

基于 InVEST 模型的杭州市典型年份年产量 时空变化特征及其影响因素

蔡梦卿¹, 黄璐², 严力蛟¹

(1. 浙江大学 生命科学学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 新农村发展研究院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 【目的】自然因素和土地利用变化是引起生态系统服务改变的两大驱动因素。研究年产量时空变化特征及两大驱动因素对年产量的影响, 对维持或提升城市水源涵养、保持水土具有现实意义。【方法】以浙江省杭州市为研究对象, 采用景观格局分析、空间梯度分析、相关性分析等方法, 综合应用 InVEST、ArcGIS、Fragstats、SPSS 等工具, 识别杭州市土地利用和气象因子变化特征, 评估并分析年产量时空变化特征及其与气象因子、景观格局指数的相关性。【结果】2000—2015 年杭州市年产量呈先下降后上升趋势。在空间上表现为东北高、西南低, 随着远离城市中心先增大后减小, 于 10 km 处达到最大值。建设用地的产量最大。2000—2015 年杭州市土地利用变化最剧烈的是耕地与建设用地之间的转化。景观总体呈现更强烈的破碎化和异质性趋势, 在距离城市中心 10~20 km 处达到峰值。年降水量先降低后升高, 年均气温波动上升, 年实际蒸散量处于波动状态。离城市中心 50 km 内年降水量变化不显著, 年均气温显著下降, 年实际蒸散量先减小后增大。杭州市年产量与气象因子的相关性大于其与景观格局指数的相关性, 其中与气象因子中降水量正相关性最强。【结论】气象因子的变化是引起杭州市年产量变化的主要因素, 但景观格局的影响仍值得关注。距离城市中心 10 km 处是年产量变化的拐点。图 4 表 7 参 34

关键词: 产量; InVEST 模型; 景观格局; 时空变化; 梯度分析

中图分类号: Q149 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)01-0127-09

Temporal and spatial variation characteristics of annual water yield and its influencing factors in Hangzhou based on InVEST model

CAI Mengqing¹, HUANG Lu², YAN Lijiao¹

(1. College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 2. The Rural Development Academy, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Natural factors and land use changes are important driving factors of ecosystem services change. The analysis of temporal and spatial variation characteristics in annual water yield and its main driving factors have practical significance for maintaining or improving urban soil and water conservation. [Method] This study took Hangzhou as the research object, adopted methods of landscape pattern analysis, spatial gradient analysis, and correlation analysis with the support of the InVEST model, ArcGIS, Fragstats, SPSS and other tools, identified the characteristics of land use and meteorological factors of Hangzhou, evaluated and analyzed the temporal and spatial variation of annual water yield and its correlation with meteorological factors and landscape pattern indices. [Result] The annual water yield in Hangzhou showed a first decline and then an upward trend from 2000 to 2015. The water yield is spatially high in the northeast and low in the southwest, and

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41701638); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502704)

作者简介: 蔡梦卿 (ORCID: 0000-0001-7829-3809), 从事生态系统服务研究。E-mail: caimengqing@zju.edu.cn。通信作者: 严力蛟 (ORCID: 0000-0003-2374-0354), 研究员, 博士, 从事生态系统服务、生态规划、城市生态等研究。E-mail: yanlj@zju.edu.cn

increased first and then decreased with distance from the city center, reaching the maximum at 10 km. Construction land had the largest water yield. The most dramatic change in land use in Hangzhou from 2000 to 2015 was the conversion between cultivated land and construction land. On the whole, the landscape showed a stronger trend of fragmentation and heterogeneity, reaching a peak at 10–20 km from the city center. The annual precipitation in Hangzhou decreased first and then increased. The annual average temperatures fluctuating increased and the annual actual evapotranspiration fluctuated. The annual precipitation does not change significantly within 50 km of the city center. The annual average temperature decreased significantly as it moved away from the urban center, while the annual actual evapotranspiration first decreased and then increased. The correlation between water yield and meteorological factors was greater than that of landscape patterns indices. Water yield had the strongest positive correlation with precipitation in meteorological factors. [Conclusion] The change of meteorological factors was the main factor causing annual water yield change in Hangzhou, but the impact of landscape pattern was still worthy of attention. The 10 km distance from the city center was the turning point of annual water yield. [Ch, 4 fig. 7 tab. 34 ref.]

