initially, and then

基金项目:跨省重点流域生态补偿与经济责任机制示范研究(2013ZX07603-003-003)

收稿日期:2015-04-28; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghf77925@sohu.com

decreased with increasing elevation, with a peak mean value of 270 mm at an elevation of 900—1200 m. The water retention function of the forest ecosystem also increased with increasing slope, and reached 327.2 mm at a slope of 50, which was more than 60% of the average water retention function. At the watershed scale, the water retention function of the forest ecosystem in the middle reaches comprised the most important group, representing of 72% of total retention volume, followed by the lower reaches (17%) and upper reaches (11%). In the present study, analysis of the water retention function of the forest ecosystem in the Dongjiang River Watershed determined the boundary objects of ecological compensation, and defined the importance of ecosystem services in different geographical units. In addition, the priorities of ecological compensation were determined according to the level of importance of the ecosystem services in different geographical units, thereby improving the efficiency of ecological compensation and promoting the sustainable development of the watershed.

Key Words: forest ecosystem; water retention function; spatial pattern; the Dongjiang River Watershed

森林的水源涵养功能是指森林生态系统通过林冠层、枯落物层和土壤层对降水再分配,从而有效涵养水分、调节径流的功能^[1-2]。随着全球水资源需求量的不断增加以及水环境的急剧恶化,水资源紧缺已成为世人所共同关注的全球性问题^[3],由于森林生态系统与水资源的关系密切^[4],森林的水源涵养功能引起了人们的高度重视^[5-6],森林水源涵养功能评估成为当前生态服务功能研究的热点问题^[7-9]。森林水源涵养能力受生态系统类型、气候因子、土壤理化性质、地形地貌等因素的影响,在空间上存在较大的异质性。众多学者对森林等生态系统的水源涵养功能进行了深入研究,但这些研究对不同森林生态系统进行高度的概化,缺少对森林生态系统水源涵养功能空间格局的研究^[10-12]。如何准确地评价森林水源涵养功能在空间上的分布一直是水源涵养功能研究中的热点^[13-14]。

近年来,许多学者开始通过建立模型来研究生态系统功能及其变化过程,如 GUMBO、InVEST 模型等^[15-16]。生态系统服务与权衡综合评价模型(Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs tool, InVEST)由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发,是量化和价值化生态系统服务的综合模型,该模型目前在美国夏威夷群岛、印度尼西亚苏门答腊、坦桑尼亚东部弧形山脉区、中国等区域进行了应用,并取得了良好的模拟效果^[17-20]。

东江是珠江流域三大水系之一,是香港特别行政区及广东省河源、惠州、东莞、广州、深圳等城市 4000 多万居民的主要饮水资源,关系着东江流域和珠江三角洲区域的经济发展和香港特别行政区的繁荣稳定。近年来,随着流域人口的急剧增加和经济的高速发展,流域生态环境受到严重扰动,对森林水源涵养功能造成较大影响。本文基于 InVEST 模型,分析了东江流域森林水源涵养功能的空间格局,旨在为东江流域生态保护与建设提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

东江是珠江的主要河流之一,地理范围为 113.32°—115.53°E, 22.32°—25.11°N,流域面积约 32749 km²,东西长 218.2 km,南北宽 306.1 km。东江发源于江西省寻乌县梗髻钵山,源头至龙川县合河坝为东江上游,称寻乌江;从合河坝至博罗县观音阁,是东江中游;观音阁以下为东江下游。东江干流流经广东龙川、河源、紫金、惠阳、博罗、东莞等县市,在东莞石龙镇流入珠江三角洲。东江干流由东北向西南流,河道长度至石龙为 520 km,至狮子洋为 562 km,河道平均坡降 0.39%。流域内多年平均年降水量为 1750 mm,多年平均水面年蒸发量为 1200 mm,年平均气温为 20—22℃。流域范围内地势东北部高,西南部低。高程 50—500 m 的丘陵及低山区约占流域总面积的 78.1%,高程 50 m 以下的平原地区约占 14.4%,高程 500 m 以上的山区约占 7.5%^[21](图 1)。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}}$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x}$$

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} \times ET_0}{P_x}$$

式中, WR 为多年平均水源涵养量 (mm); TI 为地形指数; K_{sat} 为土壤饱和导水率; $TravTime$ 为径流运动时间; $Drainge\ area$ 为流域汇流面积; $Soil\ depth$ 为土壤深度; $Percent\ slope$ 为百分比坡度; Vel_coef 为流速系数; Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年产水量; AET_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散; P_x 为栅格单元 x 的降水量; ω_x 为自然气候-土壤性质的非物理参数; R_{xj} 为 Bydyko 干燥指数; Z 为 Zhang 系数; AWC_x 为栅格单元 x 的土壤有效含水量, 由土壤深度和理化性质决定; K_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的植被蒸散系数; ET_0 为参考作物蒸散。

