

Measuring and Mapping the Impact of Land Use and Land Cover Change on the Hydropower Production

—A Case Study of Jiulong River in Fujian Province

Zhumei Huang, Benrong Peng*

College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen Fujian
Email: zmhuang_0830@163.com, *brpeng@xmu.edu.cn

Received: May 29th, 2017; accepted: Jun. 12th, 2017; published: Jun. 15th, 2017

Abstract

As the most widely used form of renewable energy in the world, the hydropower production is very sensitive to the land use and cover change (LUCC). Measuring and mapping changes in the quantity and value of hydropower production are the basis of water resource management and watershed spatial planning. This paper evaluated the impacts of LUCC on the hydropower production in Jiulong River watershed (JRW) employing the reservoir hydropower production and valuation model of InVEST. The results show that the water yield increased by 0.66% from 2000 to 2010 in JRW since LUCC is mainly converted from arable land and forest with higher evapotranspiration to construction land with lower evapotranspiration. However, the annual water supply for power generation decreased by 8.46%, due to the water consumption in arable land and construction land are higher than other land cover type, which resulted in 1.22×10^8 kwh decrease of the annual hydropower production and 4.0×10^7 yuan decrease of net present value separately. The reduction of hydropower production and its value are mainly located in urban subwatersheds whose land use cover change significantly by transforming the forest and arable land to the construction land. The model error is in the range of 6% and 5% of the actual water production and power generation respectively, and the model has high reliability. The results also show that the volume of water yield decreased from upstream to downstream, and the hydropower production capacity of subwatersheds in upstream is much higher than that of the downstream. The subwatersheds in the upstream with higher water yield are critical to the water supply services in the JRW, which should be conserved when developing the spatial planning and other social-economic planning in the watershed.

Keywords

Hydropower Production, InVEST, Land Use/Land Cover, Jiulong River Watershed

作者简介: 黄珠美(1992-), 女, 福建漳浦人, 在读硕士, 主要研究方向为环境经济学方向。
*通讯作者。

土地利用与覆被变化对流域水电生产影响研究

—福建省九龙江流域为例

黄珠美, 彭本荣*

厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门

Email: zmhuang_0830@163.com, *brpeng@xmu.edu.cn

收稿日期: 2017年5月29日; 录用日期: 2017年6月12日; 发布日期: 2017年6月15日

摘要

水电是全球利用最广泛的可更新能源, 其生产能力对土地利用/覆被的变化非常敏感。研究土地利用/覆被变化与流域水电生产的数量、价值及其空间分布的关系是流域水资源规划和管理的基础。本论文应用InVEST模型评估九龙江流域土地利用/覆被变化对水电生产数量及其价值的影响。结果表明: 2000~2010年间, 九龙江流域内, 土地利用/覆被主要由蒸散量较大的耕地和林地转化为蒸散量较小的建设用地, 产水量增加了0.66%。但由于耕地和建设用地的耗水量较其他土地利用/覆被类型大, 水电生产的供水量却降低了8.46%, 导致流域年均水电生产量减少1.22亿kwh, 年均利润减少0.40亿元, 减少幅度分别达到5.56%和6.69%。流域内水电生产数量减少主要是由土地利用/覆被变化大的城市子流域发电量减少引起的。模型验证结果显示, 模型结果与实际产水量、发电量的误差分别在6%和5%以内, 模型具有很高的可靠性。研究同时显示, 九龙江流域产水量由上游向下游递减, 上游子流域单位面积和万吨供水量水电生产的潜力最高, 对流域水电生产的贡献最大, 因此上游子流域的保护对流域水供给服务和水电服务能力的保障非常关键。

关键词

水电生产, InVEST模型, 土地利用/覆被变化, 九龙江流域

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生态系统提供的各种服务是人类赖以生存、发展和繁荣的基础[1] [2]。流域生态系统提供的水供给服务可以在很多方面为人类福利作出贡献, 其中包括用于水力发电的水力资源。开发水力资源获得的水电是最广泛应用的更新能源, 约占全世界能源生产总量的 20% [3]。水电在促进国民经济发展的同时, 对应对气候变化、节能减排也具有重要意义。但是水电生产能力对土地利用/覆被变化非常敏感。土地利用/覆被变化会改变水文循环, 影响蒸散、渗透和水分截留的模式, 引起可用于水电生产的水量及其时空分布的变化, 从而对水电生产的数量(以发电量表示)和价值(以水电生产利润表示)产生影响[4]。

学术界关于流域水电生产与相关的生态系统服务的研究大多侧重于水资源价值研究[5] [6] [7], 以及水力资源开发对流域生态系统服务的影响[8] [9] [10] [11]; 一些学者通过一般均衡模型评价水电站或者水电枢纽对区域国民经济的影响[12] [13] [14]。这些研究对流域水电开发与管理具有重要意义。但是在流域尺度系统评估不同区

域、不同景观类型对水电生产重要性的研究，以及土地利用/覆被变化对水电生产影响的研究还少见报道。而这些研究是气候变化背景下流域空间规划及土地利用/覆被的管理所必需的。

水力发电在福建省能源生产中占有重要地位，2000年~2014年，水电在一次能源生产总量中所占比例达到40% [15]，远远高于全国平均水平。九龙江位于福建省南部，是福建省的第二大河流，由北溪、西溪、南溪三条主要支流组成(见图1)。流域范围包括龙岩和漳州的10个县市，面积 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域多年平均降水量在1400~1800 mm之间，水电资源丰富，已建和在建的水电工程104座，总装机容量达62.92万千瓦，年发电能力24.61亿千瓦时[16]。但是由于经济发展、人口增加和城市化加快，流域土地利用/覆被发生了巨大的变化，严重影响流域水电生产能力。本论文利用InVEST模型中的水库水电生产模型评估九龙江流域10年来土地利用/覆被变化对产水量、水电生产数量及其价值的影响，为九龙江流域的空间规划和土地利用/覆被的管理提供决策的参考依据。

2. 方法和数据

2.1. 方法和模型

InVEST模型(The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool, InVEST)，是斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)和世界野生生物基金会(WWF)联合资助的自然资本项目(Natural Capital)，开发用于生态系统服务价值评估和权衡(trade-off)的工具。该模型基于GIS平台，对生态系统服务及其价值进行量化并以地图的形式表现出来[17]，使自然资本价值更为容易地纳入到人类开发和保护的决策之中[3]。InVEST模型中包括用于评估不同生态系统服务及其价值的很多子模型[3] [17]。其中水库水电生产模型(Reservoir hydropower production)用于评估流域水电生产数量、价值及其空间分布。

