引文格式：陈德权,兰泽英,张郁,等. 广州市水源涵养生态系统服务功能评价与影响因素研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 34-38. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.02.008

广州市水源涵养生态系统服务功能评价与影响因素研究

陈德权[1]，兰泽英[2]，张　郁[1]，吴　辉[1]
（1. 广州市城市规划勘测设计研究院，广东 广州 510120； 2. 广东工业大学 管理学院，广东 广州 510520）

摘　要：研究以开展海绵城市建试点的广州市为分析区域，借助 InVEST 模型分析 2013－2017 年水源涵养服务功能变化情况及影响因素。结果显示：广州市 2013－2017 年水源涵养功能服务整体有一定提升，多年平均水源涵养量深度为 644.860 mm，平均增长了 10.39%。在不同行政区域和不同土地覆被类型下水源涵养功能变化差异明显。研究区水源涵养生态系统服务功能受到自然因素与社会经济因素的综合影响。气候变化因子一直是水源涵养功能服务变化的主导因素，社会经济发展因素为次要因素。

关键词：广州市；水源涵养量；水源涵养功能；InVEST 模型
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）02-0034-05

Evaluation and Influence Mechanism of Water Conservation Ecosystem Service Function in Guangzhou City

CHEN Dequan[1], LAN Zeying[2], ZHANG Yu[1], WU Hui[1]
(1. Guangzhou Urban Planning Design Survey Research Institute, Guangzhou 510120, China;
2. School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Taking Guangzhou, where the pilot project of sponge city construction was carried out, as the analysis area, we used the InVEST model to analyze the changes and influence factors of water conservation ecosystem service function from 2013 to 2017. The results show that from 2013 to 2017, the overall water conservation ecosystem service function in Guangzhou has improved to a certain extent. The average depth of water conservation for many years is 644.860 mm, an average increase of 10.39%. In different administrative regions and different land coverage types, there are obvious differences in the changes of water conservation ecosystem service function. The water conservation ecosystem service function in the study area is affected by natural factors and socio-economic factors. The climate change factor has always been the dominant factor, and the socio-economic development factor is the secondary factor.

Key words: Guangzhou City, water conservation, water conservation function, InVEST model

开展生态水文调节、水源涵养等生态系统服务研究对区域的可持续发展具有积极影响，探索区域水源涵养服务时空变化特征与关联模式有利于海绵城市建设过程中规划者因地制宜制定方案与协助推进国土空间规划自然基底评价工作[1-12]。目前对水源涵养功能的研究局限于模型的简单应用，热衷于对典型的干旱区或水资源丰富的区域或特定流域的物质量进行模拟分析与验证，对研究区域城市化发展与人类活动影响、宏观发展背景和政策背景关注不足，对研究区水源涵养服务影响机制和分析挖掘有待进一步深入。因此，本文以广州市水源涵养生态系统为研究对象，展开了相关分析[13-19]。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源与预处理

研究中基础数据包括 2013—2017 年 5 期 Landsat8 遥感影像数据、2013—2017 年气象数据、DEM 数据、土壤数据、社会经济数据、水资源数据，分别来源于美国地质勘查局、国家气象信息中心、地理空间数据云、中国科学院资源环境数据云平台、广东土种志数据集、世界土壤数据库、广州市统计年鉴、广州市水文局。

对广州市 2013—2017 年五期遥感影像进行辐射定标、大气校正、影像融合合并与裁剪得到 15 m 分辨率影像，并借助 ENVI 监督分类工具中神经网络分类法，选取训练样本进行监督分类后得到耕地、林

收稿日期：2022-08-22。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41301377）。
第一作者简介：陈德权（1996—），工程师，研究方向为自然资源调查监测与生态安全，E-mail：c1304030168@163.com。

地、草地、水域、建设用地、未利用地（裸地）等六类土地覆被类型数据（图1）。年平均降水量来自市气象局统计数据，将属性赋予气象站点坐标，利用ArcGIS反距离权重空间插值方法生成年栅格空间数据（图2）。利用python软件提取中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中位于广州市范围内气象站点2013—2017年年平均气温、日最高温均值和日最低温均值，最后根据公式计算潜在蒸散量。分别从世界土壤数据库中国土壤数据集、中国科学院资源环境科学数据中心下载的中国土壤类型数据中提取出广州市区域的数据，结合广东省土种志制作生成研究区土壤有机质含量、土壤颗粒组成与容重等信息的土壤空间数据[20]。

