

DOI: 10.5846/stxb201902180286

王保盛, 陈华香, 董政, 祝薇, 邱全毅, 唐立娜. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498.

Wang B S, Chen H X, Dong Z, Zhu W, Qiu Q Y, Tang L N. Impact of land use change on the water conservation service of ecosystems in the urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian, China, in 2030. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 484-498.

## 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响

王保盛<sup>1,2</sup>, 陈华香<sup>1,2</sup>, 董 政<sup>1,2</sup>, 祝 薇<sup>1,2</sup>, 邱全毅<sup>1</sup>, 唐立娜<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 生态系统水源涵养服务作为水资源得以持续的基础和保障, 正持续遭受着人类活动的干扰和影响, 土地利用变化作为主要的方式之一, 对水源涵养的影响广泛而且深远。运用 InVEST 模型模拟了闽三角城市群 2015 年和 2030 年的水源涵养情景, 发现到 2030 年闽三角城市群区域内水源涵养量总体下降  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 对比发现: 土地利用变化对水源涵养的影响主要表现在变化面积、变化方向、作用强度以及面积补偿作用四个方面。首先面积变化方面, 水源涵养量同用地类型的面积大小正相关, 但二者的变化量并不正相关; 其次变化方向方面, 相比变化为城市生态系统和水域生态系统而言, 变化为自然生态系统和农业生态系统的土地利用变化更有利于生态系统水源涵养; 再次, 土地利用变化对水源涵养产生作用的强度由强及弱依次为林地、其他土地、草地、农田、建设用地、水域及滩涂; 最后, 面积变化后的补偿作用方面, 由于不同用地类型水源涵养能力和面积变化量的差异, 由农田、林地、草地及其他土地面积下降导致的水源涵养量损失并不能通过建设用地、水域及滩涂用地类型面积的增加得以完全补偿。

**关键词:** 土地利用变化; 水源涵养; InVEST 模型; 影响

## Impact of land use change on the water conservation service of ecosystems in the urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian, China, in 2030

WANG Baosheng<sup>1,2</sup>, CHEN Huaxiang<sup>1,2</sup>, DONG Zheng<sup>1,2</sup>, ZHU Wei<sup>1,2</sup>, QIU Quanyi<sup>1</sup>, TANG Lina<sup>1,\*</sup>

1 Key laboratory of Urban Environment and health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The water conservation service of an ecosystem is the basis and a guarantee for the sustainable development of water resources. It is continually affected by the disturbance and influence of human activities. Land use change caused by humans is one of the main influencing factors and has substantial and enduring impacts on the water conservation service of an ecosystem. In this study, the InVEST model was used to simulate water conservation scenarios for the urban agglomeration of the Golden Triangle in Southern Fujian, China, for 2015 and 2030. The results showed that the amount of water conservation in the urban agglomeration of the Golden Triangle in Southern Fujian would decline by  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$  by 2030. The comparison shows that the effect of land use change on water conservation are mainly manifested in the following four aspects: changed area, changing direction, the intensity and the compensatory effect. Firstly with regards to changed area, the amount of water conservation and the size of the area of land use had changed were positively correlated, but the

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471137)

收稿日期: 2019-02-18; 网络出版日期: 2019-11-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lntang@iue.ac.cn

variance in the amount of water conservation and the area of land use change were not positively correlated. Secondly, with regards to changing direction, the natural ecosystem and the agricultural ecosystem were more conducive to water conservation than the urban ecosystem and the water ecosystem. Thirdly, the degree of impact that land use change had on water conservation is ordered from strong to weak, the order is woodland, other land, grassland, cultivated land, construction land, and water area and tidal flats. Finally, the size of the compensatory effect when area had changed, which is based on the differences in water conservation capacity and area of land subjected to land use change, meant that the decline in water conservation caused by the loss of cultivated land, woodland, grassland and other land could not be fully compensated by the area increase in construction land, water area and tidal flats.

**Key Words:** land use change; water conservation; InVEST model; influence

水资源供需矛盾不断加剧以及水环境的急剧恶化,使得水资源问题已成为人类所共同关注的全球性问题<sup>[1-2]</sup>。生态系统水源涵养服务指生态系统拦蓄降水、调节径流、影响降水、净化水质等方面的能力<sup>[3-5]</sup>,它作为水资源得以保障和持续的基础<sup>[6]</sup>,对自然、社会、经济系统意义重大且影响深远。然而随着工业化、城市化的发展,持续且大范围的人类活动正严重的影响着水源涵养等生态系统服务<sup>[7-8]</sup>。

土地利用作为人类改造自然最主要且持久的方式之一<sup>[7]</sup>,剧烈且持续的影响着生态系统水文过程<sup>[9-10]</sup>。蒸发、入渗、产流等水文过程对土地利用变化的响应使得生态系统水源涵养服务随之变化<sup>[10-11]</sup>,进而不同程度的影响着水资源的质与量。总体来讲我国生态系统水源涵养量东高西低,自东向西呈逐步递减分布规律<sup>[5,12]</sup>,近年来受人类活动的持续影响,局部区域生态系统水源涵养量已呈现不同程度的下降态势<sup>[13]</sup>。从影响因素来讲,水源涵养与降水<sup>[14]</sup>、温度、坡度、COD 密度等自然因子呈正相关关系,同 GDP 密度、人口密度等呈明显的负相关关系<sup>[12]</sup>,结合我国人口及经济分布的空间格局来看,我国越是人口密集、经济发达的区域,生态系统水源涵养受影响越是严重。譬如:受林地面积持续增加影响,长江流域生态系统水源涵养服务逐步增强<sup>[15]</sup>;而京津冀城市群的扩张正在造成生态系统服务不同程度的下降、生态风险加剧以及区域生态安全威胁等问题<sup>[16-17]</sup>;同样在淮北市<sup>[18]</sup>和深圳市<sup>[19]</sup>土地利用的变化,特别是城市化导致的大量用地向建设用地变化正严重的影响着生态系统水源涵养服务。以土地利用变化为代表的人类活动正在成为影响生态系统水源涵养服务的关键因子。

闽三角城市群作为国家区域协同发展战略海西经济带的重要组成部分和“一路一带”战略的重要节点,在城市发展过程中持续的土地利用变化必然加剧水资源问题日益凸出同生态系统水源涵养服务持续遭受破坏之间的矛盾,所以客观认识土地利用的发展变化过程对生态系统水源涵养的影响,了解水源涵养现状及未来变化、发展趋势,对研究区未来土地利用规划、生态系统水源涵养保护乃至区域可持续发展均有重大且深远的意义。

## 1 研究区概况及数据预处理

### 1.1 研究区概况

闽三角城市群位于 116°53′—119°01′E, 23°33′—25°56′N,地处我国福建省东南部沿海区域(图 1),主要包括厦门、泉州、漳州三市,共下辖 12 个行政区、4 个县级市和 13 个县区,总面积 25381 km<sup>2</sup>。区域地势总体西北高东南低,平均海拔高度 900 m,区域内山地丘陵广泛分布,主要有玳瑁山、戴云山、博平岭等山脉,其间水系发育发达,有洛阳江、晋江、西溪、九龙江等水系,山脉水系交错分布,素有“八山一水一分田”之说,土地资源总量先天不足。气候属于典型的亚热带海洋季风气候,年平均气温 20.8—23.6 ℃,平均降雨量 1400—2000 mm,但区域内水资源的时空分布不均,且与地区经济发展不协调<sup>[20]</sup>。改革开放以来,随着经济特区建设、一路一带战略的推进、国家中心城市建设和,闽三角城市群作为海峡西岸经济区的主要构成部分和 21 世纪海上丝绸之路的重要节点在国家区域协同发展战略中的地位和作用逐步凸显,区域内城乡开发建设得以大力

的持续推进,土地资源需求量空前激增导致区域内土地利用方式持续剧变,地表覆被、土壤性质、结构随之变化,进而影响着生态系统服务的协同响应,有研究已表明目前该区域水源涵养的重要性已相对较低<sup>[21-22]</sup>。