水电生产模型中的水平衡概念性框架如图2所示。在某一土地利用/覆被类型的网格上，降水和径流扣除蒸发、蒸腾和补充地下水后，形成产水量(Water yield)；产水量扣除消耗性用水(consumptive water use)后，到达水库水电站用于发电。基于此，水电生产模型包括产水量、水消耗(水稀缺)和水电产量和价值评估3个子模块。为了刻画影响产水量的关键影响因子(如土壤类型、降水、植被类型)的差异性，产水量模型在网格的尺度(pixel-scale)上进行计算。通过加和计算，该模型不仅可以评估全流域年均发电量和价值，而且可以识别出流域每一部分的景观类型或者子流域对发电量及其价值的贡献。必须指出的是，为了计算方便，该模型做了很多的简化，如没有考虑地表水和地下水的相互作用，也没有考虑水供给的时间维度，并且假设水电的价格是静态的等。

2.1.1. 产水量模型(Water yield)

流域的产水量受到多因素的影响，包括流域的降水，蒸发，土地利用/覆盖类型、土壤渗透和植被蒸腾等。产水量模型在栅格尺度上计算各个栅格的产水量，各栅格的产水量是降水量与实际蒸散量之差。计算公式为[3]：

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) P(x) \quad (1)$$

式中： $Y(x)$ 为栅格 x 中的产水量； $AET(x)$ 为栅格 x 的年实际蒸散量； $P(x)$ 是栅格 x 的年均降雨量； $\frac{AET(x)}{P(x)}$ 是蒸散量占降水量的比例。

对于有植被覆盖的栅格，根据Budyko表达式[18] [19]来计算 $\frac{AET(x)}{P(x)}$ ：

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^{\omega_x}\right]^{\frac{1}{\omega_x}} \quad (2)$$

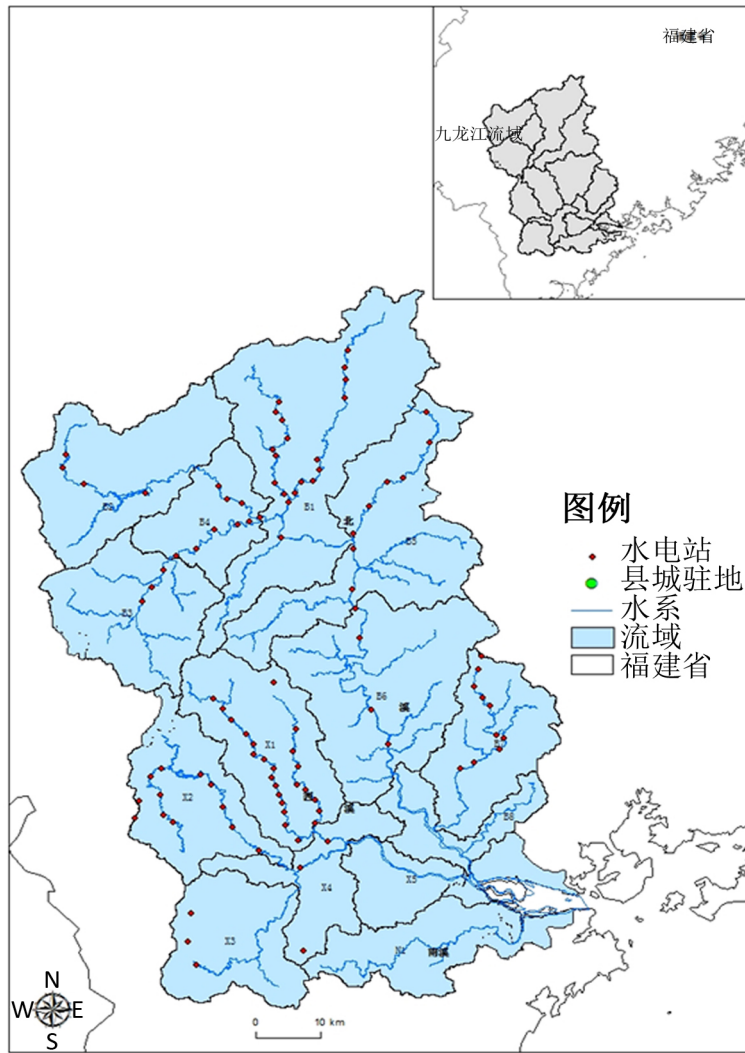


Figure 1. Location of the study area and sub-watersheds

图 1. 研究区域地理位置和子流域

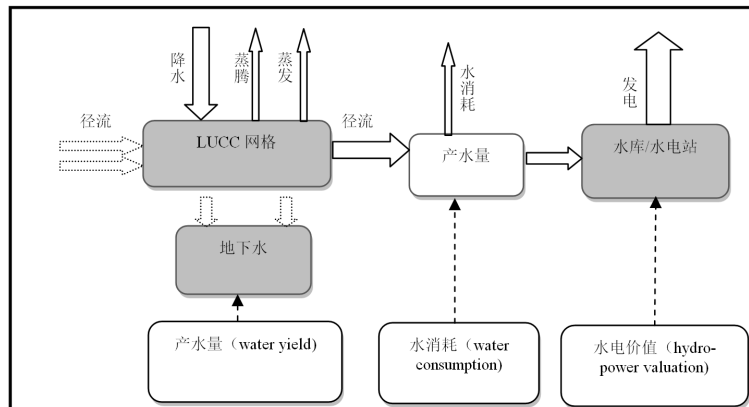


Figure 2. Conceptual diagram of water balance (the factors considered by model was depicted in solid lines, other factors was depicted in dotted line)

图 2. 水平衡概念性框架(图中实线箭头为模型考虑的因素, 虚线箭头为模型没有考虑的因素)

式中： $PET(x)$ 表示栅格 x 中的潜在蒸散量，可以用公式(3)计算得到； ω_x 是反映气候与土壤特性的无量纲参数，由公式(4)计算得到。

$$PET(x) = K_c(l_x)ET_0(x) \quad (3)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (4)$$

式中： $ET_0(x)$ 是栅格 x 中的反映当地气候条件、基于参照植物的参考蒸散量； $K_c(l_x)$ 为土地利用/覆被类型 l_x 中的植被蒸散系数，由土地利用/覆被中的植物特征决定。公式(4)中 Z 是用以表征季节性降雨特征的经验常数； $AWC(x)$ 是植被可利用含水量，其值由土壤质地和有效土壤深度决定。

对于其他的土地利用/覆被类型(如水域，建设用地，湿地等)，栅格 x 中的实际蒸散量 $AET(x)$ 直接通过参考蒸散量 $ET_0(x)$ 计算得到，但是以该栅格的降水量为上限。计算公式为：

$$AET(x) = \text{Min}(K_c(l_x)ET_0(x), P(x)) \quad (5)$$

2.1.2. 水稀缺模型(Water scarcity model)