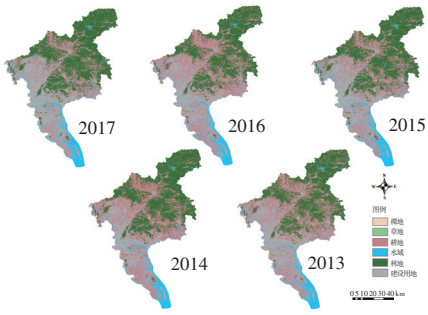


图1　2013–2017年广州市土地利用分类结果

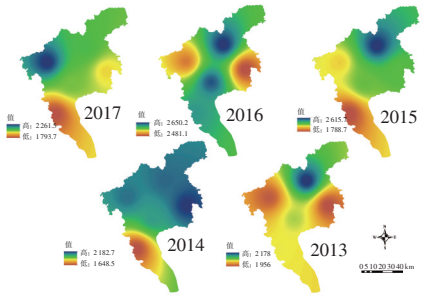


图2　2013–2017年广州市总降水量

1.2　水源涵养量评估模型

水源涵养量评估模型基于InVEST的产水量模块计算结果，通过计算修正公式得出水源涵养量结果。本文在参照InVEST3.2用户手册和相关研究的基础上，利用ArcGIS10.6、ENVI5.3sp1等空间数据处理软件对InVEST软件运行所需要的数据与参数进行处理计算，保证数据类型和格式的正确性[21]。水源涵养量相关计算公式与方法如下：

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

式中，R为单位栅格的水源涵养量（mm）；K为土壤饱和导水率（cm/d），由spaw软件结合土地类型得出；V为流速系数，不同土地覆被类型有对应系数；TI为地形指数，由DEM数据处理得到；Y为产水量，通过公式（2）计算。

$$Y_{xj}=\left(1-\frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x}\right)\times P_x \quad (2)$$

式中，Y_{xj}为土地利用类型j栅格单元x的产水量；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，通过公式（3）计算。

$$\frac{\mathrm{AET}_{xj}}{P_x}=\frac{1+w_xR_{xj}}{1+w_xR_{xj}+1/R_{xj}} \quad (3)$$

式中，R_{xj}为j地类栅格x的Bydyko干燥指数，由公式（4）计算；w_x为植被可利用水系数，由公式（5）计算。

$$R_{xj}=\frac{k\times\mathrm{ET}_0}{P_x},\ k=\min(1,\frac{\mathrm{LAI}}{3}) \quad (4)$$

$$w_x=Z\times\frac{\mathrm{AWC}_x}{P_x} \quad (5)$$

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，参考Donohue等对于季节参数Z的计算公式（6）计算得出，N为年降雨事件数，由综合统计了研究区广州站、增城站2010—2017年近8 a来日降水情况得到；AWC_x为土壤有效含水量，由公式（7）计算，SoilDepth为土壤深度，RootDepth为根系深度；ET_0为潜在蒸散发量（单位：mm/d），由Hargreaves计算公式（8）[4–5]：

$$Z=0.2\times N \quad (6)$$

$$\mathrm{AWC}_x=\min(\mathrm{SoilDepth},\mathrm{RootDepth})\times\mathrm{PAWC} \quad (7)$$

$$\mathrm{ET}_0=0.000\,939\times R_a\times(T_a+17.8)\times(T_{\max}-T_{\min})^{0.5} \quad (8)$$

式中，PAWC为植物可利用水量，为田间持水量（FMC，field moisture capacity）和永久萎蔫系数（WC，wilting coefficient）的差值，两者计算公式参照游松财[22]等相关研究，R_a太阳大气顶层辐射（单位：MJ·m^{-2}·d^{-1}）；T_a为日最高温均值和日最低温均值的平均值（单位：℃）；$T_{\max}$为日最高温均值；$T_{\min}$为日最低温均值的差（单位：℃）。

$$\mathrm{FMC}=0.003\,75\times\mathrm{sand}+0.005\,886\times\mathrm{silt}+0.008\,039\times\mathrm{clay}+0.002\,208\times\mathrm{om}-0.143\,40\times\mathrm{BD} \quad (9)$$

$$\mathrm{WC}=-0.000\,059\times\mathrm{sand}+0.001\,142\times\mathrm{silt}+0.005\,766\times\mathrm{clay}+0.002\,228\times\mathrm{om}-0.026\,71\times\mathrm{BD} \quad (10)$$