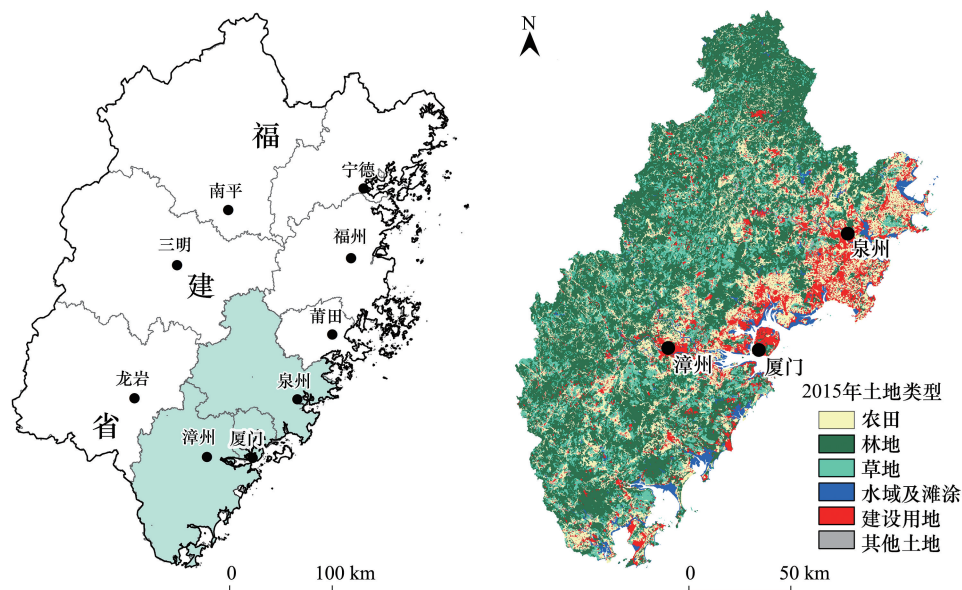


图1 闽三角城市群地理区位及2015年土地利用概况

Fig.1 The location of urban agglomeration and the overview of land-use in 2015 of Golden Triangle of Southern Fujian

## 1.2 数据来源及预处理

本研究要求用到的数据主要包括:区域高程数据,该数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>)。降水数据为区域内多年(1970—2000年)平均降水量空间分布数据,该数据来自WorldClim-Global Climate Data(<http://worldclim.org>)。土壤绝对深度(即地表到岩层的深度)、200 cm深度植物枯萎点的有效土壤含水量(体积分数)数据,该两项数据来自世界土壤信息中心(ISRIC World Soil Information, <http://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/home>)。研究区2015年天文辐射量<sup>[23]</sup>、2001—2010年气温数据<sup>[24]</sup>,该数据来自全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/Default.aspx>)。闽三角区域农田、林地主要植被类型分布数据,该数据主要来自《厦门市统计年鉴》、《泉州市统计年鉴》以及中国林业数据库(<http://data.forestry.gov.cn/lysjk/indexJump.do?url=view/moudle/index>)和《福建省第八次全国森林资源清查及森林资源状况调查报告》资料。植被蒸发、蒸腾量数据,该数据主要来自联合国粮食及农业组织灌排第56号文件:关于植被需水量、蒸发蒸腾量的计算指南(Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56,以下简称FAO 56, <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>)。福建省厦门市、泉州市、漳州市1954—2008年日降水数据,该数据来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)。2015年土地利用数据由遥感影像解译获得,2030年土地利用模拟数据来先前研究“基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置”产生的数据结果<sup>[25]</sup>,该结果已在2019年于《生态学报》公开发表。

对于2030年研究区土地利用情景的模拟是基于未来土地利用变化情景模拟模型(A Future Land Use Simulation Model FLUS)产生的,该模型可以很好的用于自然、社会、经济等多种驱动力作用下的土地利用变化情景模拟<sup>[26]</sup>。在该数据的模拟过程中选取了影响土地利用变化的12项自然、社会、经济驱动因子,结合马尔可夫链(Markov Chain)模拟的2030年各用地类型像元总量、邻域权重参数、成本矩阵及限制发展区等相关参数和数据完成对2030年土地利用情景的模拟。精度检验显示该结果在1%随机采样时,Kappa系数为0.85,总体精度0.90。10%随机采样时,Kappa系数0.84,总体精度0.89;在均匀采样条件下(2000个采样点/类)

Kappa 系数 0.80, 总体精度 0.83, Kappa 检验结果符合精度要求<sup>[25]</sup>。

按照研究开展的数据需求, 本研究以区域高程数据为基础, 经由 ArcMap 数据处理平台水文分析工具提取研究区河网, 并生成相应的流域、次流域矢量文件。降水数据通过对过去 30 年(1970—2000 年) 每年的月平均降水量进行累加后取年度平均值。采用 2001—2010 年气温数据计算多年平均温度及平均温差。最后统一所有空间数据像元大小为 100 m。经上述的初步处理使原始数据符合本研究开展的需求。

为增强不同土地利用类型对水源涵养影响程度的显示度, 凸显影响的差异性, 本研究用到的土地利用数据在国家最新发布的《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017) 的基础上进行了部分整合和重分类, 具体对应关系如表 1 所示。同时鉴于本文的研究目的, 除近陆地区域的沿海滩涂外, 本研究暂不考虑海洋用地类型。

表 1 土地利用类型重分类对照表  
Table 1 The reclassification of land use types

| 序号<br>Rank | 模拟用分类<br>Analog classification | 对应土地类型<br>Corresponding land type | 对应分类等级<br>Corresponding classification grade |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|
| 1          | 农田                             | 耕地                                | 一级类                                          |
|            |                                | 园地                                | 一级类                                          |
| 2          | 林地                             | 林地                                | 一级类                                          |
| 3          |                                | 草地                                | 一级类                                          |
| 4          | 水域及滩涂                          | 河流水面                              | 二级类                                          |
|            |                                | 湖泊水面                              | 二级类                                          |
|            |                                | 水库水面                              | 二级类                                          |
|            |                                | 沿海滩涂                              | 二级类                                          |
|            |                                | 坑塘水面                              | 二级类                                          |
|            |                                | 内陆滩涂                              | 二级类                                          |
|            |                                | 沼泽地                               | 二级类                                          |
|            |                                | 沟渠                                | 二级类                                          |
|            |                                | 商服用地                              | 一级类                                          |
|            |                                | 住宅用地                              | 一级类                                          |
| 5          | 建设用地                           | 工矿仓储用地                            | 一级类                                          |
|            |                                | 公共管理与公共服务用地                       | 一级类                                          |
|            |                                | 特殊用地                              | 一级类                                          |
|            |                                | 交通运输用地                            | 一级类                                          |
|            |                                | 其他土地                              | 一级类                                          |
| 6          | 其他土地                           | 其他土地                              | 一级类                                          |

## 2 研究方法

### 2.1 研究框架

本研究旨在探究 2030 年土地利用变化对闽三角城市群生态系统水源涵养服务的影响。生态系统水源涵养服务作为基于区域太阳辐射、温度、降水、土壤类型、结构质地、气候条件、土地利用方式及结构等因素的综合生态过程, 是一个复合的复杂过程。为突出土地利用变化对水源涵养的作用, 本研究在模拟过程中除土地利用数据外, 其他数据均采用相同的、具有较高代表性和概括性的多年平均数据予以代替来模拟对应年份的水源涵养情景。具体逻辑框架及流程如图 2。

### 2.2 评价方法选取

目前对于生态系统水源涵养功能评价的方法主要有: 土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、水量平衡法、降雨量存储法、年径流量法、林冠截流剩余法、地下径流增长法、多因子回归法<sup>[10, 27-28]</sup>, 其中水量平衡法作为最为常用的评价方法<sup>[29-30]</sup>, 将水、土壤、地上覆被视作一个综合体, 以水的输入和输出为基本原理, 二者的平衡即降水量与蒸散发量之间的差即为该区域的水源涵养量<sup>[28, 31]</sup>, 包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量和

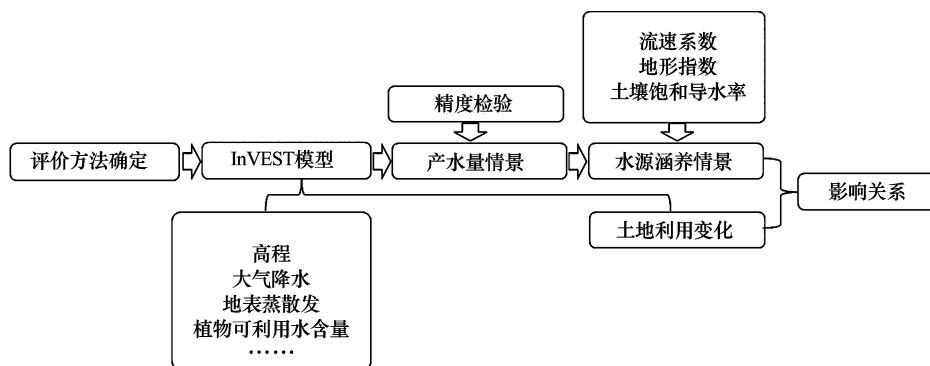


图2 土地利用变化对水源涵养的影响评价框架及流程

Fig.2 The framework and process for assessing the impact of land use change on water retention