该模型用于计算实际到达大坝水电站 d 的水量。大坝上游集水区的每个网格既是水量的贡献者，也是水量的消耗者。通过表格的形式输入每一种土地利用/覆被类型的消耗性用水量，模型计算出各集水区的消耗性用水量；加总产水量模型的每个网格的产水量，得到集水区总产水量。两者之差即为实际到达大坝 d 可用于发电的供水量。计算公式为：

$$V_d = Y_d - u_d \quad (6)$$

式中： V_d 表示实际到达大坝 d 的水量， Y_d 表示大坝 d 的上游集水区总的产水量， u_d 表示大坝 d 处的上游集水区所消耗的总的水量。

2.1.3. 水电产量和价值评估模型(Hydropower Production and Valuation Model)

该模型用于估算各水电站水电生产的数量及其价值。水电站 d 年发电量(ε_d ，单位为千瓦时)由发电机效率(β ，单位为%)、到达大坝水量(V_d ，单位为 m^3/yr)、 V_d 中用于水力发电的水量的比例(γ_d ，单位为%)以及水电站水头高度(h_d)决定。计算公式为：

$$\varepsilon_d = 0.00272 \times \beta \times \gamma_d \times h_d \times V_d \quad (7)$$

水电的价值以水电站生命周期利润的净现值表示，计算公式为：

$$NPVHd = (p_e \varepsilon_d - TCd) \cdot \sum_{t=0}^{T-1} \frac{1}{(1+r)^t} \quad (8)$$

式中： TC_d 表示大坝 d 处水电站年均总成本， p_e 表示发电站提供的电能的市场价格， T 表示当前条件下发电站预期的剩余使用时间， r 表示市场折现率。模型假定公式中的水电站年成本、水电价格以及年发电量不随时间而改变。

得到水电站生命周期利润的净现值后，可以通过年金计算公式，计算得到水电站的年均利润。各子流域(汇水区)的发电量及其价值通过加总该子流域的所有发电站的发电量和价值得到。

2.2. 数据来源

论文收集了模型运行需要的各种数据，包括流域 DEM、土地利用/覆被、降水、蒸发、土壤、植被特点以及流域水电站相关数据，并制作成模型要求的数据格式。数据及其来源见表 1。

Table 1. Data and sources
表 1. 数据来源

数据	数据描述	数据来源
DEM 数据	栅格数据, 空间分辨率为 30 m	地理系统科学数据共享平台 (www.geodata.cn)
土地利用/覆被图层	栅格数据, 空间分辨率为 1000 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
降水量图层	栅格数据, 空间分辨率为 100 m	欧洲中尺度天气预报中心(ECMWF) (http://www.ecmwf.int/)
植物可利用含水率图层	栅格数据, 空间分辨率为 1000 m。根据经验公式计算(Gupta and Larson, 1979) [20]	世界土壤数据库(HWSD) (http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML)
年均参考蒸散量(ET ₀)	栅格数据, 空间分辨率为 1000 m	全球干旱和潜在蒸散数据 (http://www.cgiar-csi.org/data/global-aridity-and-pet-database)
土壤属性	栅格数据, 空间分辨率为 1000 m	世界土壤数据库(HWSD) (http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML), 文献[21]
土壤深度	栅格数据, 空间分辨率为 1000 m	世界土壤数据库(HWSD) (http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML)
季节性因子(Z)	描述当地降雨分布格局和水文地理特征的经验常数, 在九龙江研究区域中 Z 值取 4。	文献[22] [23] [24]
植被蒸散系数 Kc	Excel 数据	文献[25]
最大根系深度	Excel 数据(单位: mm)	文献[26]
LULC_veg	Excel 数据	InVEST 指南[3]
耗水量图层	Excel 数据	文献[27]
水电站名称和位置	Excel 数据	文献[16]现场调查
发电机效率(β)、 V_d 中用于水力发电的水量的比例(γ_d)、水电站水头高度(h_d) \ 水电站的年均成本(TC_d)、水电站使用年限	Excel 数据	文献[16]现场调查
发电的价格	p_e (元/kw.h)	福建省物价局
折现率 r	4.5%	20 年期长期国债利率

3. 土地利用/覆被变化

本研究通过比较 2000 年和 2010 年两种土地利用/覆被情境下的水电产量和价值来分析土地利用/覆被变化对流域水电生产的影响。除了土地利用/覆被变化外, 其他因素, 特别是降水量、市场、发电站的技术和运营等的波动也会对水电产量和价值产生影响。为了识别出土地利用/覆被变化的效应, 论文使用了流域 15 年平均降水量, 并假设其他因素不变。考虑到九龙江流域梯级电站的特点, 论文基于 DEM 图层, 利用 ArcGIS 软件, 把研究区域划分成 151 个子流域(每个水电站作为子流域出水口划分而得)。把制作的图层和模型需要的其他数据(表 1)输入 InVEST 水电生产模型, 得到研究结果。为了分析和展示的方便, 论文将 151 个子流域合并为 14 个子流域进行分析(见图 2)。北溪 8 个子流域(B1-B8), 西溪 5 个子流域(X1-X5), 南溪一个子流域(N1)。其中 B3、B7、B8、X3、X5、N1 是城市化程度较高的子流域, 为城市子流域, 其他为农村子流域。

3.1. 土地利用/覆被变化

分析 2000 年到 2010 年土地利用/覆被转移可以发现, 流域土地利用/覆被变化表现为耕地、林地、草地、水域面积减少, 其中耕地和林地面积减少最多, 分别为 172.33km² 和 183.85km²。减少比例分别达到 7.8% 和 1.9%; 建设用地面积增加了 419.50 km²; 增加了 1.46 倍。建设用地增加主要由耕地、林地和草地转变而来, 转移面积

分别为 178.33 km²、177.58 km² 和 55.46 km² (图 3(a))。从各子流域土地利用/覆被变化看, 所有子流域建设用地面积都在增加, 耕地、林地和草地面积在减少, 流域增加的建设用地主要分布在城市子流域(图 3(b)), 6 个城市子流域增加的建设用地面积占整个流域增加的建设用地面积的比例达到 77.28%。同时必须注意的是, 尽管流域土地利用转换方向都是由耕地、林地、草地等转化为建设用地, 但是不同子流域这些土地利用/覆被类型转化为建设用地的比例不同。如子流域 B3 的林地和耕地转化为建设用地面积大致相同, 而子流域 X5 中, 所增加的建设用地 70%由耕地转化而来。各子流域这种土地利用/覆被变化的特点对下面将分析的流域水电产量的变化产生重大影响。

