

InVEST 模型在市县级水源涵养功能评价中的应用

——以广东省广州市为例

陈德权¹, 兰泽英², 陈晓辉², 李玮麒², 周园¹, 唐玲¹, 汪润芝¹

(1.广东省海洋发展规划研究中心, 广东 广州 510220; 2.广东工业大学 管理学院, 广东 广州 510520)

摘要: [目的] 评估 InVEST 模型应用在市县级水源涵养功能重要性评价的适用性, 探析以海绵城市建设试点且高度城市化的广东省广州市水源涵养服务时空变化特征与区域差异, 为区域社会经济发展、生态环境保护与恢复政策的制定提供理论依据。[方法] 利用对比分析法分别评估 InVEST 水源涵养评估模型与相关“指南”——《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术“指南”》推荐模型在区域水源涵养服务相关结果评价中的精确性, 并利用 GIS 空间分析方法分析 2013—2017 年广州市的水源涵养服务时空分异特征。[结果] ① 基于 InVEST 的水源涵养评估模型评估结果精度高, 水源涵养功能重要性评价结果同样符合要求。② 广州市水源涵养总量呈现先升后降, 总体保持一定增长的态势, 高值集中在水域和东北部多林地区, 低值集中在城市中心建成区。③ 区域整体水源涵养功能提升, 但不同行政区划和地类存在差异, 行政区中海珠区、番禺区和荔湾区提升较大; 地类中耕地和建设用地有所提升, 林地基本不变, 而草地有所减弱。④ 各水源涵养功能重要性分区面积比例接近, 但各分区内部不同地类比例存在差异。[结论] ① 基于 InVEST 的水源涵养评估模型相比“指南”模型准确性更高, 在规划领域具有很好的应用前景。② 广州市水源涵养量空间分异明显, 2013—2017 年整体水源涵养功能提升。

关键词: 水源涵养; 模型验证; 时空变化; InVEST 模型; 广州市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)04-0196-11

中图分类号: X171.1

文献参数: 陈德权, 兰泽英, 陈晓辉, 等. InVEST 模型在市县级水源涵养功能评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 196-206. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.028; Chen Dequan, Lan Zeying, Chen Xiaohui, et al. Application of InVEST model in evaluation of water conservation function at city and county-level [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 196-206.

Application of InVEST Model in Evaluation of Water Conservation Function at City and County-level

—A Case Study in Guangzhou City, Guangdong Province

Chen Dequan¹, Lan Zeying¹, Chen Xiaohui², Li Weiqi², Zhou Yuan¹, Tang Ling¹, Wang Runzhi¹

(1. Research Centre for the Marine Development and Planning of Guangdong Province, Guangzhou,

Guangdong 510220, China; 2. Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract: [Objective] The applicability of the InVEST model in the evaluation of the importance of water conservation functions at the city and county level was assessed, and the spatiotemporal characteristics and regional differences of water conservation services in Guangzhou City, Guangdong Province was analyzed, in order to provide a theoretical basis for regional socio-economic development and the formulation of ecological environmental protection and restoration policies. [Methods] Using comparative analysis, the accuracy of InVEST water conservation evaluation model and related guidelines (*Technical Guide for Carrying Capacity of Resources and Environment and Suitability Evaluation of Land Spatial Development*) recommended model in regional water conservation services was evaluated. And GIS spatial analysis method was used to analyze the spatial and temporal analysis of water conservation service in Guangzhou City from 2013 to 2017. [Results]

收稿日期: 2020-03-31

修回日期: 2021-04-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“地学知识协同蚁群智能计算的土地利用高分辨率遥感影像分类”(41301377)

第一作者: 陈德权(1996—), 男(瑶族), 湖南省邵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与土地利用。Email: c1304030168@163.com。

通讯作者: 兰泽英(1983—), 女(汉族), 贵州省贵阳市人, 博士, 副教授, 主要从事遥感影像解译和 3S 集成技术在土地管理中的应用研究。Email: lzy-lzy@163.com。

- ① The evaluation results of the water conservation evaluation model based on InVEST were highly accurate, and the evaluation results of the importance of water conservation functions also met the requirements.
- ② The total amount of water conservation in Guangzhou City increased first and then decreased, and maintained a certain growth trend. The high values were concentrated in the water area and the forested area in the northeast, while the low values were concentrated in the built-up area of the city center.
- ③ The overall water conservation function had been improved, but differences existed among different administrative divisions and land types. The administrative regions of Haizhu District, Panyu District and Liwan District had increased greatly, the cultivated land and construction land had been improved, forest land had remained unchanged basically, while grassland had been weakened.
- ④ The proportion of area of water conservation function importance zone was similar, but the proportion of different land types within each zone was different. [Conclusion]
- ① Compared with the guide model, the water conservation assessment model based on InVEST is more accurate and has a good application prospect in the field of planning.
- ② The spatial differentiation of water conservation in Guangzhou City is obvious, and the overall water conservation function has been improved from 2013 to 2017.

Keywords: water conservation; model validation; temporal and spatial changes; InVEST model; Guangzhou City

全球气候变暖、城市化发展与人口增长引发水资源需求与日俱增、水环境急剧恶化,水资源短缺已成为全球共同关注的问题^[1]。水源涵养功能作为生态系统水文服务功能的关键,国土空间规划中资源环境承载力评价的重要一环,科学评价其变化发展情况,对维持人类社会可持续发展和生态安全至关重要。水源涵养功能指对水资源涵养的能力,主要表现在降水拦蓄、径流调节、影响降水量与净化水质等方面^[2]。目前,国内外学者们对水源涵养功能的评价研究主要是基于定量模型的空间可视化分析,主要包括水量平衡法^[3-4]、降水贮存法^[5]、土壤蓄水能力法^[6]、综合蓄水能力法^[7-8]与多因子分析法等^[9-10]方法。其中,以水量平衡法为基础的 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型,因对特征数据要求较低同时延展性较好在水源涵养功能实证研究方面得到广泛应用,现阶段已取得丰硕的研究成果^[11-17]。但依旧存在以下两点问题:①研究区过于局限,主要集中在干旱区、水资源丰富区或特定流域等区域,而较少涉足高度城市化发展的区域;②模型定量评估结果缺乏现实背景的适用性验证,同时基于评估结果的研究分析不够深入。现有的大部分研究成果是基于 InVEST 模型的评估结果直接展开研究,并且集中关注特定用地类型的水源涵养功能变化,而对水源涵养功能的相关政策背景以及区域城市化发展水平等方面关注不足。在国土空间规划、海绵城市建设等政策背景下,对高度城市化发展区域展开水源涵养功能评价与分析产生了新的研究意义。因此,本文以高度城市化发展的海绵城市试点建设城市——广东省广州市为研究区,基于 InVEST 模型定量评估区域水源涵养功能,并从模型评估精度和重要性分级合理性两方面验证基于 InVEST 模型评估