2.2 模型输入与参数确定

模型输入变量包括: 降水 (P_x)、土壤有效含水量 (AWC_x)、参考作物蒸散 (ET_0)、土壤深度 ($Soil\ depth$)、土壤饱和导水率 (K_{sat})、流速系数 (Vel_coef)、流域汇流面积 ($Drainge\ area$)、坡度 ($percent\ slope$)、坡长 ($slope\ length$); 需要确定的参数包括: Zhang 系数 (Z)、植被蒸散系数 (K_{xj}) 等。降水数据根据东江流域 19 个气象站点多年降水数据插值获得; 土壤有效含水量根据 Zhou 等^[26] 的计算结果; 参考作物蒸散由 FAO56 修正的 Penman-Monteith 公式计算得到^[16]; 土壤深度数据根据《广东土壤》、《江西土壤》土壤类型数据空间栅格化获得^[22-23]; 土壤饱和导水率采用澳大利亚威尔士大学开发的 NeuroTheta 软件计算; 流域汇流面积、坡度、坡长通过 DEM 提取; 流速系数以 USDA-NRCS 提供的国家工程手册上的流速-坡度-景观表格为基准, 乘以 1000 得到; 植物蒸散系数 (K_{xj}) 受到地表覆被的影响, 因此, 本文根据叶面积指数 (LAI) 与植物蒸散系数之间的对应关系^[16], 应用叶面积指数估算不同植被覆盖的植物蒸散系数 (K_{xj})。Zhang 系数是表征降水特征的常数, 模型默认值为 9.433^[24]。

3 结果分析

3.1 森林生态系统特征分析

3.1.1 森林空间分布

东江流域森林面积为 23192.4 km², 占流域总面积的 70%。东江流域森林主要类型包括常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、常绿阔叶灌木林等 4 种类型, 其中常绿阔叶林、常绿针叶林比例较大, 分别占森林总面积的 51.6%、38.1% (图 2)。东江流域各区县中, 森林面积比例较高的有新丰县、和平县、紫金县、定南县、龙川县等区县, 森林面积比例都在 85% 以上, 主要分布在流域上游和中游; 森林面积比例较低的区县有龙岗区、东莞市、宝安区, 都在 30% 以下, 主要分布在流域下游 (图 3)。

3.1.2 森林叶面积指数空间分布

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 通常定义为单位地表面积上绿叶总面积的一半^[27]。作为表征冠层结构

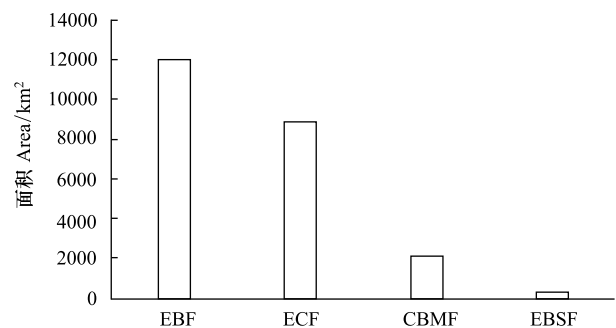


图 2 东江流域森林生态系统类型

Fig. 2 The forest ecosystem types in the Dongjiang River Watershed

EBF: 常绿阔叶林 evergreen broad-leaf forest; ECF: 常绿针叶林 evergreen coniferous forest; CBMF: 针阔混交林 coniferous and broadleaved mixed forest; EBSF: 常绿阔叶灌木林 Evergreen broad-leaved shrub forest

的关键参数,它影响植被光合、呼吸、蒸腾、降水截留、能量交换等诸多生态过程^[28-29]。东江流域森林 LAI 平均值为 2.36,较高的区县有东源县、源城区、紫金县、惠东县、龙门县等区县,LAI 平均值都在 2.5 以上;LAI 较低的区域主要分布在增城区、龙岗区、东莞市、宝安区等区县,LAI 平均值都在 1.5 以下。位于东江源区的安远县、寻乌县、定南县三县的 LAI 指数在 2.0—2.18 之间(图 3)。