冠层截留量<sup>[32]</sup>。基于水量平衡法的 InVEST 模型水源涵养模块作为最常用的方法之一<sup>[29,33]</sup>,受到学界广泛的认可和使用,已成为生态系统水源涵养评价的主流方法<sup>[34]</sup>。所以本研究以水量平衡为原理基础,以 InVEST 模型法开展土地利用变化对水源涵养的影响评价。

### 2.3 InVEST 模型简介及模拟算法

InVEST 模型是由美国斯坦福大学、世界自然基金会、大自然保护协会联合开发的生态系统服务评价工具<sup>[3]</sup>。它以降水量与蒸发量的平衡为基础,综合考虑土壤质地、土壤结构、降水、太阳辐射蒸发、地表覆被蒸腾作用、土地利用方式、地形地貌、水资源汇流等作用进行模拟<sup>[27,35-36]</sup>,具体评价方法见式(1):

$$R = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sat}}{300}\right) \times Y_{xj} \quad (1)$$

式中, $R$ 为涵养水量(mm); $V$ 为流速系数,是水流垂线平均流速与垂线水面点流速的比值<sup>[37]</sup>,是对水流的水平速度与垂直速度之间关系的表达,通常为常数; $TI$ 为地形指数,是地形特征参数化的重要指标<sup>[38]</sup>,同高程、坡度、土壤厚度等因子相关<sup>[39]</sup>。根据公式(2)计算; $K_{sat}$ 为土壤饱和导水率(cm/d),指土壤被水饱和时单位水势梯度下单位时间内通过单位面积的水量,它主要受土壤结构、有机质含量、容重、孔隙度等因子的影响<sup>[40-41]</sup>;  $Y_{xj}$ 为第 $j$ 类土地利用/土地覆盖类型上第 $x$ 个栅格单元的年均产水量, InVEST 模型产水量 $Y_{xj}$ 计算基于 Budyko 水热耦合平衡假说(1974)和年平均降水量数据,不区分地表水、地下水以及基流,认为每个栅格的产水量为降水量和实际蒸散发水量的差值<sup>[3]</sup>,根据公式(3)计算。

$$TI = \lg\left(\frac{\text{Drainage\_Area}}{\text{Soil\_Depth} \times \text{Percent\_Slop}}\right) \quad (2)$$

式中,Drainage\_Area 为集水区栅格数量,Soil\_Depth 为土壤深度(mm),Percent\_Slop 为百分比坡度。

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_{xj}}\right) \times P_{xj} \quad (3)$$

$$\frac{\text{AET}_{xj}}{P_{xj}} = \frac{1 + \omega_{xj} R_{xj}}{1 + \omega_{xj} R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}}$$

$$\omega_{xj} = Z \times \frac{\text{AWC}_{xj}}{P_{xj}}$$

$$R_{xj} = \frac{Kc_{xj} \times ET_0}{P_{xj}}$$

式中, $x_j$ 表示第 $j$ 类土地利用/土地覆盖类型上的第 $x$ 个栅格单元; $Y$ 表示年均产水量;AET表示平均蒸散发

量; $P$  表示年均降雨量; $\omega$  表示自然气候—土壤性质的非物理参数,是一个经验参数; $R$  指 Bydyko 干燥指数; $Z$  表示 Zhang 系数;AWC 表示土壤有效含水量,该值由土壤深度和理化性质决定; $K_c$  表示植被蒸散系数; $ET_0$  表示参考植被蒸散量。

## 2.4 InVEST 模型水源涵养模拟数据选取及解释

本研究中流速系数采用 InVEST 模型推荐参数<sup>[3]</sup>,土壤饱和导水率由 200 cm 深度植物枯萎点的有效土壤含水量数据表征,蒸散发数据以 2015 年实际蒸散发量为基础,且假定研究区 2030 年蒸散发量同 2015 年保持一致。鉴于降水量的年际差异,本研究采用 1970—2000 年平均降水量数据替代 2015 年和 2030 年的降水量数据。植物根限深度是指植物根系可到达的最大理论深度,本研究采用土壤绝对深度(即地表到岩层的深度)数据。植物可利用水含量是指植物根系可从土壤中获得的水资源量,依据植物根系深度相关研究数据并结合区域内主要分布植被类型文献调研发现,乔木植物根系广泛分布在地下 200 cm 以内,譬如一些常见种如冷杉属树种或赤松的根系分布深度可达 100 cm 以下,但主要分布在 0—60 cm 的表土中<sup>[42]</sup>、马尾松根系比杉木发达,主根深度可达 150 cm<sup>[43-44]</sup>,为能够尽可能全面的覆盖到区域内的植被根系深度,本研究采用 200 cm 深度植物枯萎点的有效土壤含水量作为植物可利用水含量数据。

## 2.5 模型参数设定

### 2.5.1 潜在蒸散发量计算

潜在蒸散发是指太阳辐射向水分蒸发提供的能量,用水深表示。在 InVEST 模型中采用改进的 Hargreaves 公式(4)计算潜在蒸散发量,在不确定因素较多时,该公式相比而言有更好的可靠性和适用性:

$$ET_0 = 0.0013 \times 0.408 \times RA \times (T_{av} + 17) \times (TD - 0.0123P)^{0.76} \quad (4)$$

式中, $ET_0$  表示研究区潜在蒸散发量(单位:mm), $RA$  表示天文辐射量(单位: $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), $T_{av}$  表示平均日最高气温和最低气温的平均数(单位: $^{\circ}\text{C}$ ), $TD$  表示平均日最高气温和最低气温的差值(单位: $^{\circ}\text{C}$ ), $P_n$  表示降水量(单位:mm)。

本研究假定 2030 年研究区蒸散发量同 2015 年保持一致,为增强对 2030 年蒸散发量的表征性且保障 2015 年结果的相对准确性,本研究采用 2000—2010 年多年气温数据替代模拟年份(2015 年、2030 年)的气温数据,来计算  $T_{av}$  和  $TD$ ,天文辐射量采用 2015 年实际辐射量数据,且假定 2030 年天文辐射与 2015 年保持一致,降水采用研究区 1970—2000 年多年降水平均值代替,来完成对研究区蒸散发量的计算。

### 2.5.2 各土地利用类型的植被根系深度

植被根系深度是指在不同用地类型中各类植物根系可到达的实际深度,可达深度的差异直接影响着植物对水资源的利用方式及强度,同时也影响着植物的蒸腾作用。本研究结合文献和数据调研采用下列方法分别设定各用地类型的植被根系深度参数。

(1)农田用地类型根系深度参数:整理、统计 2010—2017 年《厦门市统计年鉴》、《泉州市统计年鉴》数据发现,近 8 年以来该区域年均种植面积最大的植被分别为水稻( $10517.80 \text{ hm}^2/\text{a}$ )、甘薯( $4847.27 \text{ hm}^2/\text{a}$ )、玉米( $4592.60 \text{ hm}^2/\text{a}$ )以及花生( $3059.47 \text{ hm}^2/\text{a}$ ),水稻仍占主导,故在该用地类型中以水稻根系深度表征该区域农田土地类型植被根系深度。文献显示,水稻根系大部分集中分布在 200 mm 以内的表层土壤中<sup>[45-46]</sup>,部分高产水稻其根系深度可达 240 mm 以上<sup>[47-48]</sup>。

(2)林地用地类型根系深度参数:依据中国林业数据及《福建省第八次全国森林资源清查及森林资源状况调查报告》资料显示,福建省区域内森林分布主要以乔木为主,主要有杉木、马尾松、竹类<sup>[49]</sup>。不同家系杉木的平均根长在 1117 mm<sup>[50]</sup>,根系生物量的近 80%集中在地下 600 mm 以内的土层中<sup>[51]</sup>;马尾松根系大部分分布在 200—800 mm 深的土层中<sup>[52-53]</sup>,优势种群垂直根系深度可达 1300 mm<sup>[54]</sup>;对竹子的相关研究显示,不同竹类其根系大多集中在 500 mm 深的土层中,其中毛竹根系分布较深,可达 700—1000mm<sup>[55]</sup>。

(3)草地用地类型根系深度参数:草地由于其特殊性,不仅种类繁多,而且数量很难确定,本文参考相关草地植物根系研究发现,草地植物大部分根系集中在 300—500 mm 以内的土层中<sup>[56-59]</sup>。