Key words: water yield; InVEST model; landscape pattern; temporal and spatial variation; gradient analysis

联合国千年生态系统评估表明: 超过 60% 的全球生态系统服务呈退化或过度利用趋势, 自然因素和由人类活动引起的土地利用变化是导致生态服务功能退化的重要驱动因素^[1]。水资源供给是重要的生态系统服务之一, 水的可用性在空间和时间上的变化可以显著影响任何生态系统的功能和生产力^[2], 对生态系统和区域经济的可持续发展具有重要作用^[3–4]。有研究^[5–6]表明: 气候变化和土地利用变化是引起产水量变化的驱动因素。气候变化可以通过改变地区的降水量、气温和蒸散量来影响产水量^[7]。PESSACG 等^[8]和 LANG 等^[3]发现降水量变化会导致产水量的显著差异。土地利用变化可能通过改变入渗速率和蒸散速率影响水量^[9–10]。建设用地的增加会提高产水量^[11–12]。但目前气候因素和土地利用变化对产水量影响的贡献或相关程度仍存在争议。顾晋飴等^[13]在太湖流域的研究发现: 降水量较土地利用/覆被更显著地驱动产水量的变化。窦攀烽等^[14]利用情景分析发现气候变化对宁波地区产水量影响更为显著。HU 等^[15]通过主成分分析和相关性分析发现景观格局对洞庭湖地区产水量的驱动作用大于气候因素。如何有效综合评估气候因素和土地利用变化对产水量的影响仍未形成相对统一的结果。InVEST 模型产水量模块基于水量平衡原理, 以栅格为单元定量估算不同景观类型的水源供给能力, 在评估与水相关的生态系统服务时较为可靠^[16–18]。随着城镇化的进程加快, 城市结构、内部特征差异和城市生态系统服务供给等出现差异^[19–20], 并随城市化梯度差异表现^[21]。利用梯度分析研究空间布局及其时空变化过程可从空间上识别和评估土地利用变化的影响^[22–23]。杭州市是浙江省政治、经济、文化中心, 近年来城市绿地侵占与恢复并存, 产水量的时空变化特征具有复杂性和不确定性, 深刻影响着城市可持续发展和居民福祉。本研究利用遥感数据和观测数据, 在 InVEST 模型支持下, 评估杭州市 2000—2015 年产水量, 分析气候变化和土地利用变化与年产水量的相关性, 以期为提高城市水资源保护和利用、促进城市生态系统服务发展提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

浙江省杭州市位于中国东南沿海北部、长江三角洲南沿 (29°11′~30°33′ N, 118°21′~120°30′ E), 属于亚热带季风气候, 2019 年全市平均气温约 18.1 °C, 年降水量为 1 647.7 mm。夏季高温多雨, 冬季低温干燥。杭州市地形复杂多样, 东部为浙北平原地区, 西部为浙西丘陵地带, 京杭大运河和钱塘江穿城而过。截至 2019 年, 全市下辖 10 区 2 县 1 市, 分别为上城区、下城区、拱墅区、西湖区、江干区、滨江区、萧山区、余杭区、临安区、富阳区、桐庐县、淳安县和建德市。

1.2 数据来源及处理

本研究所采用的数据包括 Landsat 遥感影像数据、气象观测数据、土壤数据和地形高程数据。采用

中国科学院地理科学与资源研究所提供的长三角城市群 2000、2005、2010、2015 年共 4 期土地利用数据为基础数据, 将地类划分合并为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地等 6 类。气象数据由国家气象科学数据中心提供的浙江省基准地面气象观测站及自动站共计 18 个站点的 2000—2015 年观测数据集, 去除异常值后在 ArcGIS 平台下进行投影, 使用空间分析工具中的克里金 (Kriging) 插值分析得到 2000、2005、2010 和 2015 年的降水量、潜在蒸散量分布图, 其中潜在蒸散量按 Penman-Monteith (PM) 公式计算得到, 实际蒸散量由 InVEST 模型产水模块运行计算得到。利用中科院寒区旱区数据中心提供的中国土壤类型图提取杭州市土壤根系深度、物理组成、有机质等信息, 在 ArcGIS 平台栅格数据空间叠加运算下得到土壤有效含水量 (AWC)^[24]。采用中国科学院地理所提供的数字高程模型 (DEM) 计算得到流域矢量数据。所有数据进行栅格化处理, 转为同一投影的栅格图像, 空间坐标系为 Krasovsky_1940_Albers, 像素单元大小为 30 m×30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 产水量及其计算 利用 InVEST 模型的产水模块, 考虑实际蒸散量, 建立年降水量与 Budyko 热液耦合平衡的关系, 估算杭州市不同土地利用类型的产水功能。其核心算法是运用水量平衡法结合气候、地形和土地利用类型计算得出每个栅格的产水量。产水量为区域内各栅格的降水量减去实际蒸散量。产水量计算公式如下:

$$Y_x = P_x - T_{AEx} \quad (1)$$

式 (1) 中: Y_x 为栅格 x 的年产量 (mm); T_{AEx} 为栅格 x 的年实际蒸散量 (mm); P_x 为栅格 x 的降水量 (mm)。 T_{AEx} 根据 Budyko 曲线近似得到, 公式^[25]为:

$$T_{AEx}/P_x = (1 + w_x R_x) / (1 + w_x R_x + 1/R_x); \quad (2)$$

$$R_x = T_{PEX}/P_x; \quad (3)$$

$$C_{Kx} = T_{PEX}/T_{E0x}; \quad (4)$$

$$T_{AEx} = \min(C_{Kx} \times T_{E0x}, P_x) \quad (5)$$

式 (2)~(5) 中: R_x 为栅格 x 的 Budyko 干燥度指数, 是潜在蒸散量 (T_{PEX}) 与降水量 (P_x) 的比值。 C_{Kx} 为植被蒸散系数, 在不同的植被类型下该值是不同的, 表示不同发育期植物潜在蒸散量与参考蒸散量 (T_{E0x}) 的比值, 具体取值参考模型默认范例。 T_{AEx} 通过 T_{E0x} 直接计算, 并由 T_{E0x} 和 P_x 共同决定其取值。 w_x 是土壤可利用水量与降水量的比值。根据 DONOHUE 等^[26] 的定义:

$$w_x = Z \times (C_{AWx}/P_x) + 1.25 \quad (6)$$

式 (6) 中: C_{AWx} 为栅格 x 的土壤有效含水量 (mm), Z 为季节常数, 基于杭州市自然地理特征及相关参考文献将其取值为 6.5^[27]。本研究年产量总量为杭州市所有栅格单元产量的总和。

1.3.2 梯度分析 以城市原点 (紫薇园, 30°15'00" N, 120°10'12" E) 为城市中心、以 5 km 为间距, 建立覆盖杭州市主城区的 10 个同心圆梯度带^[28]。为消除因面积不同产生的结果差异, 采用 ArcGIS 空间分析工具 Zonal 对每个梯度带要素进行空间分布均值统计分析。

1.3.3 影响因素相关性分析 选取年降水量 (Pre)、年实际蒸散量 (AET) 和年均气温 (Tem) 作为影响年产水量的气象因子指标, 根据主成分分析 (PCA) 从密度、面积、边缘、形状、多样性和聚散性 6 个方面选取斑块密度 (PD)、最大斑块指数 (LPI)、边缘密度 (ED)、景观形状指数 (LSI)、香农多样性指数 (SHDI) 和蔓延度 (CONTAG) 等 6 个景观格局指数作为影响年产水量的景观格局指标。对研究区进行 1 km×1 km 网格化处理并去除边缘值, 分别构建气象因子和景观格局指数网格数据集, 其中景观格局指数由土地利用类型数据通过 Fragstats 4.2 软件计算得到。利用 SPSS 25 中 Pearson 分析计算得到年产量与气象因子、景观格局指数的相关性。

2 结果与分析

2.1 年产水量的年间变化

由表 1 可知: 2000—2015 年间杭州市年产量总量与平均值均呈先下降后上升趋势。就总量来看,

2005年最小,为 $9.81 \times 10^9 \text{ m}^3$,比2000年下降了23.24%,2015年达到最大值($24.48 \times 10^9 \text{ m}^3$);15 a平均增长率为6.10%。就栅格单元平均值来看,最小值为582.42 mm(2005年),最大值为1 457.24 mm(2015年),4 a相对误差为5.90%,2000—2015年平均增长率为6.17%。