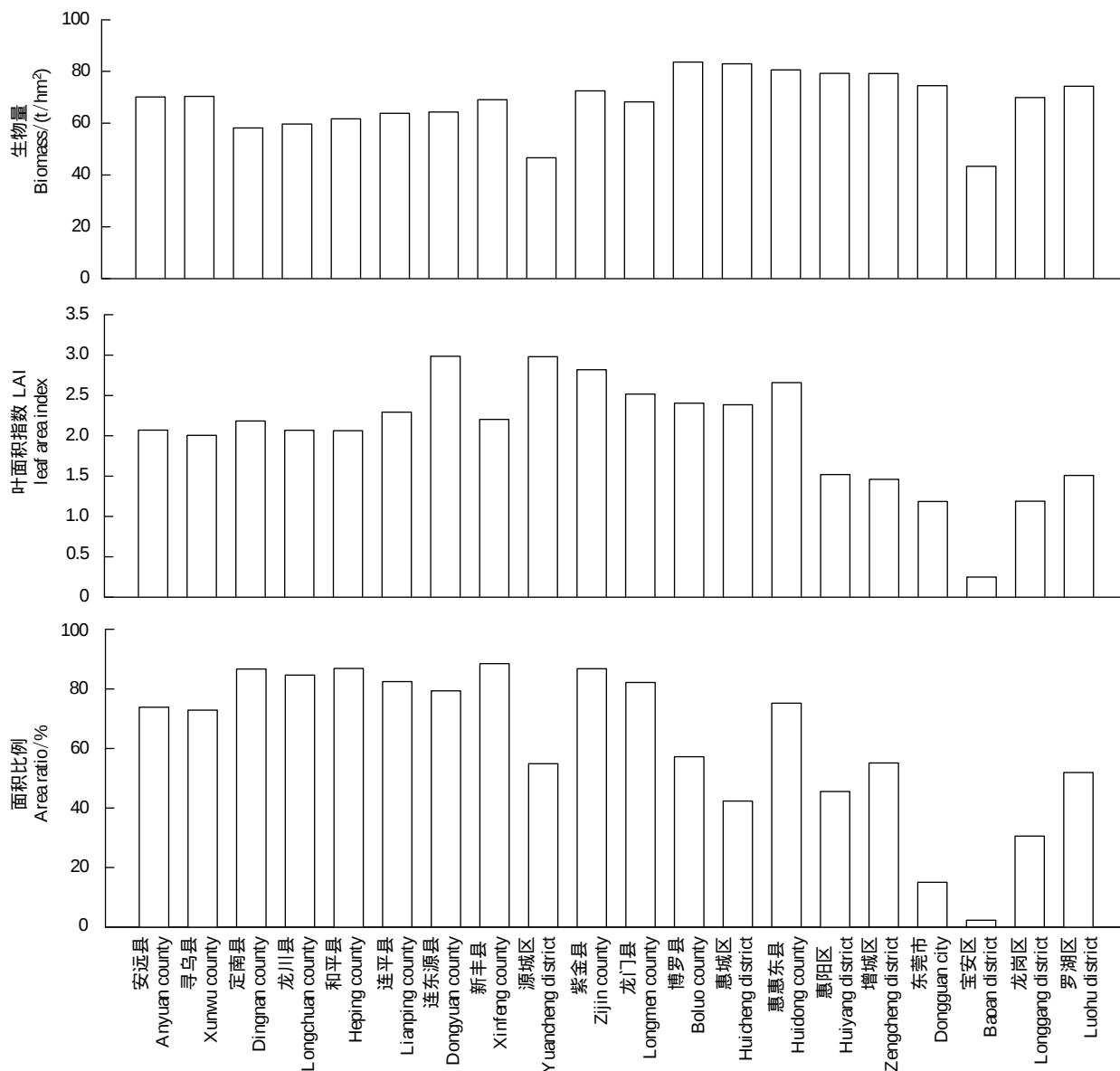


图 3 东江流域各区县森林生态系统特征变化

Fig.3 The ecosystem characteristics of forest in different counties of the Dongjiang River Watershed

3.1.3 森林生物量空间分布

东江流域内森林生物量总量为 1.59×10^8 t, 平均单位面积生物量为 68.99 t/hm^2 。从生物量空间分布来看,生物量较高的地区主要分布在惠城区、博罗县等中游地区,单位面积生物量都在 80 t/hm^2 以上;生物量较低的地区主要分布在源城区、宝安区,生物量都在 50 t/hm^2 以下(图 3)。东江流域生物量相对较低,明显低于我国亚热带的平均水平(阔叶林 149.33 t/hm^2 , 针阔混交林 151.21 t/hm^2 , 杉木林 131.52 t/hm^2 , 毛竹林 87 t/hm^2)^[30]。东江流域森林生物量较低的主要原因是森林植被乔木层年龄较小,大部分森林处于幼林龄时期,林分结构简单,林地储蓄生物量较小。