(4) 水域及滩涂用地类型根系深度参数: 芦苇和美人蕉作为水域及滩涂最常见的植被类型<sup>[60-61]</sup>, 本研究则以二者根系深度的平均值表征该用地类型的植被根系深度。相关研究表明, 水生草本植物根系有其自身特点, 其总根数的 90% 分布于 0—300 mm 的土层内<sup>[62]</sup>, 水域及滩涂用地类型中的优势种芦苇、美人蕉的根系深度经测量分别可达 325 mm 和 437 mm<sup>[60]</sup>。

### 2.5.3 各土地利用类型的植被蒸散系数

各土地利用类型的植被蒸散系数  $K_c$  很大程度上取决于土地利用/覆被的植被性质<sup>[63-64]</sup>, 计算方法见公式(5):

$$K_c = \frac{\sum_{m=1}^{12} K_{c_m} \times ET_{0_m}}{\sum_{m=1}^{12} ET_{0_m}} \quad (5)$$

式中,  $K_c$  表示年平均植被蒸散发系数,  $K_{c_m}$  表示  $m$  月(1—12 月)平均植被蒸散发系数,  $ET_{0_m}$  表示对应  $m$  月的潜在蒸散发量。

本研究基于该方法在 FAO 56 发布的不同生长阶段植被蒸散系数的基础上通过文献调研及年鉴数据整理, 统计出研究区 2010—2017 年间各用地类型中分布最为广泛的 4 类植被, 分别计算了各用地类型中不同植被在全生命周期的平均蒸散系数, 进而用该 4 类植被的平均蒸散系数的平均值表征该用地类型的蒸散系数(表 2)。

表 2 闽三角城市群各用地类型蒸散发系数( $K_c$ )

Table 2 Evapotranspiration coefficient ( $K_c$ ) of land types in urban agglomeration of Golden Triangle of Southern Fujian

| 土地类型<br>Land types                 | 主要植被类型<br>Main vegetation types | 初期 $K_c$<br>The initial $K_c$ | 中期 $K_c$<br>The mid-season $K_c$ | 末期 $K_c$<br>The late season $K_c$ | 植被平均 $K_c$<br>Average $K_c$ of Vegetation |
|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| 农田<br>Cultivated land              | 水稻                              | 1.05                          | 1.20                             | 0.80                              | 1.02                                      |
|                                    | 甘薯                              |                               | 1.15                             | 0.65                              | 0.90                                      |
|                                    | 玉米                              |                               | 1.20                             | 0.60                              | 0.90                                      |
|                                    | 花生                              |                               | 1.15                             | 0.60                              | 0.88                                      |
| 林地<br>Woodland                     | 针叶树木                            | 1.00                          | 1.00                             | 1.00                              | 1.00                                      |
|                                    | 柑橘类                             | 0.75                          | 0.70                             | 0.75                              | 0.73                                      |
|                                    | 茶树                              | 0.95                          | 1.00                             | 1.00                              | 0.98                                      |
|                                    | 香蕉                              | 1.00                          | 1.20                             | 1.10                              | 1.10                                      |
| 草地<br>Grassland                    | 紫花苜蓿                            | 0.40                          | 0.50                             | 0.50                              | 0.47                                      |
|                                    | 黑麦草                             | 0.95                          | 1.05                             | 1.00                              | 1.00                                      |
|                                    | 三叶草                             | 0.40                          | 1.15                             | 1.10                              | 0.88                                      |
|                                    | 牧草                              | 0.30                          | 0.75                             | 0.75                              | 0.60                                      |
| 水域及滩涂<br>Water area and tidal flat | 芦苇(潮湿土壤)                        | 0.90                          | 1.20                             | 0.70                              | 0.93                                      |
|                                    | 芦苇(静止水面)                        | 1.00                          | 1.20                             | 1.00                              | 1.07                                      |

建设用地  $K_c$  参数的设定依照 InVEST 模型用户手册推荐的计算方法设定, 具体见公式(6):

$$K_c = 0.1f + 0.6(1 - f) \quad (6)$$

式中,  $f$  表示不透水面占区域比例, 城市建成区环境中的透水地面蒸散量近似假定为潜在蒸散发的 60%, 不透水面的蒸发量假定为潜在蒸散发的 10%<sup>[3]</sup>, 基于以上假设并结合研究区主要城市厦门、泉州、漳州均为国家园林城市的实际, 根据《国家园林城市标准》<sup>[65]</sup>、《福建省城市绿地建设导则(试行)》、《厦门市园林绿化条例》、《泉州市城市园林绿化管理的规定》要求国家园林城市建成区绿化覆盖率不得低于 35%, 则研究区不透水面面积占建成区总面积的 65%, 基于此便可计算出建设用地类型的植被蒸散系数  $K_c$ 。

其他土地用地类型的  $K_c$  参数在本研究中参照 FAO 56 中的裸地值, 设定为 0.30。同时 InVEST 模型用户

手册注明当某用地类型占比重较小时,该用地类型的  $K_c$  值对模型的影响可忽略不计。以研究区 2015 年土地利用数据为基准,其他土地用地类型仅占区域总面积的 0.09%,故以裸地  $K_c$  系数赋值其他土地类型  $K_c$  系数对模型的影响相对较小,可忽略不计。

#### 2.5.4 季节参数的设定

季节参数  $Z$  是经验常数,代表区域降水分布及其他水文地质特征,为 1 到 30 排序的标准值<sup>[3]</sup>,Budyko 干燥度指数理论证明, $Z$  值越高,或干旱指数较大或较小的地区,模型结果受季节参数  $Z$  影响越小<sup>[66]</sup>。Donohue 等人通过对澳大利亚气候条件的研究<sup>[67]</sup>表明,季节参数  $Z$  可表达为公式(7):

$$Z = 0.2 \times N \quad (7)$$

式中, $N$  表示每年降雨事件数。基于 Donohue 等人的研究,在国家气象局厦门站、崇武站(泉州)、漳州站、东山站(漳州)1954—2008 年日降水数据的基础上,统计了研究区 55 年来的降水次数(表 3),然后采用 55 年均降水次数赋值  $N$ ,并以此计算得研究区季节参数。

表 3 闽三角城市群 1954—2008 年降水次数统计表

| 气象站<br>Meteorological station | 总降雨次数<br>Total precipitation number | 年均降水次数<br>Average annual precipitation | 气象站<br>Meteorological station | 总降雨次数<br>Total precipitation number | 年均降水次数<br>Average annual precipitation |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| 厦门                            | 1856                                | 33.75                                  | 漳州东山                          | 1666                                | 30.29                                  |
| 泉州崇武                          | 1574                                | 28.62                                  | 合计(Total)                     | 7524                                | 34.20                                  |
| 漳州                            | 2428                                | 44.15                                  |                               |                                     |                                        |

### 3 结果与分析

#### 3.1 研究区潜在蒸散发量

本研究基于气温、降水的多年数据平均值及 2015 年天文辐射量,通过公式(4)计算得到研究区年度潜在蒸散发量(图 3)。从空间分布来看,闽三角城市群的潜在蒸散发量总体呈现东南部沿海一侧相对较高,区域西北部及西南部,远离海岸线的一侧相对较低,明显呈现自海岸带向内陆区域逐步递减的变化趋势;结合该区域地形地貌来看,蒸散发量同海拔呈明显负相关关系,即海拔较低的区域,蒸散发量相对较高,随着海拔的逐步升高,蒸散发量相应降低;结合研究区的土地利用方式发现,农田、建设用地、水域及滩涂用地类型广泛分布的区域蒸散发量相对较高,而林地和草地的分布区其蒸散发量相对较低。

#### 3.2 各用地类型植被根系深度、蒸散系数及季节参数

经数据及文献调研,并参考 FAO56 数据,本研究选取在农田用地类型中种植面积最广的水稻的最大根系深度将农田用地类型根系深度参数为 240 mm;林地选取该用地类型中的优势种的最大根系深度 1300 mm 设定林地用地类型的根系深度;草地由于其种类的多样性及分布的随机性,本研究选取大部分草地植物最大根系

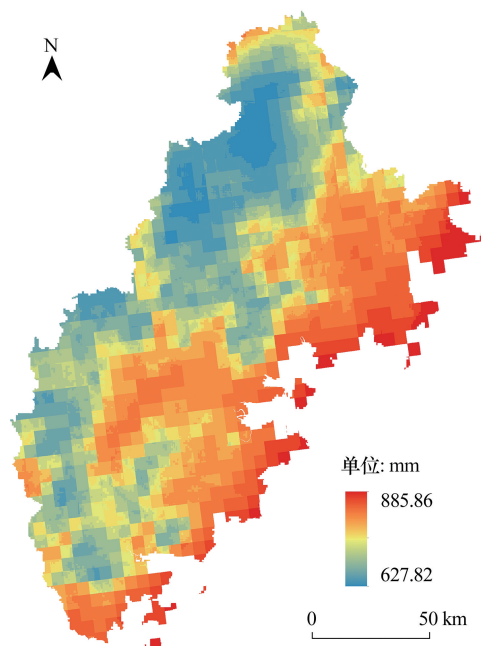


图 3 闽三角城市群年度潜在蒸散发量

Fig.3 The annual potential evapotranspiration in urban agglomeration of Golden Triangle of Southern Fujian