3.2. 对产水量的影响

九龙江流域产水量空间分布及其变化见表 2。产水量不仅受到降水量影响, 各子流域内土地利用/覆被类型的分布情况、植被蒸散系数、土壤质地和土壤深度等影响实际蒸散量大小的因素也会影响产水量[28]。九龙江流域各土地利用/覆被类型的平均实际蒸散量依次为水域 > 耕地 > 林地 > 草地 > 建设用地 > 未利用地(图 4)。这使得一些子流域尽管降水量相对较大, 但是由于其蒸散量较高的土地利用/覆被类型所占比例较高, 其产水量反而较小。如尽管子流域 X3 的降水量比子流域 B8 小(表 2), 但是由于子流域 B8 的土地利用/覆被类型中平均实际蒸散量较大的水域和耕地所占的比例大于 X3, 导致 X3 的产水量反而大于 B8。

不同土地利用/覆被类型实际蒸散量的不同是土地利用/覆被变化影响产水量的主要机制。从表 2 可以发现, 由于土地利用/覆被的变化是从蒸散量较大的耕地和林地转化为蒸散量较小的建设用地, 九龙江流域 2010 年的产水量比 2000 年增加了 0.96 亿 m³, 增幅为 0.66%。各子流域产水量变化见图 5。

从图 5(a)可以发现, 所有子流域产水量都在增加, 但是城市子流域产水量增幅大于农村子流域; 从图 5(b)可以看到, 增加的产水量主要来自于建设用地增加较多的城市子流域。6 个城市子流域面积占全流域面积的 33.34%, 但是增加的产水量占全流域的比例达到 70.83%。

3.3. 对用于发电的水量的影响

产水量的增加并不必然引起发电量的增加。如论文 2 部分所讨论, 水电生产数量取决于实际达到大坝可能用于发电的水量。实际达到大坝的水量为大坝上游子流域产水量与耗水量之差。耗水主要发生在耕地和建设用地两种土地利用/覆被类型上。模型运行得到的流域耗水量变化和达到大坝用于发电的供水量的变化见图 6(a)。由于土地利用/覆被的变化, 尽管产水量增加了 0.96 亿 m³, 但是流域耗水量增加量为 11.32 亿 m³。这导致整个

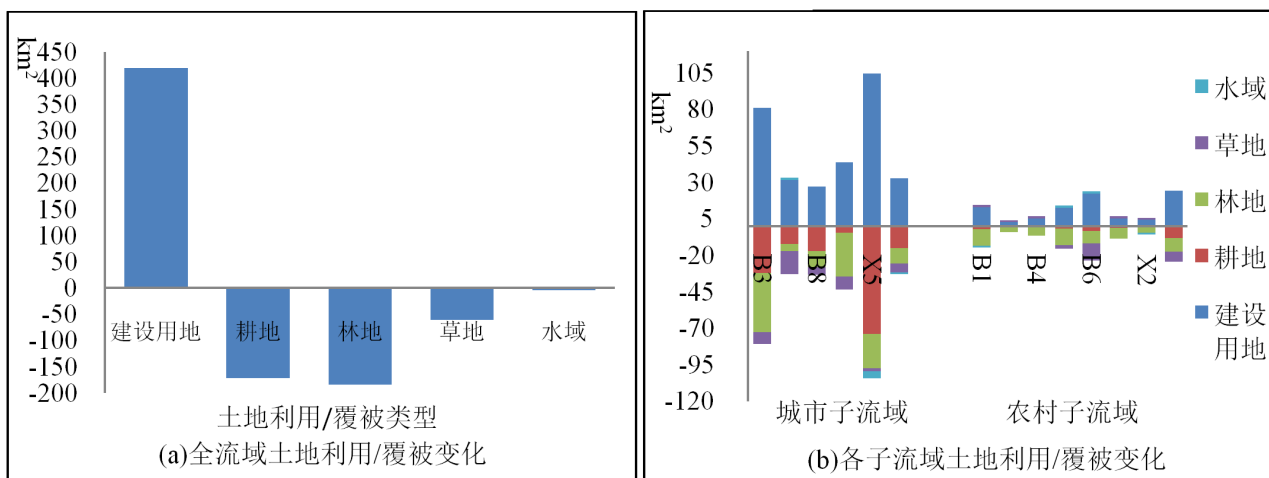


Figure 3. Land use/land cover changes
图 3. 土地利用/覆被变化

Table 2. Water yield of Jiulong River in 2000 and 2010
表 2. 2000 年和 2010 年九龙江流域产水量

子流域	面积/km ²	降水量/mm	2000			2010		
			蒸散量/mm	平均产水量/mm	总产水量/(10 ⁸ m ³)	蒸散量/mm	平均产水量/mm	总产水量/10 ⁸ m ³
B1	2207	1687.90	572.27	1115.63	24.62	570.40	1117.50	24.66
B2	1213	1669.67	559.76	1107.34	13.43	558.70	1108.40	13.45
B3	1042	1613.25	566.30	1045.41	10.89	543.26	1068.45	11.13
B4	624	1655.92	574.75	1080.88	6.74	572.09	1083.54	6.76
B5	1489	1656.26	557.06	1099.18	16.37	554.44	1101.80	16.41
B6	1592	1594.58	552.27	1042.33	16.59	546.90	1047.71	16.68
B7	889	1561.44	541.87	1019.63	9.06	535.81	1025.68	9.12
B8	473	1505.78	597.75	908.07	4.30	570.78	935.05	4.42
X1	1108	1568.47	565.80	1002.63	11.11	563.63	1004.79	11.13
X2	1005	1547.83	548.27	997.98	10.03	545.15	1001.10	10.06
X3	861	1488.10	534.58	952.12	8.21	526.16	960.55	8.28
X4	391	1487.33	563.47	923.85	3.64	549.53	937.78	3.66
X5	427	1486.91	581.20	905.63	3.87	547.63	939.20	4.01
N1	703	1420.50	518.70	893.98	6.28	511.80	900.88	6.33
合计/平均	14024	1567.42	559.58	1006.76	145.14	549.73	1016.60	146.10