3.2 森林水源涵养功能分析

3.2.1 不同海拔水源涵养功能

东江流域海拔介于-52 m 至 1486 m 之间。流域内森林水源涵养功能随海拔升高呈现先上升后降低的趋势,在海拔 300 m 以下的区域,森林水源涵养功能为 182.4 mm,在海拔 900—1200 m 范围,水源涵养功能增加到 270 mm,在海拔 1200 m 以上区域的水源涵养功能下降到 241.1 mm(图 4)。

3.2.2 不同坡度水源涵养功能

东江流域内坡度介于 0°—55°之间。流域内森林水源涵养功能随坡度升高呈增加趋势,在坡度小于 5°的区域,森林水源涵养功能为 145.75 mm,低于流域平均水平 29%;在坡度大于 50°的区域,森林水源涵养功能增加到 327.2 mm,高于流域平均水平 60%(图 5)。

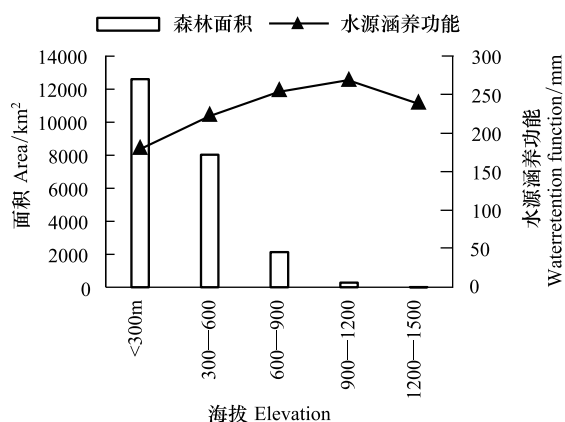


图 4 东江流域不同海拔森林面积和水源涵养功能变化

Fig.4 The changes of forest area and water retention function in different elevation in the Dongjiang River Watershed

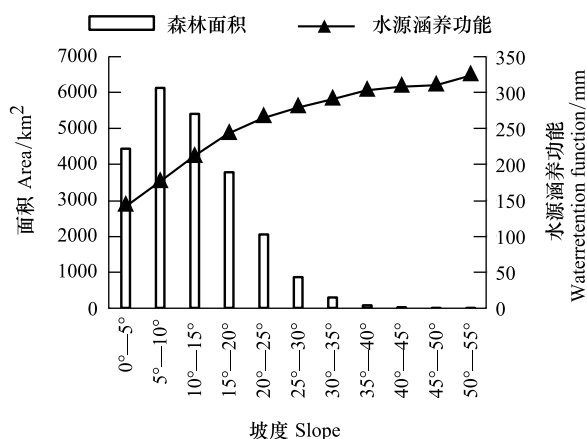


图 5 东江流域不同坡度森林面积和水源涵养功能变化

Fig.5 The changes of forest area and water retention function in different slope in the Dongjiang River

3.2.3 不同地区水源涵养功能

东江流域森林水源涵养量为 $47.29 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均水源涵养功能为 204.15 mm。从流域内各区县平均水源涵养功能来看,水源涵养功能较高的地区主要分布在流域中游的新丰、龙门、博罗、增城以及下游的惠东、罗湖等区县,平均水源涵养功能都在 220 mm 以上。水源涵养功能较低的地区主要分布在下游的宝安、龙岗,其中宝安区水源涵养功能仅为 128.6 mm。位于东江上游的安远、寻乌、定南三县的水源涵养功能介于 174—204 mm 之间,其中定南县水源涵养功能较低,平均水源涵养功能为 174 mm。从水源涵养总量来看,流域水源涵养功能呈现中游>下游>上游的空间格局,流域上、中、下游地区的水源涵养总量占流域的比例分别为 11%、72%、17%(图 6)。

4 结论与讨论

本研究应用 InVEST 模型对东江流域森林生态系统水源涵养功能进行了评价。根据测算,东江流域水源涵养量为 $47.29 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均涵养功能为 204.15 mm。东江流域水源涵养功能在空间上呈现出不同的分布特征,流域内森林水源涵养功能随海拔升高呈现先上升后降低的趋势,在海拔 900—1200 m 达到最大值;水源涵养功能随坡度升高呈增加趋势。在区域分布上,流域水源涵养功能呈现中游>下游>上游的空间格局,流域中游水源涵养量占整个流域水源涵养量的 72%。