深度 500 mm 设定草地用地类型的根系深度参数;水域及滩涂用地类型同样选取该用地类型中优势种芦苇及美人蕉根系深度最大值 437 mm 设定水域及滩涂用地类型的植被根系深度;建设用地和其他土地用地类型由于其中植物分布较少,且较难统计其中的优势种,参考 InVEST 模型用户手册设置该用地类型植被根系深度参数为 1 mm<sup>[3]</sup>。

各用地类型的植被蒸散系数是在数据调研各用地类型主要植被类型的基础上,结合不同植被各生长阶段的蒸散系数(表 2),以选取的各用地类型的 4 类主导植被的平均蒸散系数的平均值表征该用地类型的蒸散系数,其分别为:农田用地类型 0.93、林地用地类型 0.95、草地用地类型 0.74、水域及滩涂用地类型 1.00。建设用地由于其植被类型的特殊性及其不确定性,本研究采用 InVEST 模型用户手册推荐的计算公式(6)并结合相关规定最终设定建设用地类型植被蒸散系数 0.28;其他土地用地类型的植被根系深度参照 FAO 56 的推荐设置为 0.30。

本研究采用 Donohue 等人对季节参数的确认方法,结合研究区 1954—2008 年平均降水次数数据计算得闽三角城市群季节参数  $Z$  为 6.8。文献显示,热带流域的季节参数  $Z$  为 4,温带流域季节参数  $Z$  为 9,本研究研究区的气候类型位于二者之间,与闽三角城市群地处相同气候区的太湖西苕溪流域,其季节参数  $Z$  经李文华研究团队测算结果为 6.5<sup>[68]</sup>,综合考虑上述各项因素,本研究认为将闽三角城市群区域的季节参数设置为 6.8 合理可行。

### 3.3 2015 年及 2030 年闽三角城市群产水量情景

就 InVEST 产水量模型模拟的 2015 年和 2030 年闽三角城市群产水量空间分布(图 4)来看,闽三角城市群区域产水量全域尺度呈现西多东少的基本分布格局,东部沿海岸线一侧产水量相对较少,远离海岸线的西部一侧产水量相对较为丰富,总体呈现由东部沿海向西部递减的分布规律;结合区域地形地貌特征来看,高产水量区域主要分布在海拔相对较高的区域,而地势较为平缓的区域产水量也相对较低;结合研究区各用地类型空间分布(图 1)来看,林地、草地用地类型具有相对较高的产水量,而农田、水域及滩涂、建设用地分布区域产水量总体较少;从数量变化的角度来看,闽三角城市群区域产水量最大值 1543 mm,最小值 129 mm,2015 年产水总量  $194.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,2030 年产水总量  $191.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相比总体下降  $3.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 4);产水量空间分布图(图 4)在分位数分类原则下,图 4 中每个分类均有相同的像元数量,从图例来看闽三角城市群大部分区域产水量在 672—1005 mm 之间,区域内产水量总体呈现明显的正态分布特征。从各用地类型的产水量及其变化(表 4)来讲,林地拥有最大的总产水量,各用地类型中农田和建设用地类型产水量变化最为明显,其中农田类型产水量下降  $3.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,建设用地类型产水量增加  $4.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 4 闽三角城市群 2015 年和 2030 年产水量及其变化状况/ $\text{m}^3$

Table 4 The variation in water yield in 2015 and 2030 in the urban agglomeration of Golden Triangle of Southern Fujian

| 用地类型<br>Type                    | 2015 年产水量<br>Water yield in 2030 | 2030 年产水量<br>Variation of water yield | 产水量变化<br>Variation of water yield per $\text{km}^2$ |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 农田 Cultivated land              | $44.92 \times 10^8$              | $41.05 \times 10^8$                   | $-3.87 \times 10^8$                                 |
| 林地 Woodland                     | $92.67 \times 10^8$              | $89.98 \times 10^8$                   | $-2.69 \times 10^8$                                 |
| 草地 Grassland                    | $36.17 \times 10^8$              | $35.46 \times 10^8$                   | $-0.72 \times 10^8$                                 |
| 水域及滩涂 Water area and tidal flat | $0.87 \times 10^8$               | $0.07 \times 10^8$                    | $3.69 \times 10^4$                                  |
| 建设用地 Construction land          | $19.32 \times 10^8$              | $23.50 \times 10^8$                   | $4.18 \times 10^8$                                  |
| 其他土地 Other land                 | $0.2185 \times 10^8$             | $0.2168 \times 10^8$                  | $-0.0017 \times 10^8$                               |
| 合计 Total                        | $194.11 \times 10^8$             | $191.08 \times 10^8$                  | $-3.03 \times 10^8$                                 |

### 3.4 2015 年及 2030 年闽三角城市群水源涵养情景

闽三角城市群 2015 年和 2030 年的水源涵养(图 5)同产水量(图 4)在分布格局和空间变化规律方面基本一致,总体呈现西多东少,由东向西逐步递减的空间分布规律;图 5 在分位数分类原则下每个分类有相同的像元数,基于此分析其空间分布来看,闽三角城市群区域水源涵养大部分在 344 mm 以下,占到全域的 5/6;闽

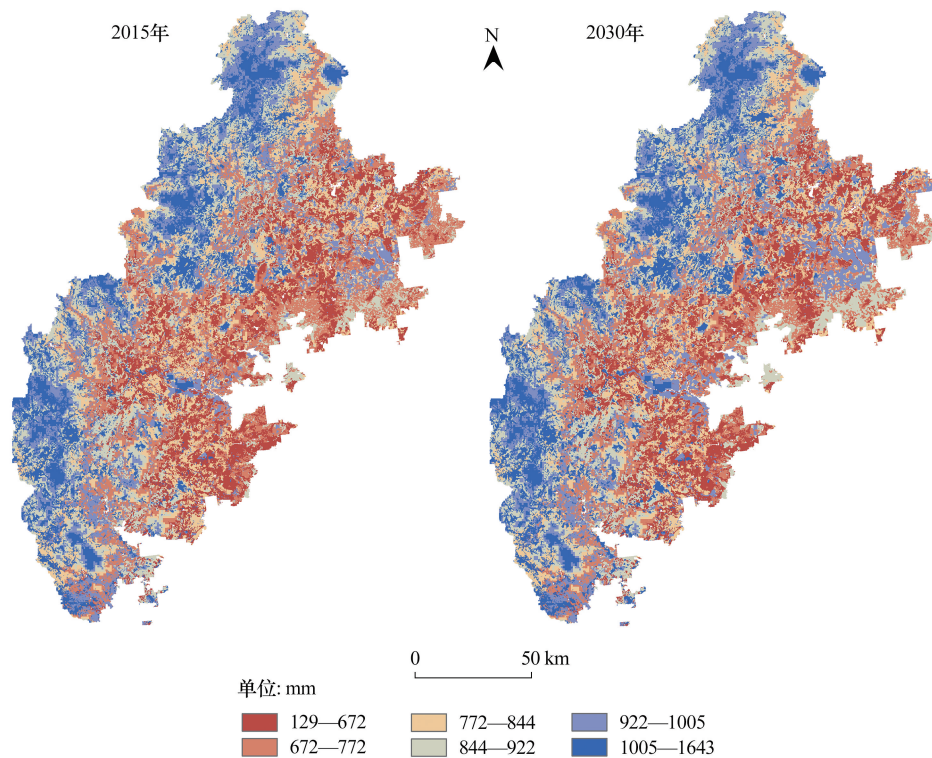


图 4 2015 年和 2030 年闽三角城市群产水量空间分布

Fig.4 The distribution of water yield in 2015 and 2030 in urban agglomeration of Golden Triangle of Southern Fujian

三角城市群水源涵养最大值 1419.63 mm, 主要出现在林地用地类型区域, 最小值 6.74 mm, 主要对应建设用地、农田等用地类型区域; 总量变化方面(表 5), 2015 年产水源涵养量  $10.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2030 年水源涵养量  $10.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 相比总体下降  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 5 闽三角城市群 2015 年和 2030 年土地利用及水源涵养量变化状况