结果的现实适用性与科学性,探讨 InVEST 模型在市县级国土空间规划中水源涵养功能评价的合理性。在此基础上,对广州市 2013—2017 年整体水源涵养功能时空变化特征、不同空间单元的功能变化以及重要性等级划分等方面进行深入分析,以期为区域社会经济发展和生态环境保护与恢复政策的制定提供一定的指导依据,同时为其他相关研究提供一定的思路。

1 研究区概况

广州市坐落于广东省中南部(112°57'—114°03'E, 22°26'—23°56'N),地处珠江三角洲北沿,邻近南海,广东省省会,被称为中国的“南大门”,土地总面积为 7 434 km²。地貌类型复杂多样,背山面水,北部多为山林,中部多丘陵地形,南部主要沿海冲积平原构成,河网密集。气候类型为亚热带海洋性季风气候,全年平均气温在 20~22℃之间,多台风,降雨量充沛,年降雨量约为 1 720 mm。改革开放以来,广州市凭借优越的地理区位与历史发展条件,经济持续快速增长,经济实力显著增强。但与此同时,城市不断向外扩张与人口持续涌入使得城市生态环境也承受着不断增大的压力,面临着包括生境破化、水资源生态环境和生物多样性受到威胁、城市内涝和大气污染等一系列问题。

2 研究方法与研究数据

2.1 研究方法

2.1.1 基于 InVEST 的水源涵养评估模型 InVEST 模型是由斯坦福大学与多机构协同设计开发的一款对生态系统服务进行定量评估的模型。模型能够简便、高效的量化评估研究区域的生态系统服务功能,并且可以在各式情境下就生态系统服务价值和变化

进行定量研究^[18]。而基于 InVEST 的水源涵养评估模型^[15]则是在 InVEST 模型上进行了拓展,具体分为两大步骤:①基于 InVEST 产水量模块的研究区产水量计算。基于 InVEST 模型的产水量计算是一种典型水量平衡估算方法,其综合降水量、土层深度与植物根系深度,地表蒸发作用和植物蒸腾作用等因素。②基于产水量计算结果和修正模型的水源涵养量计算。在研究区产水量计算结果的基础上,采用由土壤饱和和导水率、地形指数和流速系数构成的修正模型对产水量结果修正得出水源涵养量,其中河流水库等水域则不做修正处理。整个水源涵养评估过程中的相关计算公式与方法为:

(1) 产水量计算

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

$$AWC_x = \min(S_{d\max}, R_d) \times PAWC \quad (5)$$

$$ET_0 = 0.000\ 939 \times R_a \times (T_a + 17.8) \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (6)$$

式中:PAWC 为植物可利用水量; $S_{d\max}$ 为土壤最大深度; R_d 为根系分布深度; R_a 太阳大气顶层辐射 [$\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$]; T_a 为日最高温均值和日最低温均值的平均值 ($^{\circ}\text{C}$); T_{\max} 是日最高温均值; T_{\min} 是日最低温均值的差 ($^{\circ}\text{C}$)。

(2) 水源涵养量计算

$$R = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times \text{TI}}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K}{300}\right) \times Y \quad (7)$$

式中: R 指单位栅格的水源涵养量 (mm); K 为土壤饱和和导水率 (cm/d), 由 Spaw 软件结合土地利用类型得出; V 指流速系数; TI 指地形指数; Y 为产水量。

2.1.2 “指南”模型 “指南”模型是指《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术“指南”》(下称“指南”)^[19]即“指南”中水源涵养重要性评价的建议方法。该“指南”指出以水源涵养量作为区域生态系统水源涵养功能重要性的评估指标,可以利用其推荐的评估模型来计算,表达式为:

$$WR_i = P_i - ET_i - R_i \quad (8)$$

$$R = P \cdot \alpha \quad (9)$$

式中: WR , ET_i , R_i 分别为栅格 i 的水源涵养量、蒸散量和地表径流量; P , α 分别为多年平均降水量和地表径流因子; 地表径流因子参照“指南”中的类型表和文献^[20]。

2.2 研究数据

本文所需的基础数据包括土地利用/覆被、气象、DEM、NDVI、土壤以及水资源公报等相关数据。其中,土地利用/覆被数据来源于美国地质勘查局 (<https://glovis.usgs.gov/>) 2013—2017 年 5 期 Landsat 8 遥感影像数据; 气象数据来源于国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>) 的中国地面气候资料日值数据

式中: Y_{xj} 为 j 地类栅格单元 x 的产水量总和; P_x 为栅格单元 x 的年平均降水量; AET_{xj} 为 j 地类栅格 x 的年平均蒸散发量,由公式(2)计算。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

式中: R_{xj} 是 j 地类栅格 x 的 Bydyko 干燥指数,由公式(3)计算; ω_x 为植被可利用水系数,由公式(4)计算。

$$R_{xj} = \frac{k \times ET_0}{P_x} \quad \left[k = \min\left(1, \frac{\text{LAI}}{3}\right) \right] \quad (3)$$

$$\omega_x = Z \times \frac{\text{AWC}_x}{P_x} \quad (4)$$

式中: k 为植被系数; LAI 为植被叶面积指数; Z 为季节性降雨指数; AWC_x 为土壤有效含水量,由公式(5)计算; ET_0 为潜在蒸散发量 (mm/d),由公式(6)计算。

集(v3.0); DEM 数据来源于地理空间数据云,分辨率为 30 m; NDVI 数据与土壤相关数据来源于中国科学院资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>), 《广东土种志数据集》,世界土壤数据库 (HWSD, harmonized world soil database); 水资源公报数据来源于广州市水文局官网。通过上述基础数据的计算与处理获得模型输入所需的各种参数(表 1)。

3 结果与分析

3.1 模型精度验证对比及分析

本文将基于 InVEST 的水源涵养评估模型与“指南”模型在产水量模拟精度和水源涵养重要性评价两方面进行对比分析以分析两个模型的精度与科学性。其中,按照“指南”模型计算公式,以 2013—2017 年多年平均降雨量和蒸散量为参数,以 2015 年土地利用/覆被类型为地表径流覆被类型,计算研究区水源涵养量。而在水源涵养功能重要性划分上,参考“指南”中的划分标准,将累计水源涵养量的前 50% 的区域确定为水源涵养极重要区域,重要性最高的两级作为水源涵养极重要区域,而剩余的区域按照

分位数分为 3 类区域。从产水量模拟结果来看(表 2),基于 InVEST 的水源涵养评估模型模拟的产水量与公报统计的水资源总量多年平均值的吻合度

为 88.42%,与实际情况大体相符,而“指南”模型的吻合度仅为 68.63%,说明 InVEST 模型产水量模块在产水量模拟上表现出较高的准确性,具有明显优势。