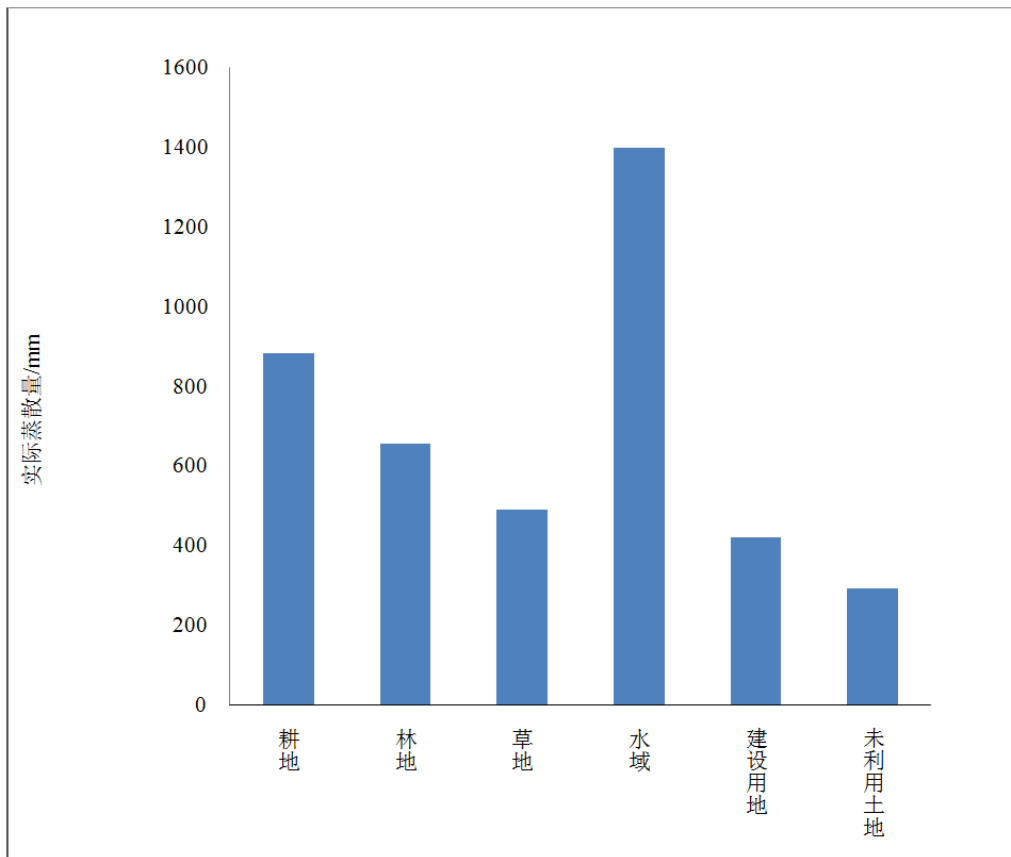


Figure 4. Evapotranspiration of different types of land use/land cover
图 4. 九龙江流域不同土地利用/覆被类型的实际蒸散量

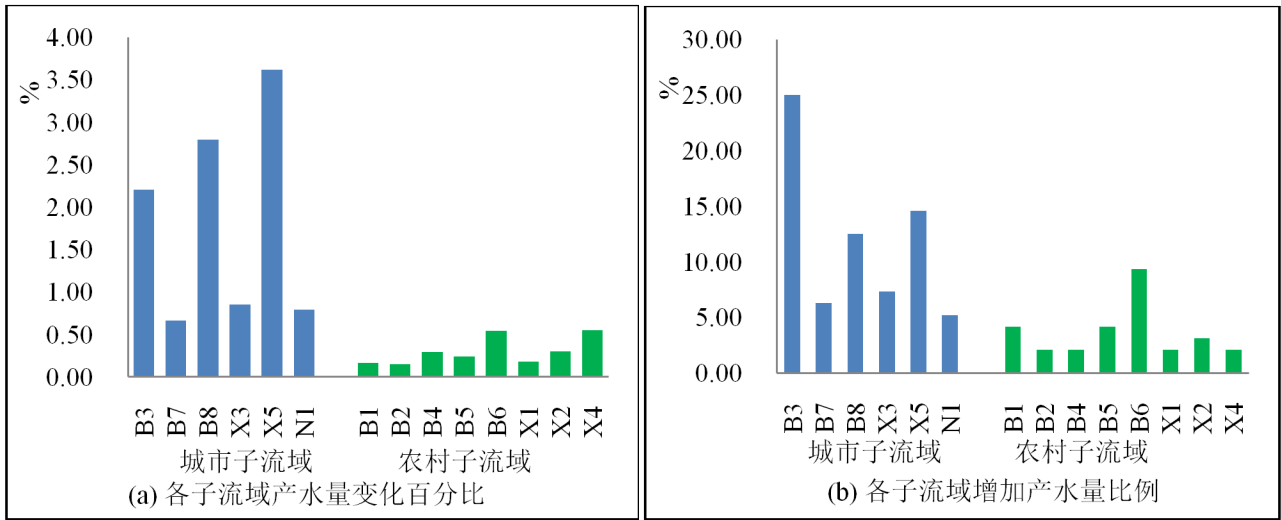


Figure 5. The changes of water yield (a) and the increased percentage of water yield (b) based on subwatershed
图 5. 各子流域的产水量变化和增加的产水量比例