从不同土地利用类型来看,2000—2015年间各类型土地栅格单元年产水量均呈先下降后上升趋势(表1)。建设用地高于其他土地利用类型,最大值为1 796.25 mm(2015年),水体产水量低于其他土地利用类型,最小值为214.30 mm(2005年)。2000—2015年间,各类型土地年产水量增长率从大到小依次为水体(181.72%)、未利用土地(95.98%)、林地(90.10%)、耕地(86.97%)、建设用地(79.42%)、草地(77.78%)。

表1 2000—2015年杭州市的产水量

Table 1 Water yield of Hangzhou during 2000–2015

年份	总量/($\times 10^9 \text{ m}^3$)	平均值/mm	耕地/mm	林地/mm	草地/mm	水体/mm	建设用地/mm	未利用土地/mm
2000	12.78	756.75	856.53	741.30	880.33	388.63	1 001.17	816.48
2005	9.81	582.42	700.64	556.62	686.54	214.30	875.89	692.31
2010	19.35	1 147.68	1 264.09	1 115.64	1 279.94	789.69	1 430.85	1 254.00
2015	24.48	1 457.24	1 601.45	1 409.23	1 565.03	1 094.85	1 796.25	1 600.17

说明:除总量外,其余产水量均为栅格单元平均值

2.2 年产水量的空间变化

从空间区域上来看,2000—2015年杭州市年产水量呈现东北高、西南低的分布特征(图1)。高值区主要分布在东北部的主城区,且呈聚集扩张趋势,栅格单元多年平均产水量为1 042.68~1 254.85 mm;其他区县市(富阳区、临安区、桐庐县、淳安县、建德市)相对较小,为933.57~1 009.06 mm(图2)。

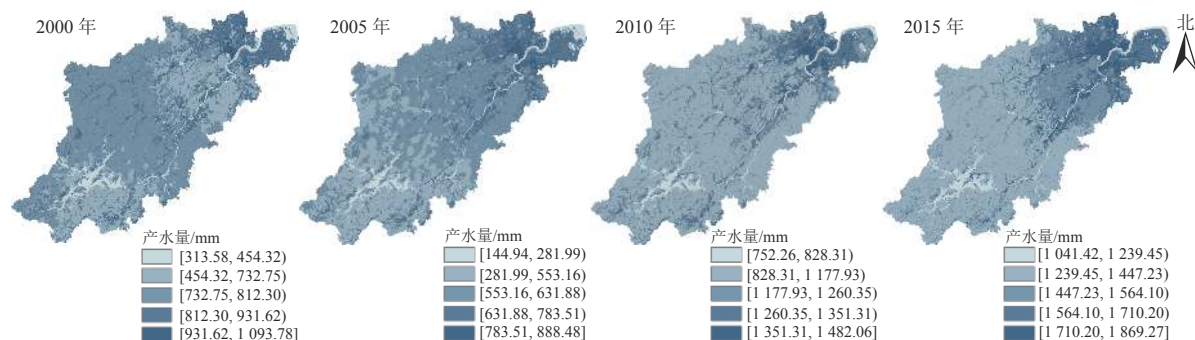


图1 杭州市2000—2015年产水量空间分布示意图

Figure 1 Spatial distribution of water yield in Hangzhou in 2000–2015

从梯度变化来看,年产水量呈现随着与城市中心距离的增加先增大后减小趋势(表2),最高值均出现在距离城市中心10 km处。对比距离城市中心5~15 km和40~50 km的年产水量发现:2000、2005、2010和2015年的差异率分别为4.50%、16.50%、9.25%和10.31%,这表明年产水量的城乡变化在2005年前后出现拐点。

2.3 土地利用和气象因子对年产水量的影响

2.3.1 土地利用类型变化 杭州市各土地利用类型转移矩阵表明(表3):2000—2015年间土地利用变化最剧烈的为耕地与建设用地之间的转化,耕地面积减少了2.75%,建设用地面积增加了3.67%,15 a间有3.24%耕地转化为建设用地。结合表1可知:杭州市2000—2015年间建设用地面积比例增加显著,导致杭州市2015年产水量显著大于2000年产水量。