表 1 InVEST 模型所需参数说明

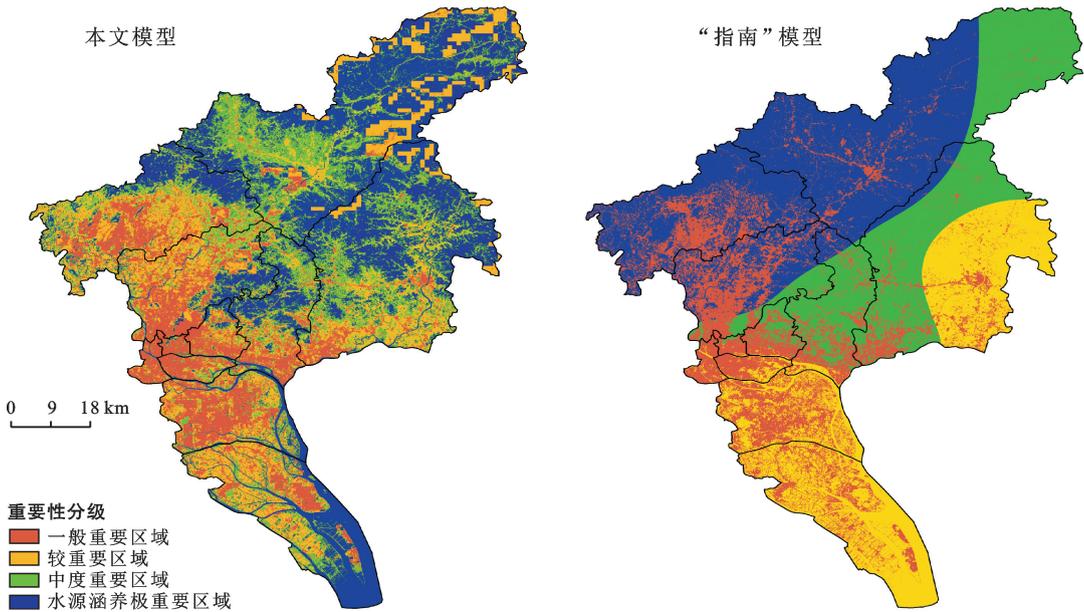
| 参数类型 | 所需参数 | 参数来源 |
|--------------|-----------|---|
| 气候因子参数 | 年降水量 | 根据广州市统计年鉴公布的广州、增城、番禺、从化、花都 5 个站点数据,采用反距离权重法进行空间插值获得 |
| | 潜在蒸散量 | 基于 Hargreaves 公式,参考赵永的经验系数 ^[21] ,根据降雨量、太阳大气顶层辐射量、日最高温均值和日最低温均值来求得 |
| 土地利用/覆被及相关参数 | 土地利用/覆被类型 | 下载自地理空间数据云的 15 m 空间分辨率的 Landsat 8 系列 2013—2017 年原始遥感影像数据,参考《土地利用现状分类标准(GB/T21010-2007)》,基于神经网络分类法获得 |
| | 植被蒸散系数 | 基于土地利用/覆被分类结果,参照 InVEST3.2 用户手册获得各地类的具体数值 |
| | 流速系数 | 基于土地利用/覆被分类结果,参照文献 ^[15] 确定各地类的具体数值 |
| | 植被可利用含水量 | 基于土壤普查数据,参照相关研究 ^[23] ,由田间持水量和永久萎蔫系数的差值获得。 |
| | 土层深度 | 基于 HWSD 中的中国数据集处理获得 |
| 固定参数 | 地形指数 | 基于 DEM 数据,由 ArcGIS 10.6 软件综合处理而得 |
| | 土壤饱和导水率 | 基于 HWSD 数据集,综合考虑土壤类型、沙粒含量等因素,由 SPAW 软件计算获得 |
| | Z 系数 | 根据区域降水分布及其他水文地质特征,参考 Donohue 等学者的计算公式计算获得 |

表 2 不同模型计算的产水量对比

| 年均产水量 | InVEST 产水量 | 红线“指南”模型产水量 | 水资源公报水资源总量 |
|---------------------|------------|-------------|------------|
| 体积分数/m ³ | 9.80E+09 | 6.68E+09 | 8.78E+09 |
| 产水总量/mm | 1 324.19 | 903.40 | 1 239.92 |

从水源涵养功能重要性评价结果来看(图 1),“指南”模型虽计算简便但识别结果不精确,未能较好地

识别水源涵养功能强的湿地水域和优质林地,根据水源涵养量前 50%的区域来确定水源涵养极重要区域明显过于受气候因素影响。而从本文所采用的基于 InVEST 模型的评价方法的计算结果来看,水源涵养功能较强的河流水域和优质林地以及较低的城市建成区都能较好地识别出来,虽存在土壤数据精度的干扰,但总体评价结果比“指南”模型更为精细。



注:“指南”模型为文献《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术“指南”》中介绍的模型。

图 1 水源涵养功能重要性评价结果对比

结合产水量模拟结果和水源涵养功能重要性评价结果可以看出,基于 InVEST 的水源涵养评估模型

相较于“指南”模型更优,取得了更精细更准确的结果。目前市县级国土空间规划编制中双评价的精度

要求是 20 m 的分辨率,前者的评价结果明显更精确更符合要求。对比总结基于 InVEST 模型的评估模型在水源涵养功能重要性评价方面的优势及两种模型之间产生的误差,可以归纳为:①InVEST 模型考虑因素更为全面,充分考虑了土壤、植物及地形因素,包括土层深度与植物根系深度,地表蒸发作用和植物蒸腾作用等因素,能尽可能模拟地表计算产水量。“指南”模型仅以地表覆盖类型推算的经验系数计算产水量,虽然计算比较简便,但计算结果与实际情况存在较大出入。②基于 InVEST 的水源涵养评估模型在水源涵养功能评价上能够弱化了气象因素的影响。基于 InVEST 的水源涵养评估模型同时考虑了土壤、地形地势、植被等因素,利用土壤饱和导水率、地形指数和流速系数进行修正,能够弱化气象因素的影响。而“指南”模型考虑因素比较单一,受气象因素影响较大。

3.2 整体水源涵养功能时空变化特征

3.2.1 产水量 从时间变化上看(图 2),2013—2017 年广州市产水总量 5 a 间增长了 8.07%,整体呈现先

升后降,总体保持一定增长的态势。从空间分布上看(图 3),产水量空间异质性明显。整体表现为中西部建成区最高,中、南部水系河网较高,而东北部山地丘陵地带则较低,总体呈现自南向北递减的趋势。另外,广州市中、西部建成区和水域较多的区域产水量要比植被覆盖度高的增城、从化区高,表明这些区域水源供给能力要优于北部山林地区。