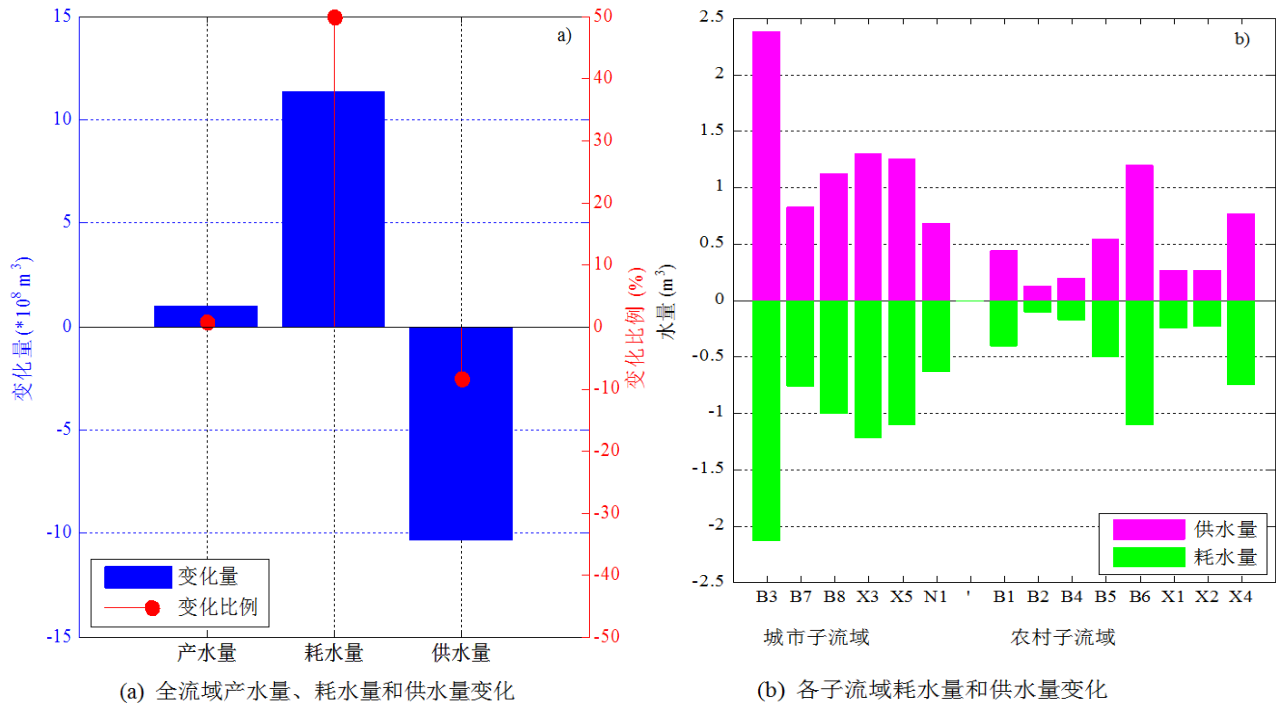


Figure 6. Impacts of land use/land cover change on water consumption and water supply
图 6. 土地利用/覆被变化对耗水量和供水量影响

流域达到大坝可能用于水力发电的水量减少了 10.36 亿 m³，减少比例为 8.46%。各子流域土地利用/覆被变化的不同(图 3(b))，导致各子流域耗水量的变化差别较大。耗水量和供水量变化较大的区域为土地利用/覆被变化较大的城市子流域(图 6(b))。

3.4. 对用于发电的水量的影响

模型得到的九龙江流域 2000 年和 2010 年各子流域发电量和利润见表 3。2010 年土地利用/覆被条件下，九龙江流域年发电量为 20.6 亿 kwh，使用年限 30 年内水电利润的净现值为 90.4 亿元，年均利润 5.31 亿元。由于

Table 3. Annual hydropower production and net present value of Jiulong River in the year of 2000 and 2010
表 3. 2000 年和 2010 年九龙江流域年发电量和价值

子流域	2000 年			2010 年		
	供水量/(10 ⁸ m ³)	年发电量/(10 ⁸ kwh)	利润净现值/(10 ⁸ 元)	供水量/(10 ⁸ m ³)	年发电量/(10 ⁸ kwh)	利润净现值/(10 ⁸ 元)
B1	22.20	5.35	23.70	21.80	5.27	23.20
B2	12.90	4.00	18.60	12.80	3.97	18.50
B3	8.26	2.06	8.87	6.12	1.51	5.91
B4	6.06	1.04	4.52	5.88	1.01	4.34
B5	15.10	2.75	11.70	14.60	2.66	11.20
B6	14.00	0.26	0.98	12.90	0.24	0.89
B7	7.42	0.32	1.42	6.66	0.28	1.26
B8	2.08	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00
X1	9.40	1.57	6.31	9.15	1.54	6.21
X2	8.75	2.48	10.90	8.52	2.47	10.80
X3	6.37	1.36	6.67	5.15	1.10	5.31
X4	3.67	0.53	2.55	2.92	0.46	2.22
X5	1.82	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00
N1	4.47	0.14	0.71	3.84	0.12	0.60
合计	122.50	21.85	96.92	112.14	20.64	90.44
年利润			5.69			5.31

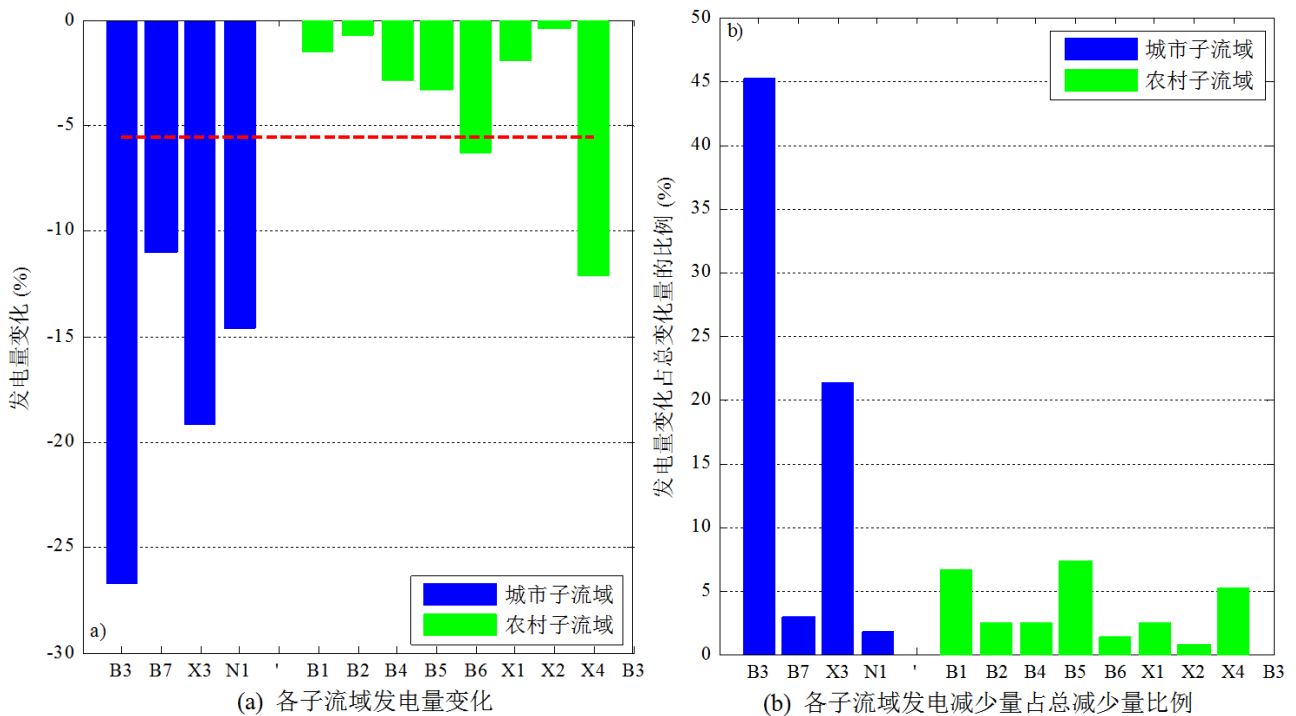


Figure 7. Impacts of land use/land cover change on hydropower production
图 7. 土地利用/覆被变化对各子流域水力发电量的影响