式中，sand、silt、clay、om、BD分别为土壤沙粒含量（%）、土壤粉粒含量（%）、土壤有机质含量（%）、土壤黏粒含量（%）及土壤容重（g/cm^3），有机质含量数据来源于广东土种志数据集[23]。土壤深度数据从HWSD中的中国数据集处理得出。

2 结果分析

2.1 土地利用/覆被变化分析

从表1可以发现，林地为主要用地类型，占总面积的40%左右，耕地、建设用地比重接近，2017年的面积占比基本持平。总体而言，2013—2017年间土地利用/覆被类型数量上变化较大，耕地数量大幅减少，城市建设用地面积增加，范围不断扩张，林地、未利用地小幅减少，草地和水域增加；从变化率来看，2013—2017年间耕地和建设用地变化率最大，耕地减少10.29%，建设用地增加10.92%，未利用地和林地有小幅度的减少，变化率分别是–3.69%、–0.62%，草地和水域分别增加1.94%、7.68%。地类转化方面，减少量较大的耕地主要转化为建设用地和林地，面积为301.455 km^2和248.018 km^2；转出率最大的是未利用地，其次的是草地，草地主要转换为耕地和林地；转入情况中，建设用地数量增长最大，数量增长较大的部分来源于耕地，面积有301.455 km^2；除此以外还有林地和水域，面积分别为59.316 km^2和39.003 km^2。

表1 2013—2017年广州市各土地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	16.174	0.22	16.488	0.22	0.313 65	1.94
水域	658.596	8.90	709.159	9.58	50.563 125	7.68
林地	3 012.609	40.69	2 993.916	40.44	–18.693	–0.62
耕地	2 037.897	27.53	1 828.120	24.69	209.777 175	–10.29
建设用地	1 647.552	22.26	1 827.525	24.68	179.973 225	10.92
未利用地	30.146	0.41	29.033	0.39	–1.112 625	–3.69

表2 广州市2013—2017年土地覆被变化转移矩阵/%

	草地	水域	林地	耕地	建设用地	未利用地
草地	68.867	0.026	0.165	0.416	0.026	3.072
水域	0.31	90.668	0.77	1.423	3.596	4.006
林地	9.233	0.529	89.327	12.158	2.296	2.741
耕地	17.141	2.591	7.568	70.54	7.789	31.596
建设用地	1.794	5.929	1.968	14.778	86.151	44.707
未利用地	2.656	0.257	0.202	0.702	0.143	13.879

2.2 水源涵养功能评估

2.2.1 水源涵养量时空变化分析

结合广州市水文局公布的水资源公报相关数据，基于模型模拟的产水量与公报统计的水资源总量基本相符，精确率为88.42%。

根据分析结果，2013—2017年水源涵养总量分别为4.063×10^9 m^3、3.983×10^9 m^3、5.053×10^9 m^3、6.270×10^9 m^3、4.486×10^9 m^3，平均水源涵养量深度分别为549.220 mm、538.320 mm、682.971 mm、847.494 mm、606.280 mm，多年平均水涵养总量为4.771×10^9 m^3，多年平均水源涵养量深度为644.860 mm；年均水源涵养量5 a间增长了10.39%，2013—2017年总产水量分别为8.650×10^9 m^3、8.426×10^9 m^3、9.846×10^9 m^3、1.272×10^{10} m^3、9.348×10^9 m^3；多年平均产水量为9.397×10^9 m^3，平均产水深度为1 324.190 mm；产水总量5 a间增长了8.07%，整体保持一定的增长趋势，结合土地利用变化情况说明区域的水源涵养功能增强。从空间上来看，广州市2013—2017年的水源涵养量存在明显的空间异质性，水源涵养量高的地方分布在东北部林地区域，行政区划上主要位于在增城区、黄埔区北部、从化区、白云区东部、花都区北部；而水源涵养量较低的区域集中在中心建成区。