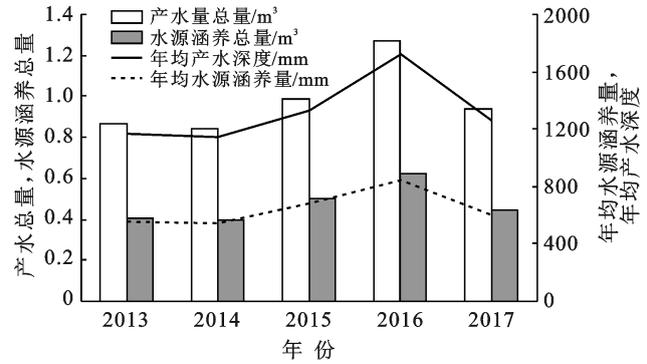


图 2 广州市 2013—2017 年各指标变化趋势

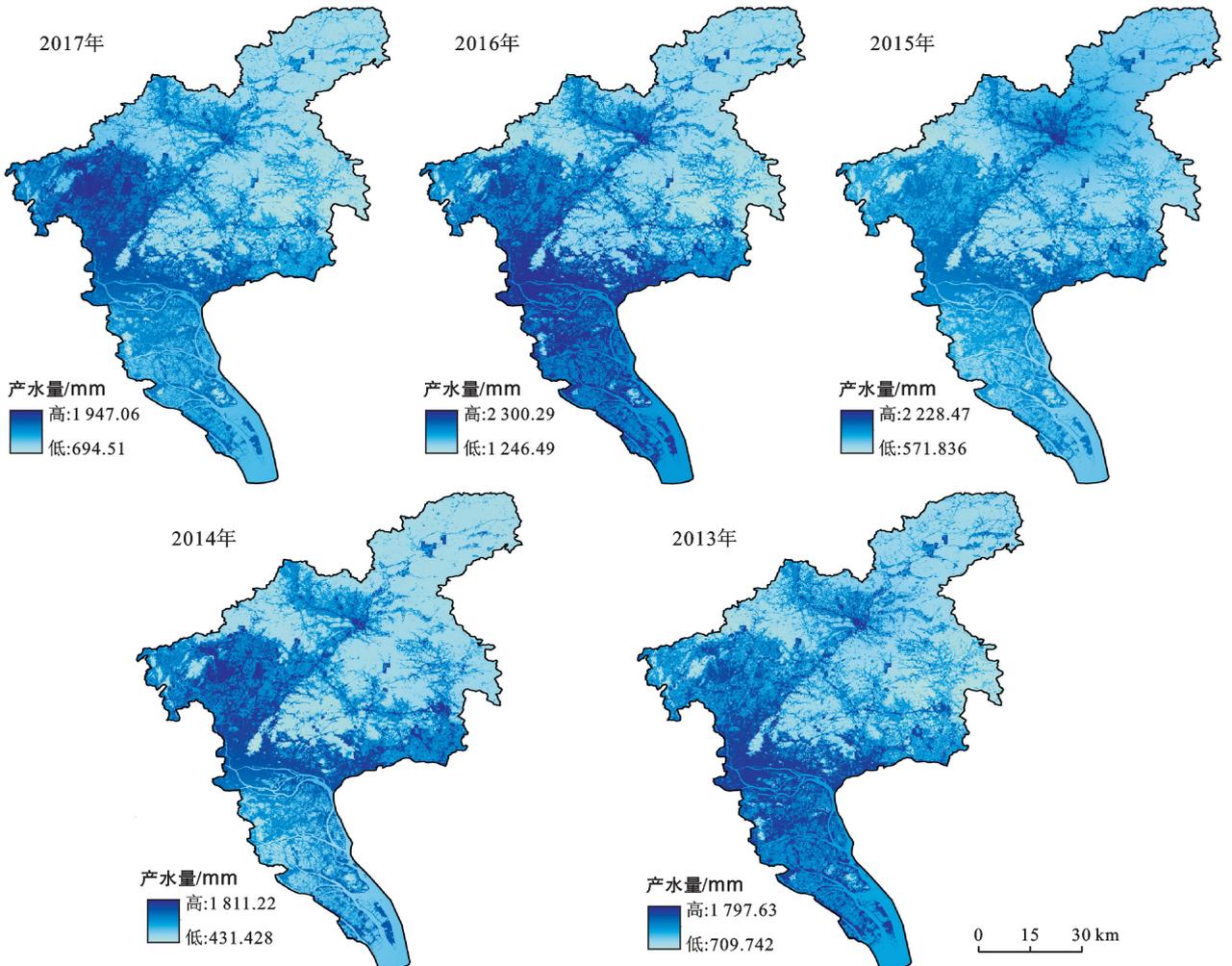


图 3 广州市 2013—2017 年产水量分布

3.2.2 水源涵养量 从时间变化上看(图 4),广州市水源涵养量 5 a 间增长了 10.39%,表明整体水源涵养功能增强,整体变化趋势与产水量相似,均呈现先升后降,总体保持一定增长的态势。从空间分布上看,广州市水源涵养量同样空间异质性明显,但与产水量空间分布情况正好相反。除南部河流水系众多的水域外,水源涵养量较高的区域主要集中在东北部水源涵养功能较好的多林地区域,大致包括增城区、黄浦区北部、从化区、白云区东部以及花都区北部,而城市中心建成区则较低,这与区域地理环境特点密切

相关。其中,水源涵养量较高的东北部以丘陵和山地地貌为主,植被茂盛,能够借助其发达的根系充分吸收水分,提升水源涵养能力。水源涵养量较低的中心城区和耕地众多的南部区域,主要是因为中心城市建成区基本为不透水面,流速系数大,水源涵养能力差,容易形成地表径流,而耕地一年中相当长的时间内地表处于裸露状态,农作物根系吸收水分的能力有限,加之南部河流水系众多,农用地不缺乏灌溉用水,降雨主要汇入河流径流而走,导致水源涵养功能较弱。