2.3.2 景观格局变化 从景观格局来看,2000—2015年间杭州市存在景观明显破碎化和异质性(表4)。15 a间,PD先下降后上升,LPI下降1.23、ED上升1.07,表明景观破碎化程度明显;LSI上升3.69,表明斑块形状较不规则、复杂度不断增加;CONTAG下降1.77,表明景观连通性处于下降趋势,反映景观破碎化增加;SHDI由0.95上升至1.00,表明景观异质性增加。从梯度变化来看,随着与城市中心距

离的增加, LPI、CONTAG 总体呈现先减小后逐步增加的趋势, 最大斑块面积和景观连通性先减小后增大; ED、LSI、PD、SHDI 总体呈现先增加后逐步减小的趋势, 表明随着与城市中心距离的增加, 景观破碎化和异质性先增大后减小(图 3)。其中, CONTAG 和 SHDI 的拐点出现在 10 km 处, 表明在距离城市中心 10 km 处, 景观连通性最小、异质性最大; PD、ED、LSI 的拐点出现在 20 km 处, 表明在距离城市中心 20 km 处, 景观破碎化最为严重; LPI 的拐点则在 15 和 30 km 处, 表明在距离城市中心 15 和 30 km 处, 最大斑块面积减小导致一定程度的景观破碎化。因此, 在距离城市中心 10~20 km 处存在最为显著的景观破碎化和异质性。结合年产水量发现: 单位面积产水量拐点出现在距离城市中心 10 km 处, 与景观格局的梯度变化趋势较为一致。

2.3.3 气象因子变化 从时间上看(表 5): 2000—2015 年间, 杭州市年降水量最小的是 2005 年, 最大的是 2015 年。与 2000 年相比, 2005 年降水量减少 183.54 mm (13.90%), 2015 年增加 696.21 mm (52.75%)。年均气温最低的是 2000 年, 最高的是 2015 年, 相差 0.31 ℃。年均实际蒸散量最小值和最大值分别出现在 2005 和 2010 年; 与 2000 年相比, 2005 年实际蒸散量减少 9.21 mm (1.64%), 2010 年增加 2.31 mm (0.41%)。结合表 1 可知: 降水量变化与年产水量趋势一致。从空间上看, 各县区气象因子存在差异(表 6)。主城区与富阳区年降水量为 1 540~1 545 mm, 其他 4 区县市均高于 1 545 mm。主城区年均气温为 17.35~17.39 ℃, 其他 5 区县市为 17.34~17.38 ℃。主城区年实际蒸散量明显低于其他 5 区县市, 其中最低值出现在下城区 (289.10 mm),

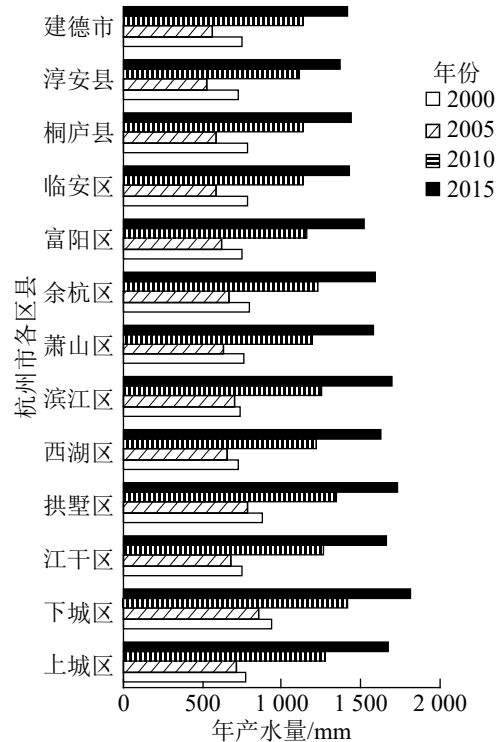


图 2 杭州市各县区年产水量变化趋势

Figure 2 Changes of water yield of counties and districts in Hangzhou

表 2 2000—2015 年杭州市沿梯度变化的年产水量

Table 2 Water yield along gradient in Hangzhou during 2000–2015

年份	不同梯度下的产水量/mm									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50 km
2000	774.12	787.18	775.87	772.57	769.36	780.96	770.26	757.03	749.18	725.81
2005	704.70	722.54	706.81	680.91	667.67	663.95	644.82	618.20	596.43	567.25
2010	1 260.33	1 282.99	1 268.25	1 241.94	1 220.99	1 211.72	1 186.36	1 160.96	1 153.73	1 144.39
2015	1 663.70	1 705.39	1 681.58	1 639.73	1 612.60	1 595.34	1 565.24	1 528.58	1 509.99	1 491.25