2.2.2 水源涵养功能变化分析

研究区域不同的行政区县在2013—2017年，平均水源涵养量深度变化差异明显，单位面积平均水源涵养量深度5 a间增长了69.688 mm。多年单位平均涵养量最高的区域是从化区、增城区、南沙区，水源涵养量深度分别为789.356 mm、717.881 mm、696.421 mm，其5 a间水源涵养量变化率分别为9.74%、12.15%、0.34%，最低的是越秀区和荔湾区，涵养量深度分别为302.189 mm和323.971 mm，其水源涵养量变化率分别为10.54%、3.64%，其他行政区中2013—2017涵养量的变化率最大的是花都区和白云区，分别为29.81%和13.83%。截至2017年平均水源涵养量深度在600 mm以上的只有从化区、南沙区、增城区和黄埔区，2017年广州市水源涵养总量为4.486×10^9 m^3，

其中从化区和增城区总体水源涵养量超10亿m^3以上，水源涵养总量最小的是越秀区，为$1.163\times10^7m^3$，其他行政区水源涵养总量在$2\times1\ 0^7m^3$~$10\times10^8\ m^3$之间。

2013—2017年不同行政区县的单位产水量和水源涵养量都保持正向增长，各行政区县的单位水源涵养量的平均增长率大于地产水量，这说明研究区不仅从总量上可以看出整体的水源涵养服务功能有所提升，在较细层面上的不同行政区域中同样得以体现，在所有水源涵养功能提升的行政区域中，海珠区、番禺区和荔湾区较为突出，可能与海绵城市建设取得积极进展有关。

从不同土地覆被类型上来看，平均水源涵养深度最高的是水域，其次是林地、草地、耕地、未利用地、建设用地。各土地利用类型的水源涵养量变化趋势大体与总的降水量情况相同，都是先增长后降低。从2013—2017年变化率上来看，最高的是建设用地，为21.29%，其次是林地、耕地、未利用地和草地，变化率分别为13.39%、10.36%、9.58%、5.54%。

通过结合不同覆被类型下单位平均面积产水量和水源涵养量的变化率可以进一步分析出不同的土地覆被类型的水源涵养功能变化情况。林地总体趋于稳定，草地减弱，建设用地在数量增长的情况下，水源涵养功能同样未降低，耕地同样保持良好的水源涵养服务功能。结合土地利用结构趋于稳定的土地利用变化情况，可以得出服务功能整体增强的同时保持了土地利用结构上的稳定，说明研究区在生态文明建设、海绵城市建设背景下城市生态建设正朝着良好的方向发展。

2.3　水源涵养功能变化影响因素探究

为了对水源涵养量变化的影响因素和驱动机制进行更好的分析，探讨自然经济社会影响因素的主导关系。在考虑数据可获得性的同时，本文从气候、土地覆被变化、经济社会因素等方面综合选取关联分析指标。分别选取了研究区域的降雨量、蒸散量、平均气温、NDVI、GDP密度、人口密度，林地占比、耕地占比、建设用地占比等指标，构建多元线性回归模型在区级尺度上进行线性拟合分析，以求对研究区水源涵养服务的变化情况进行更科学合理的解释。

表3　水源涵养服务变化影响因素

类别	变量	Spearman相关性系数 r	P显著性	R_2/调整后 R_2
气候变化	降雨量/（mm/m^3）	0.836	0.001	0.909/0.879
	蒸散量/（mm/m^3）	–0.355	0.018	
	平均气温/（℃/m^3）	–	–	
自然社会经济发展	GDP密度/（元/km^2）	–0.700	0.016	0.649/0.512
	人口密度/（人/km^2）	–0.627	0.039	
	NDVI	0.745	0.008	
	林地占比/%	0.200	–	
	耕地占比/%	0.191	–	
	建设用地占比/%	–0.155	–	

由表3中Spearman相关性分析结果可以看出研究区的水源涵养服务受到气候变化和社会经济发展的综合影响，具体的因子上来看，水源涵养服务的变化与降雨量、蒸散量、GDP、密度、人口密度和NDVI的变化有显著性关联，其中与降雨量和NDVI呈正相关，与其他因子呈负相关，特别显著的因子是降雨量（r =0.836，P <0.01）、NDVI（r =0.745，P <0.01）。另外，与土地覆被类型的占比变化并未显示出显著性的关联，可能是因为和行政区的土地利用结构总体保持稳定的缘故，从模型的拟合性指标来看，气候变化类型因子的调整后 R^2 达到0.879，说明气候变化因子能够解释水源涵养量总体变化的87.9%，是研究区域的水源涵养服务变化的主导因素，社会经济发展因素为次要因素。