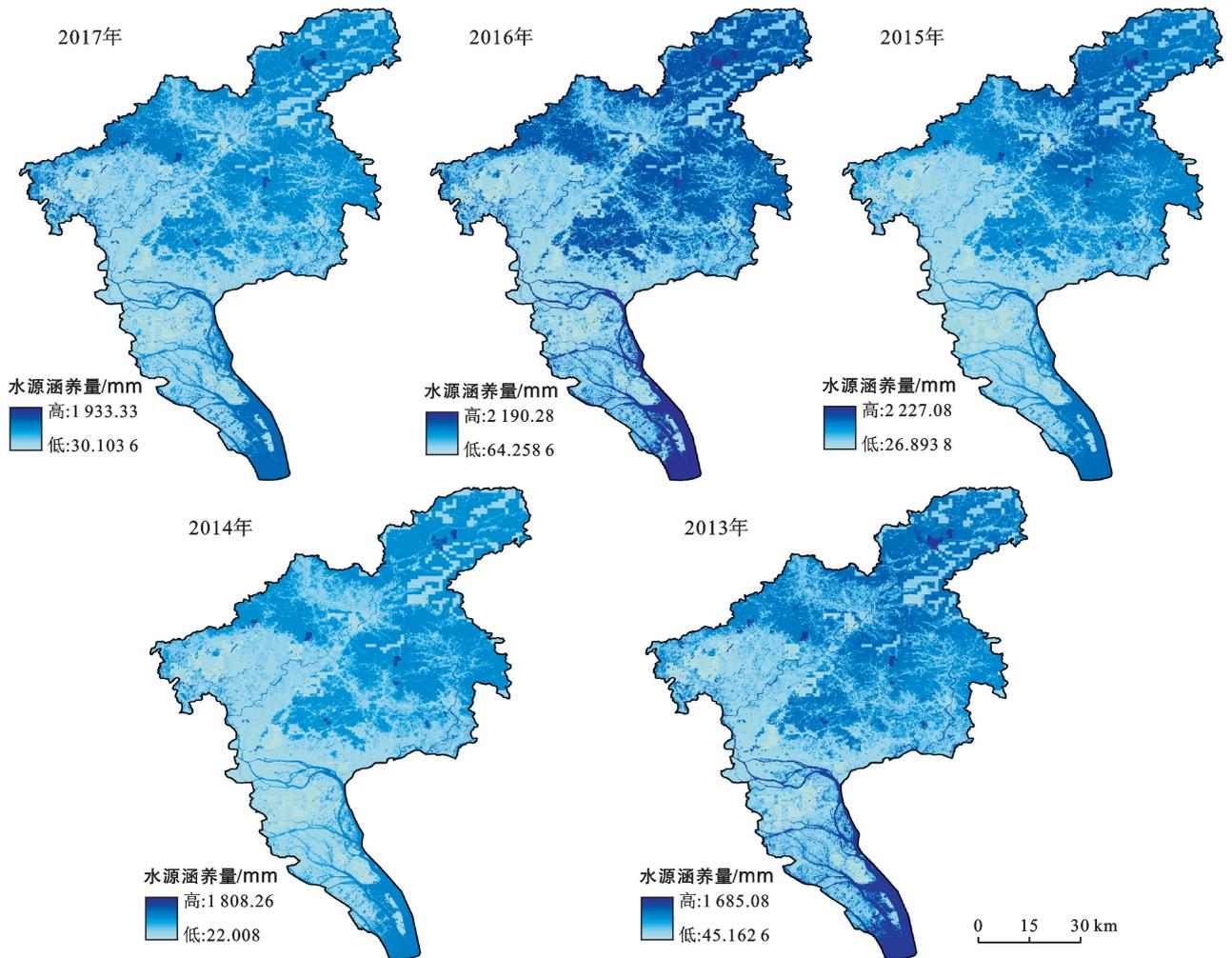


图 4 广州市 2013—2017 年水源涵养量分布

3.3 不同空间单元下水源涵养功能时空变化特征

3.3.1 不同行政区划的水源涵养功能变化特征 从各行政区划的产水量变化来看(图 5),2013—2017 年不同行政区划多年平均产水量变化趋势不同。其中,多年单位平均产水量位列前 3 的区域分别是越秀区、荔湾区和海珠区,最低则是从化区和增城区。而天河区、黄埔区、白云区、花都区 5 a 间产水量有不同程度的增长,其中,花都区涨幅最大,为 26.25%,南沙区和

番禺区则有所降低。

从各行政区划的水源涵养量变化来看(图 6),2013—2017 年不同行政区划单位平均水源涵养量变化趋势不同。其中,多年单位平均水源涵养量位列前三的区域分别是从化区、增城区和南沙区,最低的是越秀区和荔湾区,而其他行政区中 5 a 间水源涵养量变化率最大的是花都区和白云区。另外,平均水源涵养量增加超过 50 mm 的区域包括增城区、从化区、白云区

和花都区,其中花都区平均水源涵养量增加最多,为 133.90 mm,其他区域单位水源涵养量皆有不同程度的增长。2013—2017 年,平均水源涵养量在 600 mm

以上的只有从化区、南沙区、增城区和黄浦区,350 mm 以下的有越秀区和荔湾区。总体来看,各行政区的水源涵养量同样保持着先上升后回落的态势。

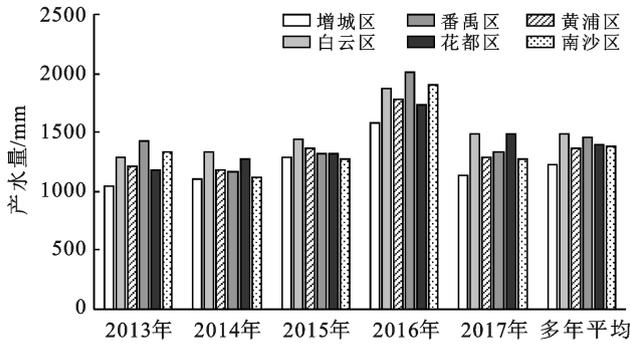
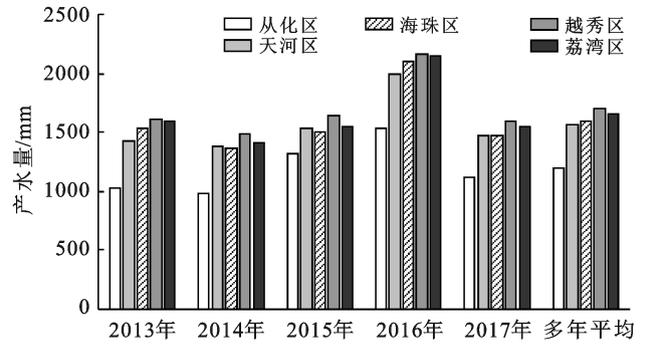


图 5 广州市 2013—2017 年广州市各区产水量



结合前文产水量的变化情况,2013—2017 年不同行政区划的单位产水量和单位水源涵养量均保持正值的平均增长率,且所有行政区划的单位水源涵养量平均增长率均大于产水量平均增长率。即无论是

广州市整体还是内部不同行政区划,水源涵养服务功能均有所提升。其中,海珠区、番禺区和荔湾区水源涵养功能提升较大,白云区、越秀区和花都区则提升较小。

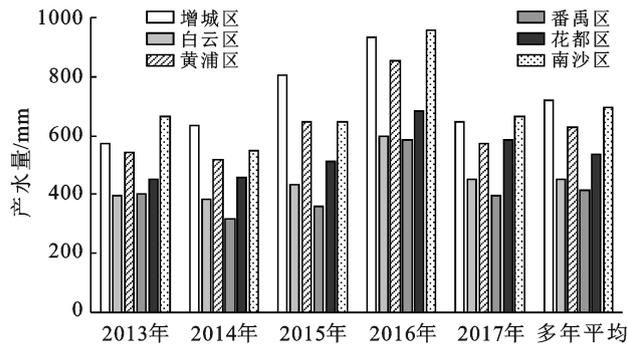
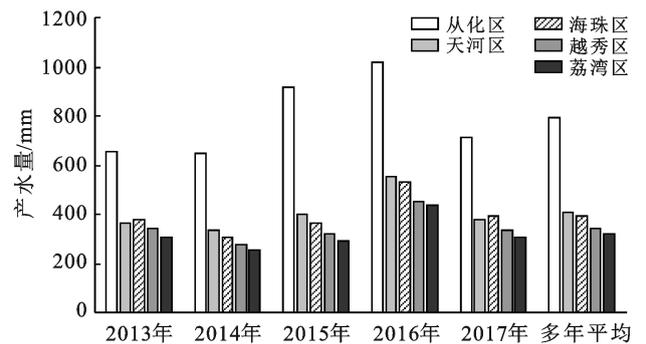