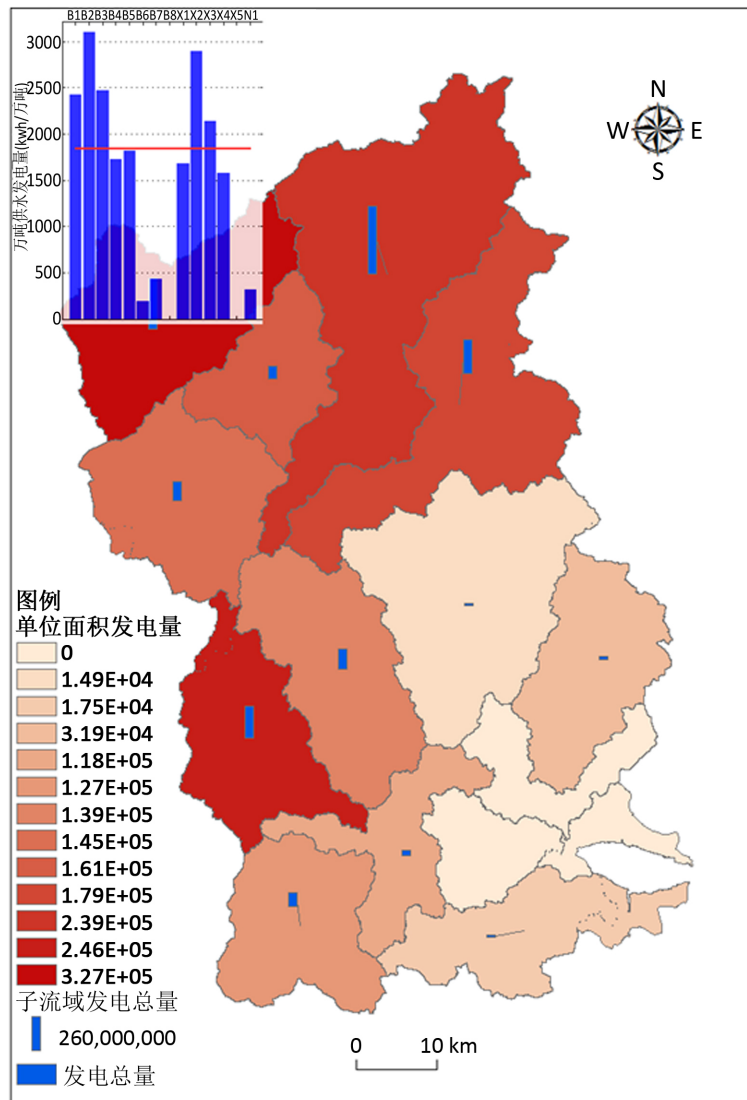


Figure 8. Hydropower production of sub-watersheds and per km²
 图 8. 各子流域发电量和单位面积发电量

土地利用/覆被变化，与 2000 年相比，九龙江流域年水力发电量减少了 1.21 亿 kWh，降低了 5.55%，年利润减少 0.38 亿元，降低了 6.68%。

从表 3 和图 7(a)可以发现，每个子流域的发电量和利润都在降低。但是城市子流域发电量降低的比例要大于农村子流域。6 个城市子流域中除 B8 和 X5 由于没有水电站外，其余 4 个子流域发电量降低的比例都高于流域平均水平；而农村子流域除 B6 和 X4 外，其他子流域发电量降低的比例都低于流域平均水平。流域水力发电量降低主要是由于土地利用/覆被变化剧烈的城市子流域发电量减少造成的(图 7(b))。子流域 B3 减少的发电量占到全流域减少的发电量比例达到 45.23%，X3 达到 21.38%。四个城市子流域减少的发电量占整个流域发电减少量的 71.22% (图 7(b))。

图 8 显示了各子流域总发电量、单位面积和万吨供水量的发电潜力。从图 8 可以发现，无论是总发电量还是单位面积发电潜力，上游子流域都远远高于下游子流域；上游子流域万吨供水量的发电潜力也远远高于流域平均水平。因此从水电生产的可持续性看，在制定流域发展规划空间规划时，必须注意上游子流域的保护。

我们用模型运行得到的产水量、发电量与流域多年平均水资源量和发电量进行比较来验证模型结果。九龙江流域多年平均水资源量为 154.97 亿 m^3 [29], 2010~2015 年年均发电量为 20.83 亿千瓦时。实际发电量与模型计算发电量误差在 5% 以内, 实际水资源量与模型计算的产水量误差在 6% 左右, 说明模型结果具有很高的可靠性。

4. 结论和讨论

水电是世界上利用最普遍的清洁能源, 对节能减排和应对气候变化具有重要的意义。但其对土地利用/覆被变化非常敏感。研究土地利用/覆被变化对流域水电生产的影响是流域水资源规划和管理的基础。本研究应用 InVEST 模型的水库水电生产模型, 基于 2000~2014 年间 15 年的降水量数据, 2000 年和 2010 年土地利用/覆被类型、土壤属性数据、植物可利用含水率、生物物理参数表以及流域水电站的相关资料, 评估了九龙江流域土地利用/覆被变化对流域产水量、耗水量、水电服务数量、价值及其空间分布的影响。

研究发现, 由于土地利用/覆被的变化, 特别是由蒸散量较高的林地、耕地和草地转化为蒸散量较低的建设用地, 九龙江流域产水量增加了 0.66%; 但是由于建设用地消耗性用水高, 使得达到大坝可能用于水力发电的供水量降低了 8.46%, 这导致九龙江流域年均水力发电数量减少了 1.22 亿 kwh , 降低了 5.56%, 水电每年的价值减少 0.40 亿元, 降低了 6.69%。流域水力发电减少原因主要是土地利用与覆被变化大的城市子流域发电量减少引起的。

本论文同时研究了九龙江流域产水量和发电量的空间分布规律。九龙江流域产水量由上游向下游递减, 上游子流域是产水量较高的地区; 上游子流域水电生产总量、单位面积和万吨供水量水力发电的潜力最高, 对流域水力发电贡献最大, 因此上游子流域保护对流域水供给服务能力的保障非常关键, 在制定流域社会经济发展规划、流域空间规划时, 必须注意上游子流域的保护。

InVEST 模型的水电生产模型对流域水电生产数量、价值及其空间分布的评估具有很好的应用前景。但是必须指出的是, 该模型是基于年平均值进行估算, 忽略了极端条件的影响和产水量随时间的年内变化对水力发电的影响; 模型假定流域内产生的水量除了蒸散以外都到达了流域的出水口, 而没有考虑水分被除了人类初级消耗之外的其他方式截留或利用; 模型完全忽略了地表水和地下水的相互作用。这些简化和假设将导致计算结果存在误差。尽管如此, InVEST 模型的结果对流域规划与管理仍然具有重要的参考作用。