3　结　论

本文以Landsat8卫星遥感影像数据、降水气温等气象数据、土壤数据和社会统计数据为基础，将基于InVEST的水源涵养评估模型应用到海绵城市建设背景下的广州市，并对水源涵养服务功能影响因素进行了综合分析。研究结论如下：

1）广州市在2013—2017年海绵城市建设背景下，水源涵养量整体波动增长，水源涵养量较高的分布在东北部林地区域，水源涵养量较低的区域分布在老城市建成区。但海珠区、荔湾区等老城区及番禺区的水源涵养功能提升，不同土地利用类型上，林地水源涵养功能表现相对稳定，耕地和建设用地水源涵养功能提升。

2）研究区水源涵养服务功能整体增强，期间土地利用结构保持稳定，建设用地在数量增长的情况下，水源涵养功能同样未降低，耕地同样保持良好的水源涵养服务功能，说明研究区在生态文明建设、海绵城市建设背景下城市生态建设正朝着良好的方向发展。

3）广州市2013—2017年水源涵养功能受到自然因素与社会经济因素的综合影响。其中，水源涵养功能服务变化与降雨量、植被覆盖度等自然因素存在正向关联，与蒸散量、GDP密度、人口密度等自然社会因素存在负向关联，其中气候变化因子是研究区域的水源涵养服务变化的主导因素，社会经济发展因素为次要因素。

4 展 望

研究区域水源涵养服务功能受到土地利用变化的一定影响，未来需要进一步加强对城市生态环境规划研究，落实科学合理的空间规划以继续保持土地利用结构的稳定，以减轻负向影响。当前广州市海绵城市建设正蹄疾步稳前行，但生态恢复与保护措施特别是针对水源涵养服务提升方面还需要进一步落实。后期研究可以利用水文站点数据，对模拟结果进行更为精细化的模型校验。

参考文献

[1] 吕一河,胡健,孙飞翔,等. 水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. 生态学报,2015,35(15):5 191-5 196

[2] 白杨,冯宇,张哲,等. 武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究 [J]. 地球信息科学学报,2014,16(2):233-241

[3] Leh M D K,Matlock M D,Cummings E C, et al. Quantifying and Mapping Multiple Ecosystem Services Change in West Africa [J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2013,165(Complete):6-18

[4] 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(Part 1):224-232

[5] Redhead J W,Stratford C,Sharps K, et al. Empirical Validation of the In VEST Water Yield Ecosystem Service Model at a National Scale [J]. Science of the Total Environment,2016,569:1 418-1 426

[6] 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(10):39-42

[7] 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:以广东省广州市为例[J]. 水土保持通报,2021,41(4):196-206

[8] Cong W,Sun X,Guo H,et al. Comparison of the SWAT and InVEST Models to Determine Hydrological Ecosystem Service Spatial Patterns,Priorities and Trade-offs in a Complex Basin [J]. Ecological Indicators,2020,112:106 089

[9] 包玉斌,李婷,柳辉,等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究,2016,35(4): 664-676

[10] 顾铮鸣,金晓斌,沈春竹,等. 近15a江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析[J]. 长江流域资源与环境,27(11):61-70

[11] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等. 基于InVEST模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报,2013,24(1):183-189

[12] 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

[13] 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(3):577-585

[14] 夏林,安裕伦,姜海峰,等. 基于InVEST模型的喀斯特流域水源涵养量:以贵州省内乌江流域为例[J]. 贵州科学,2019,37(1):27-32

[15] 李彪. 基于GIS和InVEST模型的南流江流域生态系统服务评估[D]. 桂林:广西师范学院,2017

[16] 谢余初,巩杰,齐姗姗,等. 基于InVEST模型的白龙江流域水源供给服务时空分异[J]. 自然资源学报,2017,32(8):1 337-1 347

[17] 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):28-32

[18] 王小琳. 基于InVEST模型的贵州省水源涵养功能研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016

[19] 傅斌,徐佩,王玉宽. 都江堰市水源涵养功能空间格局 [J]. 生态学报,2013,33(3):789-797

[20] 张晓琳,熊立华,林琳,等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理,2012,35(2):229-237

[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(4):44-47

[22] Zhou W, Liu G, Pan J, et al. Distribution of Available Soil Water Capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences,2005,15(1):3-12

[23] 尹春梅. 广东土种志:基于全国第二次土壤普查数据集 [M]. 北京:科学文库, 2017