图 6 广州市 2013—2017 年各区水源涵养量



3.3.2 不同土地利用/覆被类型的水源涵养功能变化特征

(1) 土地利用/覆被类型变化分析。为了分析不同土地利用/覆被类型下水源涵养功能的变化情况,在遥感影像解译及精度验证的基础上,从不同地类面积与比例以及相互间的转移情况等方面,全面了解土地利用/覆被类型(下文简称“地类”)变化情况。

从各地类面积比例来看(表 3),广州市主要用地

类型为林地、耕地与建设用地,3 类用地面积总和占区域用地总面积的 90% 左右,其中,林地比例最多,约为总面积的 40%,耕地与建设用地则比例相近。从各地类数量变化来看,2013—2017 年广州市不同地类变化趋势各异。其中,耕地大量减少而建设用地不断扩张,两种用地类型变化最大,分别减少 10.29% 和增加 10.92%;林地和未利用地也有一定程度的减少,而草地和水域则相应地增加。

表 3 广州市 2013—2017 年各土地利用/覆被类型面积与比例及其变化

| 土地利用类型 | 2013 年 | | 2017 年 | | 2013—2017 年变化值 | |
|--------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|--------|
| | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% |
| 草地 | 16.17 | 0.22 | 16.49 | 0.22 | 0.31 | 1.94 |
| 水域 | 658.60 | 8.90 | 709.16 | 9.58 | 50.56 | 7.68 |
| 林地 | 3 012.61 | 40.69 | 2 993.92 | 40.44 | -18.69 | -0.62 |
| 耕地 | 2 037.90 | 27.53 | 1 828.12 | 24.69 | 209.78 | -10.29 |
| 建设用地 | 1 647.55 | 22.26 | 1 827.53 | 24.68 | 179.97 | 10.92 |
| 未利用地 | 30.15 | 0.41 | 29.03 | 0.39 | -1.11 | -3.69 |

从不同地类的相互转化来看(表 4),在转出上,减少的耕地面积主要转化为建设用地和林地,转移面积分别为 301.46,248.02 km²。在转入上,建设用地转入面积增长最大,主要来自于耕地,面积高达 301.46 km²,剩下的部分主要来自林地和水域,面积分别为 59.32 和 39.00 km²。

总体来看,2013—2017 年广州市土地利用/覆被变化情况受人类活动影响大,但同城市发展情况相适应,并且一直保持着合理的土地利用结构,耕地和林地虽有不同程度的减少,但总量比例依旧保持高位,林地始终保持在 40%以上,建设用地在 25%左右,总体结构保持合理稳定。

表 4 广州市 2013—2017 年土地利用/覆被变化面积转移矩阵

km²

| 项目 | 2013 年 | | | | | | |
|--------|--------|-------|--------|----------|----------|----------|-------|
| | 草地 | 水域 | 林地 | 耕地 | 建设用地 | 未利用地 | |
| 2017 年 | 草地 | 11.21 | 0.17 | 4.96 | 8.49 | 0.44 | 0.92 |
| | 水域 | 0.05 | 596.48 | 23.20 | 29.03 | 59.19 | 1.20 |
| | 林地 | 1.50 | 3.48 | 2 692.55 | 248.02 | 37.79 | 0.82 |
| | 耕地 | 2.79 | 17.05 | 228.13 | 1 438.57 | 128.19 | 9.46 |
| | 建设用地 | 0.29 | 39.00 | 59.32 | 301.46 | 1 417.98 | 13.39 |
| | 未利用地 | 0.43 | 1.69 | 6.09 | 14.32 | 2.35 | 4.16 |

(2) 不同土地利用/覆被类型的水源涵养功能。从产水量来看(表 5),在总量上,不同地类多年平均产水量由高到低依次是建设用地、未利用地、草地、耕地、水域和林地,其值分别为 1 770.75,1 575.47,

1 458.28,1 409.53,1 247.66 和 1 028.09 mm。在变化率上,5 a 间不同地类产水量均有不同程度的增长,其中,林地增长率最高,为 13.71%,建设用地则最低,仅为 2.17%。

表 5 广州市 2013—2017 年不同土地利用/覆被类型平均产水量

mm

| 土地利用类型 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2013—2017 年变化率/% | 平均值 | 平均增长率/% |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|----------|---------|
| 草地 | 1 296.54 | 1 287.64 | 1 490.95 | 1 835.43 | 1 380.84 | 6.50 | 1 458.28 | 3.36 |
| 水域 | 1 145.59 | 1 016.29 | 1 180.30 | 1 710.49 | 1 185.64 | 3.50 | 1 247.66 | 4.77 |
| 林地 | 844.82 | 850.85 | 1 106.60 | 1 377.51 | 960.68 | 13.71 | 1 028.09 | 6.25 |
| 耕地 | 1 260.72 | 1 229.40 | 1 407.11 | 1 811.22 | 1 339.20 | 6.23 | 1 409.53 | 3.66 |
| 建设用地 | 1 651.96 | 1 580.14 | 1 725.02 | 2 208.82 | 1 687.81 | 2.17 | 1 770.75 | 2.32 |
| 未利用地 | 1 407.52 | 1 417.98 | 1 602.69 | 1 952.98 | 1 496.18 | 6.30 | 1 575.47 | 3.06 |

从水源涵养量来看(表 6),在总量上,不同地类多年平均水源涵养量分异明显,由高到低依次是水域、林地、草地、耕地、未利用地和建设用地(其水源涵养总量分别为 1 247.66,933.52,654.39,375.75,249.67 和 223.06 mm)。

不同地类水源涵养量变化趋势与水源涵养总量保持一致,均呈现先升后降的趋势。在变化率上,5 a 间变化率最大的是建设用地,为 21.30%,其次依次是林地、耕地、未利用地和草地(其变化率分别为 13.39%,10.36%,9.58%和 5.45%)。

表 6 广州市 2013—2017 年不同土地利用/覆被类型平均水源涵养量

mm

| 土地利用类型 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2013—2017 年变化率/% | 平均值 | 平均增长率/% |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|----------|---------|
| 草地 | 587.80 | 613.21 | 671.66 | 779.46 | 619.81 | 5.45 | 654.39 | 2.36 |
| 水域 | 1 145.59 | 1 016.29 | 1 180.30 | 1 710.49 | 1 185.64 | 3.50 | 1 247.66 | 4.77 |
| 林地 | 766.67 | 774.96 | 1 008.92 | 1 247.73 | 869.33 | 13.39 | 933.52 | 6.15 |
| 耕地 | 330.30 | 328.87 | 380.54 | 474.50 | 364.52 | 10.36 | 375.75 | 4.20 |
| 建设用地 | 190.98 | 213.09 | 224.17 | 255.40 | 231.65 | 21.30 | 223.06 | 5.35 |
| 未利用地 | 219.11 | 225.75 | 255.51 | 307.89 | 240.11 | 9.58 | 249.67 | 3.67 |