东江流域受人类活动扰动强度大,导致森林水源涵养功能低下。自明清以来,东江流域森林受农业发展、薪材采伐及采矿等活动影响,森林面积不断减少,再加上 1958 年、1968 年、1978 年三次大砍伐,东江流域已很

- [10] 朱继鹏, 王芳, 高甲荣. 吉县蔡家川流域不同森林植被的林地水源涵养功能. 水土保持研究, 2006, 13(1): 111-113.
- [11] 黄进, 张金池, 陶宝先. 江宁小流域主要森林类型水源涵养功能研究. 水土保持学报, 2009, 23(1): 182-186.
- [12] 陈引珍, 程金花, 张洪江, 李猛. 缙云山几种林分水源涵养和保土功能评价. 水土保持学报, 2009, 23(2): 66-70.
- [13] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
- [14] 王纪伟, 刘康, 瓮耐义. 基于 In-VEST 模型的汉江上游森林生态系统水源涵养服务功能研究. 水土保持通报, 2014, 34(5): 213-217.
- [15] Boumans R, Costanza R, Farley J, Wilson M A, Portela R, Rotmans J, Villa F, Grasso M. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the gumbo model. Ecological Economics, 2002, 41(3): 529-560.
- [16] Tallis, H T, Ricketts T, Guerry, A D, Wood S A, Sharp R. InVEST 2.5.3 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project. 2013.
- [17] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [18] Land-Use Planning in Central Sumatra. [2014-12-15]. <http://www.naturalcapitalproject.org/where/sumatra.html>.
- [19] Ecosystem Services in the Eastern Arc Mountains of Tanzania. [2014-12-15]. <http://www.naturalcapitalproject.org/where/tanzania.html>.
- [20] Zheng H, Robinson B E, Liang Y C, Polasky S, Ma D C, Wang F C, Ruckelshaus M, Ouyang Z Y, Daily G C. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(41): 16681-16686.
- [21] 彭资, 谷成燕, 刘智勇, 林雯, 周平. 东江流域 1989-2009 年土地利用变化对生态承载力的影响. 植物生态学报, 2014, 38(7): 675-686.
- [22] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤. 北京: 科学出版社, 1993.
- [23] 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室. 江西土壤. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.
- [24] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [25] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [26] Zhou W Z, Liu G H, Pan J J, Feng X F. Distribution of available soil water capacity in China. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [27] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves. Plant, Cell and Environment, 1992, 15(4): 421-429.
- [28] Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, Rotenberg E, Grünzweig J, Karnieli A, Berliner P, Yakir D. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(5): 565-574.
- [29] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [30] 王登峰, 薛春泉, 刘志武, 林俊钦, 叶金盛, 郑镜明. 广东省森林生态状况监测报告(2002 年). 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [31] 管东生. 华南亚热带不同演替阶段植被类型的初级生产力和养分. 生态学杂志, 1996, 15(3): 11-14.
- [32] 郭声波, 吴理清. 明清广东东江流域森林变迁及其成因. 江汉论坛, 2011, (8): 81-86.
- [33] 薛冰妮, 黄怡. 广东要建全国绿色生态第一省. (2015-07-08). [2013-08-30]. http://epaper.oeeee.com/epaper/A/html/2013-08/30/content_2526197.htm?div=-1.
- [34] 姜杰, 战国强, 邓鉴锋. 基于生态文明背景的广东森林资源现状分析及经营策略研究. 安徽农业科学, 2015, 43(8): 115-117, 125-125.
- [35] 李冬, 杨馥宁, 王青春. 东江源头森林资源现状与保护对策. 华东森林经理, 2004, 18(4): 1-4.
- [36] 闫俊华, 屈家树, 韦琴. 发展广东林业改善水资源环境. 广东林业科技, 2000, 16(2): 43-47.
- [37] 张秉刚, 卓慕宁, 骆伯胜, 邓邦权. 广东丘陵土壤水热资源及其开发利用. 广州: 广东科技出版社, 1994.
- [38] 戴其文. 生态补偿对象的空间选择研究——以甘南藏族自治州草地生态系统的水源涵养服务为例. 自然资源学报, 2010, 25(3): 415-425.
- [39] 欧阳志云, 郑华, 岳平. 建立我国生态补偿机制的思路与措施. 生态学报, 2013, 33(3): 686-692.
- [40] 赵雪雁. 生态补偿效率研究综述. 生态学报, 2012, 32(6): 1960-1969.