Table 5 The variation in landuse and water yield in 2015 and 2030 in the urban agglomeration of Golden Triangle of Southern Fujian

| 用地类型<br>Type                       | 2015 年面积<br>Area in<br>2015/km <sup>2</sup> | 2030 年面积<br>Area in<br>2030/km <sup>2</sup> | 面积变化<br>Variation<br>of area | 2015 年水<br>源涵养<br>Water retention<br>of 2015/m <sup>3</sup> | 2030 年水<br>源涵养<br>Water retention<br>of 2030/m <sup>3</sup> | 水源涵<br>养变化<br>Variation of<br>water retention | 单位面积水<br>源涵养变化<br>Variation of<br>water retention<br>per/km <sup>2</sup> |
|------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 农田<br>Cultivated land              | 5604.21                                     | 4922.17                                     | -682.04                      | $1.28 \times 10^8$                                          | $1.03 \times 10^8$                                          | $-0.25 \times 10^8$                           | -36500                                                                   |
| 林地<br>Woodland                     | 12517.88                                    | 12180.02                                    | -337.86                      | $7.59 \times 10^8$                                          | $7.36 \times 10^8$                                          | $-0.23 \times 10^8$                           | -66241                                                                   |
| 草地<br>Grassland                    | 3954.67                                     | 3835.25                                     | -119.42                      | $1.40 \times 10^8$                                          | $1.35 \times 10^8$                                          | $-5.08 \times 10^6$                           | -42534                                                                   |
| 水域及滩涂<br>Water area and tidal flat | 758.48                                      | 957.94                                      | 199.46                       | $1.29 \times 10^6$                                          | $1.34 \times 10^6$                                          | 55830                                         | 280                                                                      |
| 建设用地<br>Construction land          | 2508.83                                     | 3448.98                                     | 940.15                       | $0.22 \times 10^8$                                          | $0.50 \times 10^8$                                          | $0.28 \times 10^8$                            | 29892                                                                    |
| 其他土地<br>Other land                 | 22.37                                       | 22.08                                       | -0.29                        | $7.49 \times 10^5$                                          | $7.34 \times 10^5$                                          | -14110                                        | -48655                                                                   |
| 合计 Total                           | 25366.44                                    | 25366.44                                    | 0.00                         | $10.52 \times 10^8$                                         | $10.28 \times 10^8$                                         | $0.24 \times 10^8$                            |                                                                          |

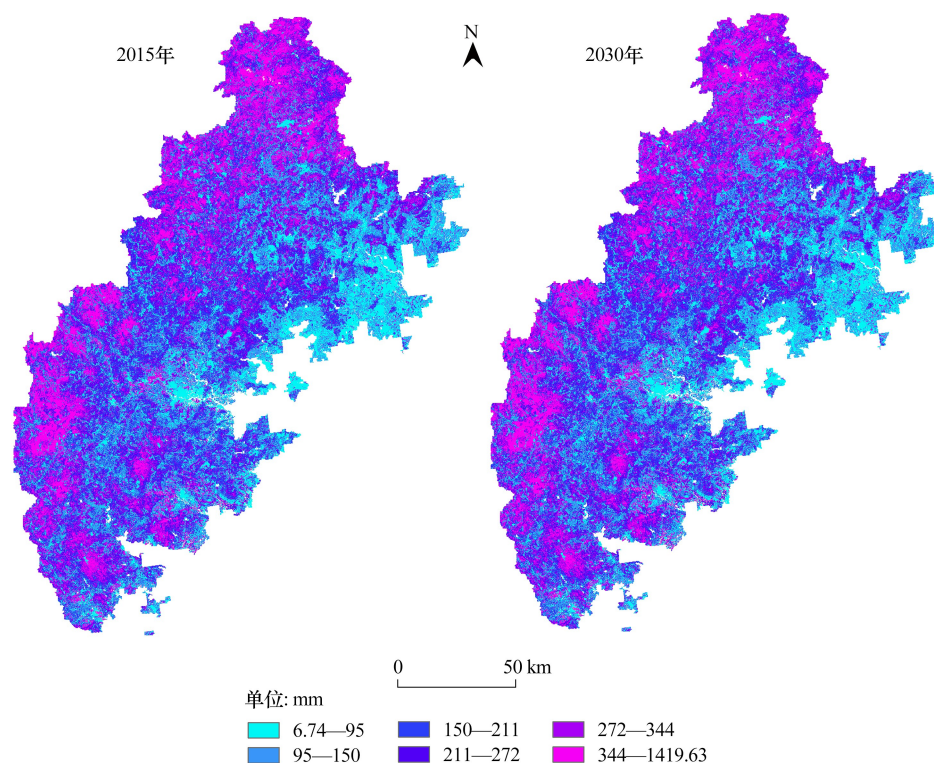


图5 2015年和2030年闽三角城市群水源涵养空间分布

Fig.5 The distribution of water retention in 2015 and 2030 in urban agglomeration of Golden Triangle of Southern Fujian

### 3.5 闽三角城市群土地利用变化对水源涵养量的影响

从闽三角城市群 2015 年和 2030 年土地利用与水源涵养量的变化状况(表 5)来看,水源涵养量同各用地类型的面积呈显著的正相关关系。从用地类型的角度讲,到 2030 年闽三角城市群农田、林地、草地及其他土地用地类型面积下降<sup>[25]</sup>,水源涵养量也相应减少,建设用地、水域及滩涂类型面积增加<sup>[25]</sup>,水源涵养量对应增加,其中面积下降幅度最大的农田用地类型水源涵养量下降  $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,面积增加幅度最大的建设用地类型水源涵养量对应增加  $0.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 5)。单从水源涵养量的增减幅度来讲,由建设用地、水域及滩涂用地面积增加而产生的水源涵养量增加并不能补偿由农田、林地、草地及其他土地面积减少造成的水源涵养量损失,由此导致了研究区 2030 年水源涵养量总体下降  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从单位面积变化对水源涵养影响的绝对量来看,其强度依次为林地、草地、其他土地、农田、建设用地和水域及滩涂,具体来讲,对水源涵养影响强度最大的林地用地类型面积减少  $1 \text{ km}^2$ ,水源涵养量损失  $6.62 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,对水源涵养影响强度最小的水域及滩涂用地类型面积增加  $1 \text{ km}^2$ ,水源涵养量相应只增加  $280 \text{ m}^3$ 。对比各用地类型面积增减幅度及水源涵养量变化关系发现,虽然面积同水源涵养量呈正相关关系,但面积增减仅意味着水源涵养量的增减,其增减幅度并不能表征水源涵养量的增减幅度。

### 3.6 模拟结果的置信度论证

为掌握模拟结果的可信度,确保结果的科学性及合理性,避免由于结果置信度较低造成的结论失真,本研究结合福建省发布的水资源总量对模拟结果的置信度进行了讨论。通常来讲水资源总量等于地表水资源量与地下水资源量之和<sup>[69-70]</sup>,产水量基于水量平衡算法,是降水输入量同蒸散发等消耗量的差值,从总量守恒的角度来讲,二者在本质上讲是采用不同方法对同一资源量的计算。基于此本研究检索福建省水利厅发布的《福建省水资源公报》<sup>[71]</sup>显示,2015 年闽三角城市群区域水资源总量为  $229.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相比本研究模拟的闽三角城市群 2015 年产水量  $194.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,总体精度 84.64%,从该精度来讲模拟结果相对可信。

## 4 讨论

### 4.1 水源涵养变化影响因子的多元复合性

水源涵养的影响因子中土地利用变化只是其中之一,它主要通过改变下垫面的类型和结构来直接或间接地影响水源涵养过程<sup>[72]</sup>,其作用方式首先表现为改变土壤质地、结构,通过对土壤孔隙度的作用来影响水源涵养量<sup>[73-74]</sup>;其次表现为改变下垫面类型及特征进而影响水文过程<sup>[75]</sup>,譬如土地利用变化导致的地表覆被变化会使地表蒸散发量发生较为明显的变化,从而影响生态系统的水源涵养量;再次土地利用变化还通过影响其他因子从而作用于生态系统水源涵养服务,譬如土地开发利用导致的生态系统退化<sup>[76-77]</sup>,就在间接地影响着生态系统的水源涵养。从土地利用变化对水源涵养的作用方式来看,是一个多途径复合的过程,而生态系统水源涵养变化又是多因子复合作用的结果,所以生态系统水源涵养变化是一个复合的、由多因子耦合驱动的生态过程<sup>[78-79]</sup>,是集合了自然、社会、经济等多方因子同作用的结果<sup>[80]</sup>,因此生态系统水源涵养变化具有其多元复合性,是包括土地利用变化在内的多种影响因子共同作用的结果。