综合不同地类单位平均面积产水量和水源涵养量变化来看,在年平均增长率上,各地类单位面积产

水量和水源涵养量均保持增长的态势。对比增长率大小,不难发现,除水域外,林地和草地的单位平均水

源涵养量增长率略小于单位平均产水量增长率,其中,草地变化较大;而耕地、未利用地和建设用地单位平均水源涵养量增长率则大于单位平均产水量增长率,其中,建设用地变化较大。由此表明,在研究时间段内,草地的单位水源涵养功能有所减弱,林地基本保持不变,耕地和建设用地则相对有所提升。

结合不同地类变化分析,可以看出,水源涵养功能总体提升过程中地类结构保持稳定。其中,建设用地不断扩张的同时,水源涵养功能也同步提升,耕地在底线管控的同时,水源涵养功能也没有减弱,表明广州市在生态环境保护与发展战略、海绵城市建设背景下城市的建设正处于良好的发展模式过程中。

3.4 水源涵养功能重要性评价

本文采用分位数分类法将广州市水源涵养量绝对值从高到低依次划分为极重要区、高度重要区、中度重要区、较重要区、一般重要区 5 个级别,并将重要性程度最高的两个区域归并为水源涵养极重要区。由从空间分布来看(图 7),水源涵养极重要区域集中在广州东北部的增城区、从化区、黄埔区北部、花都区、白云区东部多林地以及植被覆盖度较高的区域;中度重要区域集中在北部和南部南沙区耕地面积较多而建设用地占地较少的区域;而较重要和一般重要区域主要集中在中部建设用地密集的中心城区。

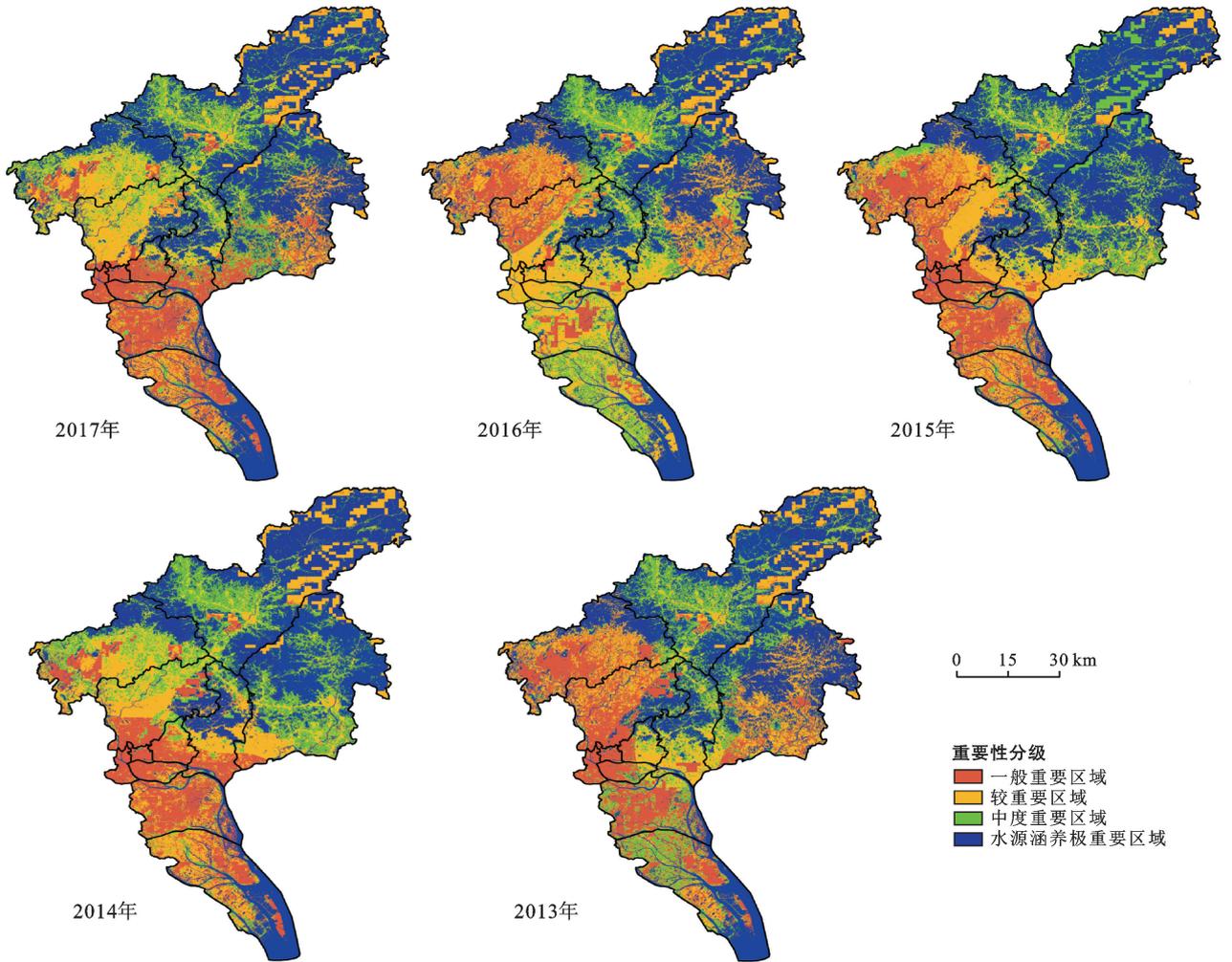


图 7 广州市 2013—2017 年水源涵养量重要性分级

从各重要性分区面积比例来看(表 7),各等级面积比例相近,依次是较重要区、中度重要区、高度重要区、一般重要区和极重要区,比例分别是 21.33%, 21.08%, 19.61%, 19.13% 和 18.86%。而由极重要区和高度重要区组成的水源涵养极重要区总面积比例为 38.47%。从各分区内土地利用/覆被类型来看,在

极重要区中,水域比例最高,其次是林地;在高度重要区中,林地比例高达 94.88%;在中度重要区和较重要区中,耕地比例均为最高,其次是林地;在一般重要区中,建设用地比例高达 87.33%。可以看出,重要性等级较高的区域中林地和水域比例均较高,等级较低分区中建设用地比例较高,而草地和未利用地由于本身

面积较小而在各重要性分区中比例均较小。从可持续发展的角度来看,极重要区和高度重要区应当在环

境保护和区域发展政策、规划管理决策中作为具有优先级保护的区域。

表7 多年平均水源涵养量重要性分区内土地利用/覆被类型面积比例与总面积统计

| 重要性分区 | 草地/% | 水域/% | 林地/% | 耕地/% | 建设用地/% | 未利用地/% | 总面积/km ² | 总面积比例/% |
|-------|------|-------|-------|-------|--------|--------|---------------------|---------|
| 一般重要区 | 0.15 | 0.94 | 4.30 | 7.21 | 87.33 | 0.07 | 1 413.43 | 19.13 |
| 较重要区 | 0.06 | 1.17 | 21.80 | 43.70 | 32.53 | 0.73 | 1 575.62 | 21.33 |
| 中度重要区 | 0.92 | 8.83 | 21.86 | 58.87 | 9.35 | 0.18 | 1 557.08 | 21.08 |
| 高度重要区 | 0.24 | 2.99 | 94.88 | 1.44 | 0.46 | 0.00 | 1 448.93 | 19.61 |
| 极重要区 | 0.01 | 40.64 | 58.09 | 0.37 | 0.89 | 0.00 | 1 393.05 | 18.86 |