基金项目

国家自然科学基金项目(41471464)。

参考文献 (References)

- [1] COSTANZA, R., ARGE, R. D., GROOT, R. D., et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- [2] COSTANZA, R., DE GROOT, R., SUTTON, P., et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26(1): 152-158.
- [3] SHARP, R., TALLIS, H.T., RICKETTS, T., GUERRY, A.D., et al. In vest user's guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2014.
- [4] WCD (The World Commission on Dams). Dams and development: A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams. Earthscan Publications, 2000.
- [5] 秦长海, 甘泓, 贾玲, 等. 水价政策模拟模型构建及其应用研究[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 109-116.
QIN Changhai, GAN Hong, JIA Ling, et al. A model building for water price policy simulation and its application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(1): 109-116. (in Chinese)
- [6] 李丹丹, 陈南祥, 李耀辉, 等. 基于能值理论与方法的区域可利用水资源价值研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(3): 22-24.
LI Dandan, CHEN Nanxiang, LI Yaohui, et al. Research on available regional water resources value based on energy theory.

- China Rural Water and Hydropower, 2015(3): 22-24. (in Chinese)
- [7] 王欢. 基于边际效用理论的水资源价值研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2012.
WANG Huan. Research of water resources value based on the theory of marginal utility. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 王洪梅. 水电开发对河流生态系统服务及人类福利综合影响评价[D]: [博士学位论文]. 中国科学院研究生院(成都山地灾害与环境研究所), 2007.
WANG Hongmei. Integrated assessment on hydro-electricity to river ecosystem services and human wellbeing. Beijing: China Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [9] 陈敏, 李绍才, 孙海龙, 等. 雅砻江下游梯级开发对河流生态系统服务功能的影响[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 89-94.
CHEN Min, LI Shaocai, SUN Hailong, et al. Impact of cascade hydropower development in the lower-reach of Yalong river on river ecosystem services. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 89-94. (in Chinese)
- [10] 郝彩莲, 尹军, 张诚, 等. 承德武烈河流域水生态系统服务功能经济价值研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 91-95.
HAO Cailian, YIN Jun, ZHANG Cheng, et al. Economic value of service functions of freshwater ecosystem in the Wulie river basin. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 91-95. (in Chinese)
- [11] 莫创荣, 孙艳军, 高长波, 等. 生态价值评估方法在水电开发环境影响评价中的应用研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(5): 18-21.
MO Chuangrong, SUN Yanjun, GAO Changbo, et al. Application of ecological value evaluation method in environment assessment of hydropower development. Water Resources Protection, 2006, 22(5): 18-21. (in Chinese)
- [12] 马静, 刘宇. 基于可计算一般均衡模型的大型水电项目经济影响评价初探[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 166-180.
MA Jing, LIU Yu. Economic impact assessment of large-scale hydropower project based on computable general equilibrium model. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(5): 166-180. (in Chinese)
- [13] 贾金生, 徐耀, 马静, 等. 关于水电回报率、与经济社会发展协调性及发展理念探讨[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 1-5.
JIA Jinsheng, XU Yao, MA Jing, et al. Discussion on hydropower return, its relationship with socio-economic development and new concept for development. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 1-5. (in Chinese)
- [14] 丁晓阳, 费丽春. 尼尔基水利枢纽综合效益分析与国民经济评价[J]. 水力发电学报, 2002, 21(4): 5-10.
DING Xiaoyang, FEI Lichun. Comprehensive benefits and national economy evaluation of Nierji water project. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 21(4): 5-10. (in Chinese)
- [15] 福建省统计局. 福建省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
Fujian Provincial Bureau of Statistics. Fujian statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese)
- [16] 福建省水利厅. 福建省九龙江流域综合规修编报告[R]. 2006.
Ministry of Water Resources in Fujian Province. Integrated planning in Jiulong river of Fujian province. 2006. (in Chinese)
- [17] 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学, 2013, 33(4): 58-62.
WU Zhe, CHEN Xin, LIU Beibei, et al. Research progress and application of InVEST model. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2013, 33(4): 58-62. (in Chinese)
- [18] FU, B. P. On the calculation of the evaporation from land surface. Scientia Atmospherica Sinica, 1981, 5(1): 23-31.
- [19] ZHANG, L., HICKEL, K., DAWES, W. R., et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. Water Resources Research, 2004, 40(2): 89-97. <https://doi.org/10.1029/2003wr002710>
- [20] GUPTA, S., LARSON, W. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resources Research, 1979, 15(6): 1633-1635. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01633>
- [21] FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. Harmonized world soil database (version 1.2). Rome: FAO and Laxenburg: IIASA, 2012.
- [22] 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等. 不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟[J]. 水资源保护, 2014, 3: 9-13.
WU Zhe, CHEN Xin, LIU Beibei, et al. Simulation of spatial distribution of water yield of Hainan Island with different types of land use/land cover. Water Resources Protection, 2014, 3: 9-13. (in Chinese)
- [23] ZHANG, C. Q., LI, W. H., ZHANG, B., et al. Water yield of Xitiaoqi river basin based on InVEST modeling. Journal of Resources and Ecology, 2012, 1: 50-54.
- [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. <https://doi.org/10.1029/2000WR900325>
- [25] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [26] CANADELL, J., JACKSON, R. B., EHLERINGER, J. B., et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. Oecologia, 1996, 108(4): 583-595. <https://doi.org/10.1007/BF00329030>
- [27] 福建省水利厅. 福建省水资源公报(2008-2013)[R]. 福州: 福建水利厅.

- Water Resources Department of Fujian Province. Fujian water resources bulletin (2008-2013). Fujian: Water Resources Department of Fujian Province. (in Chinese)
- [28] 吴楠, 高吉喜, 苏德毕力格, 等. 生态系统供水发电服务评估及经济价值测算——以雅砻江二滩电站为例[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 56-64.
WU Nan, GAO Jixi, SUDEBILIGE, et al. Evaluation of ecosystem services for water supply and power generation and its economic value: A case study of Ertan hydropower on Yalongriver. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(4): 56-64. (in Chinese)
- [29] 福建省水利厅. 福建省水资源公报(2015)[R]. 福州: 福建水利厅.
Water Resources Department of Fujian Province. Fujian water resources bulletin in 2015. Fujian: Water Resources Department of Fujian Province. (in Chinese)