### 4.2 模型变量数据的选取及替代存在其局限性

本研究在模拟过程中为凸显土地利用变化对水源涵养的作用,在对 InVEST 模型相关变量数据的选取及处理中,将除土地利用变化外的其他变量因子均采用多年平均值数据予以替代的方法存在一定程度的局限性。对于替代的数据,譬如蒸散发量假定 2015 年和 2030 年相对保持一致,这就使得两个模拟年份之间太阳辐射量的差异被消除;降水采用多年平局值代替则消除了降水的年际差异;植物根限深度采用土壤绝对深度(即地表到岩层的深度)在一定程度高估了植物根系可存在的最大深度;最后植物可利用水含量采用 200cm 深度植物枯萎点的有效土壤含水量相对也有所高估。以上问题对模型模拟的准确性存在一定的影响,但考虑到模拟结果相对更多的取决于模型蒸散发系数( $K_c$ )和各用地类型植被根系深度参数的影响,一定程度修正了上述高估问题带来的模拟误差,从而使得模拟结果仍处于相对可信的置信区间。但就其普适性来讲,应具体问题具体分析,本研究之所以选用数据替代除了未来数据获取难度较大外,更在于要突出土地利用变化的作用,尽可能降低其他变量对模拟结果造成过多的差异化影响,所以如果并非在类似研究背景下该方法并不具有广泛的适用性。

### 4.3 影响响应关系的不可逆特征

土地利用变化和水源涵养影响响应关系的不可逆特征主要表现在以下两个方面:

第一,本研究发现的农田、林地、草地及其他土地用地类型面积的减少会导致对用区域水源涵养量一定程度的下降,建设用地和水域及滩涂面积的扩大会导致水源涵养量相应的增加,该结论基于每类用地类型内部均质的假定,即假定所有用地类型内部无差别,仅是从各用地类型量变的角度进行了研究,并未考虑各用地类型质的差别,但如需考虑各用地类型内部质的差异,则农田、林地、草地及其他土地用地类型面积的增加不一定能够产生同面积下降等量的水源涵养量增加,同时建设用地、水域及滩涂用地类型面积下降不一定能够对应的增加等量的水源涵养量,也就是说林地增加  $1 \text{ km}^2$ ,不一定新增  $6.62 \times 10^4 \text{ m}^3$  的水源涵养量。

第二,本研究发现水源涵养量同用地类型面积呈正相关关系,即用地类型面积增加则水源涵养相应增加,但该影响相应关系并不具有可逆性,即水源涵养的增加并不一定意味某用地类型面积的增加,也可能是由于该区域生态系统服务质量提升所造成的。

### 4.4 研究结论的地域局限性

由于气候、地形地貌、土壤类型及结构、地表覆被物、土地利用方式、社会经济发展状况等影响因子的时空差异、生态系统服务时空尺度差异<sup>[81]</sup>、多尺度联动特征<sup>[82-83]</sup>及其生态系统服务异质性<sup>[84]</sup>等因素的差异,本研究的结果及结论在其他区域或相同区域的不同时空尺度是否具有广泛的适用性和准确性仍有待进一步研究的论证。

### 4.5 土地利用变化对水源涵养作用途径及方式的多样性

土地利用对水源涵养的影响除了表现在面积变化以及面积变化后的补偿作用、变化方向以及不同用地类

型影响强度的差异等较为直接的方面外,还应包括很多较为间接的方面,譬如土地利用变化导致的社会、经济变化引起的环境政策对生态系统服务的影响,土地利用传统及文化对对生态系统的作用,土地利用变化作用下的全球变化对生态系统服务产生的影响等。总之土地利用变化对水源涵养的影响不仅仅表现为文中提到的各方面,它对水源涵养乃至所有生态系统服务的作用呈现空间化的复杂网络化结构,且诸多的作用方式和途径之间交互耦合,形成复合的作用系统。所有本研究涉及到的作用方式只是土地利用对水源涵养乃至所有生态系统服务最表面、最简单的途径及方式,就产生影响的整体途径和方式而言存在相对的局限性。

## 5 结论

基于上述研究,本研究发现闽三角城市群到 2030 年区域内水源涵养量总体下降  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;就土地利用变化对水源涵养的影响来看主要表现为的几个方面:首先,面积变化对水源涵养量的影响方面,水源涵养量同用地类型面积正相关,但二者的变化量并不正相关,即面积的增减能够体现水源涵养量的增减,但面积的增减幅度并不能表征水源涵养量的增减幅度;其次,土地利用变化方向对水源涵养的影响方面,相比变化为城市生态系统和水域生态系统而言,变化为自然生态系统和农业生态系统的土地利用变化更有利于生态系统水源涵养;再次,土地利用变化对水源涵养产生作用的强度由强及弱以此为林地、其他土地、草地、农田、建设用地、水域及滩涂;最后,面积变化后的补偿作用方面,由于不同用地类型水源涵养能力和面积变化量的差异,由农田、林地、草地及其他土地面积下降导致的水源涵养量损失并不能通过建设用地、水域及滩涂用地类型面积的增加得以完全补偿。

## 参考文献 (References):

- [1] Charles J. Vörösmarty, Pamela Green, Joseph Salisbury, Richard B. Lammers. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth: *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [2] 姜文来. 水资源价值论. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 斯坦福大学伍兹环境研究所, 世界自然保护基金会, 大自然保护协会, 明尼苏达大学环境研究所. 生态系统服务评估与权衡 (InVEST) 模型 (3.2.0 版本) 使用手册. (2017-10) [2018-07-11]. <http://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest/>
- [4] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.
- [5] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 余新晓, 饶良懿. 中国森林生态系统水源涵养功能. *水土保持研究*, 2005, 12(4): 223-226.
- [6] Daisy Núñez, Laura Nahuelhual, Carlos Oyarzún. Forests and water: The value of native temperate forests in supplying water for human consumption: *Ecological Economics*, 2006, 58(3): 606-616.
- [7] Li B L Turner, Skole, David, Sanderson, Steven, Fischer, Gunther, Fresco Louise, Leemans Rik. IGBP Report No. 35 and HDP Report No. 7 Land-Use and Land-Cover Change Science/Research Plan, 2000.
- [8] MA, M. E. A. Millennium Ecosystem Assessment 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, Island Press, Washington DC., 2005.
- [9] Zheng Z M, Fu B J, Hu H T, Sun G. A method to identify the variable ecosystem services relationship across time: a case study on Yanhe Basin, China: *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1689-1696.
- [10] Su C H, Fu B J, Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes: *Global & Planetary Change*, 2013, 101(1): 119-128.
- [11] 夏军, 朱一中, 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269.
- [12] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素: *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [13] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 巩国丽, 赵国松. 2000—2010 年我国重点生态功能区生态系统变化状况: *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2758-2766.
- [14] Yang D, Liu W, Tang L Y, Chen L, Li X Z, Xu X L. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model: *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 133-143.
- [15] 程建, 程久苗, 吴九兴, 徐玉婷. 2000—2010 年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化: *长江流域资源与环境*, 2017, 26(6): 894-901.
- [16] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果. 京津冀城市群扩张模式对区域生态安全的影响预测: *生态学报*, 2018, 38(5): 1650-1660.
- [17] 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 孙然好. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策: *生态学报*, 2016, 36(22): 7125-7129.
- [18] 赵丹, 李锋, 王如松. 城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例: *生态学报*, 2013, 33(8): 2343-2349.