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 在评估模型的精确度与适用性上,基于InVEST的水源涵养服务评估模型在产水量模拟精度上达到88.42%,远高于“指南”模型,与实际情况大体相符。同时,在水源涵养功能重要性评价上也较为精确,能够较好地识别水源涵养功能较强的河流水域和优质林地以及较低的城市建成区,表明该模型在研究区具有较好的现实适用性,在此评估结果上展开的研究会更具科学性。

(2) 在整体水源涵养功能上,在产水总量方面,广州市5 a间增长了8.07%,时间上呈现先升后降、总体保持一定增长的态势,空间上受区域自然环境特点的影响,总体呈现自南向北递减的趋势。在水源涵养总量方面,5 a间增长了10.39%,时空变化特征与产水总量基本一致,水源涵养量高值区域多集中在水域与多林地区域,低值则集中在城市中心建成区。

(3) 在不同空间单元下水源涵养功能上,水源涵养功能表现各异。从各行政区划上看,海珠区、番禺区和荔湾区水源涵养功能提升较大,而白云区、越秀区和花都区则提升较小。从不同土地利用/覆被类型上看,草地的单位水源涵养功能有所减弱,林地基本保持不变,而耕地和建设用地则有所提升。建设用地面积不断扩张的同时,水源涵养功能同步提升,耕地在底线管控下水源涵养功能也有所增强。

(4) 在水源涵养功能重要性评价上,广州市水源涵养重要性等级较高的区域中,林地和水域比例较大,而等级较低的区域中,建设用地比例较大。另外,草地和未利用地由于自身数量较少而在各重要性等级中比例均较小。

4.2 建议

(1) 落实林地抚育措施,有计划地增加林地面积,建设水源涵养林,保持并逐步提高植被覆盖度,以

提升区域水源涵养能力。同时加强对水源涵养极重要区的科学保护,尤其是增城区、从化区、从化与花都区交界处等区域。

(2) 鉴于广州市中心城区建设用地平均水源涵养功能增强,但总体水源涵养能力低下,降雨时容易造成城市内涝,应建设城市绿地综合防护体系与生态廊道,同时加强住宅绿地、公共绿地等城市绿地系统的建设,系统提高城区的水源涵养功能,尤其是天河区、海珠区和白云区交界处、番禺区中心城区等区域,以加快海绵城市建设步伐。

(3) 鉴于广州市产水量相当丰富,尤其是老城区,有关部门应加快老城区生态修复与提升的步伐。在明晰现有雨水容纳能力的情况下,通过合理配置调蓄设施提高水资源利用率,结合城镇棚户区改造、城乡危房改造和老旧小区有机更新等工作,提升区域整体水源涵养功能水平,进而发挥其优势以缓解区域资源环境承载压力。

本文基于InVEST模型对广州市2013—2017年水源涵养功能进行评价与分析,其结果具有一定科学性与合理性,但由于水源涵养评估过程所涉参数的复杂性与多样性,虽取得较高的模拟精度,但限于土壤数据分辨率、遥感影像数据残缺、水文站点检测的径流数据难以获取等问题干扰,结果未能做到尽善尽美,其精度还有待进一步验证与提升。未来在水文站点数据可获取条件下,可考虑对模拟结果进行更为精细化的模型校验并开展更大尺度的应用研究。此外,InVEST模型在市县级国规划的水源涵养功能评价中具有对比性优势,它在未来规划领域具有更为广阔的应用前景。

[参 考 文 献]

- [1] 张宏锋,袁素芬.东江流域森林水源涵养功能空间格局评价[J].生态学报,2016,36(24):8120-8127.
- [2] 陈姗姗,刘康,包玉斌,等.商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素[J].地理科学,2016,36(10):1546-1554.

- [3] 张彪,李文华,谢高地.北京市森林生态系统的水源涵养功能[J].生态学报,2008,28(11):5619-5624.
- [4] 崔景轩,李秀芬,郑海峰,等.典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J].生态学报,2019,39(9):3026-3038.
- [5] 刘泽彬,王彦辉,田奥,等.六盘山半湿润区坡面华北落叶松林冠层截留的时空变化及空间尺度效应[J].水土保持学报,2017,31(5):231-239.
- [6] 田璐.不同覆盖措施对干化土壤水分的影响研究[D].北京:中国科学院大学,2019.
- [7] 刘璐璐,曹巍.南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J].地理科学,2016,36(4):603-611.
- [8] 马国飞,满苏尔·沙比提.托木尔峰自然保护区台兰河上游森林植被水源涵养功能[J].水土保持学报,2017,31(3):147-153.
- [9] 周佳雯,高吉喜,高志球.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.
- [10] Chen He, Chen Ke, Yang Minghui. A new hysteresis model of the water retention curve based on pore expansion and contraction [J]. Elsevier Ltd, 2020,121:103482.
- [11] Marquès M, Bangash R F, Kumar V, et al. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: A case study of the ecosystems services in the Francoli river basin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013,263(Part1):224-232.
- [12] Pessacq N, Flaherty S, Brandizi L, et al. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data [J]. Science of the Total Environment, 2015,537:225-234.
- [13] Hamel P, Guswa A, Sahl J, et al. Predicting dry-season flows with a monthly rainfall-runoff model: Performance for gauged and ungauged catchments [J]. Hydrological Processes, 2017,31(22):3844-3858.
- [14] 王玉纯,赵军,付杰文,等.石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J].生态学报,2018,38(13):4637-4648.
- [15] Yang Xiao, Ouyang Zhiyun. Spatial-temporal patterns and driving forces of water retention service in China [J]. Chinese Geographical Science, 2019,29(1):100-111.
- [16] 刘菊,傅斌,张成虎,等.基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):577-585.
- [17] 吕乐婷,任甜甜,孙才志,等.1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究[J].生态学报,2020,40(3):1-11.
- [18] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide [M]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota. The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2018.
- [19] 自然资源部办公厅.资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术“指南”(试行)[EB/OL]http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html.2020-01-19.
- [20] Xu Chao, Jiang Weiyu, Huang Qianyuan, et al. Ecosystem services response to rural-urban transitions in coastal and island cities: A comparison between Shenzhen and Hong Kong, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,260:121033.
- [21] 赵永,蔡焕杰,王健,等. Hargreaves 计算参考作物蒸发蒸腾量公式经验系数的确定[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):44-47.
- [22] Zhou Wenzuo, Liu Ggaohuan, Pan Janjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005,15(1):3-12.