- [19] 李文楷, 李天宏, 钱征寒. 深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响: 自然资源学报, 2008, 23(3): 440-446.
- [20] 陈文群, 林琳. 福建省水资源安全与对策研究, 能源与环境, 2008(4): 89-91.
- [21] 朱立晨, 王宏伟, 唐立娜. 闽三角区域生态系统服务重要性评价及其空间分布: 生态学报, 2018, 38(20):
- [22] 王春菊, 汤小华. 基于 GIS 的水源涵养功能评价研究——以福建省为例: 安徽农业科学, 2007, 35(28): 9090-9091.
- [23] 张海龙, 张乾, 龚围, 辛晓洲, 李丽, 柳钦火. 一带一路及其毗邻区域 5km 分辨率太阳总辐射量数据集(2015) (B&R\_SR\_5km\_2015) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统. DOI: 10.3974/geodb.2017.03.14.V1 (2017-10) [2018-05-18]. <http://geodoi.ac.cn/WebCn/Default.aspx>
- [24] 宁晓菊, 秦耀辰, 崔耀平, 李旭, 陈友民. 中国 10 年平均水热条件变化公里网格数据集(1951-2010) (Hydrothermal\_China\_1km\_1951-2010) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, DOI: 10.3974/geodb.2016.01.07.V1. (2016-03) [2018-05-18]. <http://geodoi.ac.cn/WebCn/Default.aspx>
- [25] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 邱全毅, 王琳, 唐立娜. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例. 生态学报, 2019, DOI: 10.5846/stxb201808021649.
- [26] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [27] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法, 生态学报, 2009, 28(3): 529-534.
- [28] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法, 生态学报, 2013, 33(04): 1019-1030.
- [29] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 盖力强. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究: 自然资源学报, 2010, 25(4): 585-593.
- [30] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务: 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [31] 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.
- [32] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控: 生态学报, 2013, 33(3): 711-717.
- [33] 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.
- [34] 马良, 金陶陶, 文一惠, 吴秀芹, 刘桂环. InVEST 模型研究进展: 生态经济(中文版), 2015, 31(10): 126-131.
- [35] 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.
- [36] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化: 应用生态学报, 2013, 24(1): 183-189.
- [37] 仇杰, 陈建宏, 李晓光. 贵德水文站水面流速系数分析: 甘肃水利水电技术, 2011, 47(1): 11-13.
- [38] 雍斌, 张万昌, 刘传胜. 基于改进型多流向算法的地形指数空间尺度变化分析: 地理科学, 2007, 27(5): 683-688.
- [39] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析: 地理科学进展, 2002, 21(2): 103-110.
- [40] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数: 水科学进展, 2010, 21(2): 214-221.
- [41] 陈效民, 潘根兴, 王德建, 李宝山. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究: 水土保持通报, 2000, 20(5): 11-12.
- [42] 宋恒川, 陈丽华, 吕春娟, 王萍花. 华北土石山区四种常见乔木根系的形态研究: 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 194-199.
- [43] Cairns M A, Brown S, Baumgardner H G A. Root Biomass Allocation in the World's Upland Forests, Oecologia, 1997, 111(1): 1-11.
- [44] 彭少麟, 郝艳茹. 森林演替过程中根系分布的动态变化: 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(5): 65-69.
- [45] 吴伟明, 宋祥甫, 孙宗修, 于永红, 邹国燕. 不同类型水稻的根系分布特征比较: 中国水稻科学, 2001, 15(4): 276-280.
- [46] 川田信一郎. 水稻的根系, 北京: 农业出版社. 1984.
- [47] 侯丹平, 余超, 刘海浪, 蔡晗, 张宇翔, 朱庆权, 周益雷, 景文疆, 张耗. 水稻高产高效的根系特性及其调控: 中国稻米. 2018, 24(4): 3-8.
- [48] 朱德峰, 林贤青. 超高产水稻品种的根系分布特点: 南京农业大学学报, 2000, 23(4): 5-8.
- [49] 福建省森林资源管理总站. 福建省第八次全国森林资源清查及森林资源状况调查报告: 福建林业, 2014(2): 9-10.
- [50] 陈苏英. 不同家系杉木根系三维构型的差异及其对养分胁迫的响应研究. 福建农林大学. 2014.
- [51] 李振问, 杨玉盛, 吴擢溪, 赖仕璋. 杉木火力楠混交林根系的研究: 生态学杂志, 1993, 12(1): 20-24.
- [52] 方文才. 探讨马尾松根系生物量的空间分布: 低碳世界, 2015(11): 312-313.
- [53] 程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 封晓辉, 刘泽彬, 葛晓改, 王晓荣, 张炜银. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布: 生态学报, 2012, 32(3): 823-832.
- [54] 张治军, 王彦辉, 于澎涛, 袁玉欣, 李志勇, 张国增, 刘英亘. 不同优势度马尾松的生物量及根系分布特征: 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 71-75.
- [55] 骆仁祥, 张春霞, 王福升, 刘国华. 毛竹等 3 个竹种的根系分布特征及其林地土壤抗冲性比较研究: 竹子研究汇刊, 2009, 28(4): 23-26.
- [56] 武春华, 陈云明, 王国梁, 卢建利. 黄土丘陵区典型植物群落根系垂直分布与环境因子的关系: 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 65-70.

- [57] 王桂尧, 周欢, 夏旖琪, 沙琳川, 周红贵. 草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验; 中国公路学报, 2018, 31(2): 234-241.
- [58] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 高进长, 阎丹丹. 三峡库区消落带几种草地根系分布及土壤养分变化; 水土保持研究, 2015, 22(2): 151-157.
- [59] 黄德华, 陈佐忠. 内蒙古锡林郭勒沙地草场 49 种植物根系分布深度的初步观察; 中国草地学报, 1986, 31-32.
- [60] 徐德福, 李映雪, 方华, 赵晓莉. 4 种湿地植物的生理性状对人工湿地床设计的影响; 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 587-591.
- [61] 赵建刚, 杨琼, 陈章和, 黄正光. 几种湿地植物根系生物量研究; 中国环境科学, 2003, 23(3): 290-294.
- [62] 陈浩, 余毅敏, 唐旭栋, 周之静, 赵雅青. 浦阳江下游江岸草本植物根系对土壤抗冲性的影响; 水土保持研究, 2017, 24(2): 60-63.
- [63] Allen. R G, Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study; Journal of Hydrology, 2000, 229(1): 27-41.
- [64] Waller P, Yitayew M. Irrigation and Drainage Engineering || Crop Evapotranspiration, Springer International Publishing, 2016.
- [65] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 国家园林城市标准; 中国园林. 2000, 16(3).
- [66] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, Chiew F H S, Western A W, Briggs P R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration; Water Resources Research, 2004, 40(2): n/a-n/a.
- [67] Donohue R J, Roderick M L, Mcvcar T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model; Journal of Hydrology, 2012, 436-437: 35-50.
- [68] Zhang C, Li W H, Zhang B, Liu M. Water Yield of Xitiaoxi River Basin Based on InVEST Modeling; Journal of Resources & Ecology. 2012, 3(1): 50-54.
- [69] 段乔文, 李林涛, 俞富有, 何继永. 关于水资源总量计算的探讨; 地质灾害与环境保护. 2006, 17(3): 14-16.
- [70] 金栋梁, 刘予伟. 水资源总量; 水资源研究. 2006(1): 3-5.
- [71] 福建省水利厅. 福建省水资源公报. 福建水利信息网. (2016-07-20) [2018-09-11]. <http://slt.fujian.gov.cn/>
- [72] Anand J, Gosain A K, Khosa R. Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model; Science of the Total Environment, 2018, 644: 503-519.
- [73] Taye G, Poesen J, Van Wesemael B, Vanmaercke M, Tekle D, Deckers J, Goosse T, Maetens W, Nyssen J, Hallet V, Haregeweyn N. Effects of land use, slope gradient, and soil and water conservation structures on runoff and soil loss in semi-arid Northern Ethiopia; Physical Geography, 2013, 34(3): 236-259.
- [74] 文志, 赵赫, 刘磊, 欧阳志云, 郑华, 米红旭, 李彦旻. 土地利用变化对海南土壤水源涵养功能的影响. 应用生态学报, 2017(12): 214-222.
- [75] Pamukcu P, Erdem N, Serengil Y, Randhir T O. Ecohydrologic modelling of water resources and land use for watershed conservation; Ecological Informatics. 2016, 36: 31-41.
- [76] Saha D, Kukal S S. Soil Structural Stability and Water Retention Characteristics Under Different Land uses of Degraded Lower Himalayas of North-West India. Land Degradation & Development, 2015, 26(3): 263-271.
- [77] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化; 地理研究, 2016, 35(4): 664-676.
- [78] Lv X Z, Zuo Z G, Xiao P Q. Evaluation of water conservation capacity of loess plateau typical mountain ecosystems based on InVEST model simulation, 3rd International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering; IOP Conference Series-Earth and Environmental Science, 2017, 69: 012030.
- [79] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望; 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- [80] Hamel P, Guswa A J, Wemple B C, Mohammed I N, Sharp R. The value of simple models; Performance of a spatially-explicit seasonal model for valuing water provisioning (InVEST); Agu Fall Meeting, 2015.
- [81] Jenerette G D, Potere D. Global analysis and simulation of land-use change associated with urbanization. Landscape Ecology, 2010, 25(5): 657-670.
- [82] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全; 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [83] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [84] Gong S H, Xiao Y, Xiao Yi, Zhang L, Ouyang Z Y. Driving forces and their effects on water conservation services in forest ecosystems in China; Chinese Geographical Science, 2017, 27(2): 216-228.