表 3 杭州市 2000—2015 年各土地利用类型转移矩阵

Table 3 Statistics of conversion rates of landscape types in Hangzhou from 2000 to 2015

土地利用类型		2015年						
		耕地/%	林地/%	草地/%	水体/%	建设用地/%	未利用土地/%	合计/%
2000年	耕地	15.84	0.98	0.04	0.33	3.24	0.00	20.44
	林地	1.04	66.40	0.28	0.16	0.51	0.01	68.40
	草地	0.04	0.22	1.98	0.01	0.03	0.01	2.29
	水体	0.57	0.14	0.02	4.71	0.15	0.00	5.60
	建设用地	0.20	0.04	0.01	0.02	2.98	0.00	3.25
	未利用土地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
	合计	17.69	67.79	2.33	5.24	6.92	0.04	100.00

说明: 对角线粗体数值为没有发生变化的土地利用类型的保留率

表4 2000—2015年杭州市各景观格局指数

Table 4 Statistics of landscape pattern indices in Hangzhou from 2000 to 2015

年份	景观格局指数					
	PD	LPI	ED	LSI	CONTAG	SHDI
2000	0.48	35.52	20.20	68.08	69.31	0.95
2005	0.43	35.04	20.98	70.59	68.41	0.97
2010	0.46	34.50	21.50	72.27	68.04	0.98
2015	0.46	34.29	21.27	71.77	67.54	1.00

最高值出现在淳安县 (617.13 mm)。从城乡梯度来看, 在距城市中心 50 km 内, 年降水量变化不大; 随着距离增加, 年均气温逐渐下降, 年实际蒸散量先减小后增大, 最小值出现在距离 10 km 处 (图 4)。结合 2000—2015 年产水量的空间分布特征和梯度变化趋势可知: 年产水量空间变化与年实际蒸散量表现相似。

2.3.4 年产水量与气象因子、景观格局指数的相关性分析 由表 7 可知: 2000—2015 年, 杭州市年产水量与降水量相关性最强, 相关系数为 0.959, 与气温呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与实际蒸散量呈极显著负相关 ($P<0.01$)。在景观格局指数方面, 年产水量与 PD 相关性最强, 相关系数为 0.153, 与 ED、LSI、SHDI 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 LPI 呈显著负相关 ($P<0.05$), 与 CONTAG 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

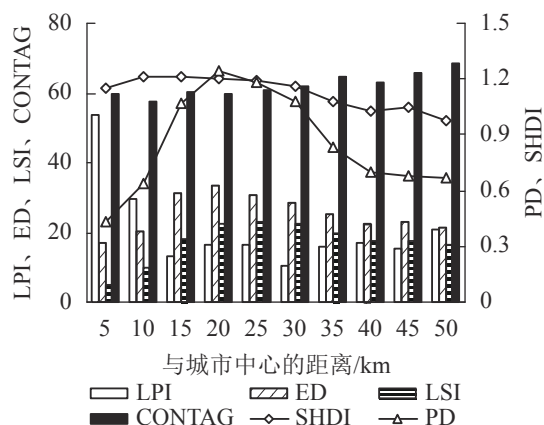


图3 杭州市各景观格局指数沿梯度变化趋势
Figure 3 Changes of landscape pattern indices along gradient in Hangzhou

表5 2000—2015年杭州市的气象因子

Table 5 Statistics of climate factors in Hangzhou from 2000 to 2015

年份	年降水量/mm	年均气温/℃	年实际蒸散量/mm	年份	年降水量/mm	年均气温/℃	年实际蒸散量/mm
2000	1 319.79	17.25	563.04	2010	1 713.03	17.26	565.35
2005	1 136.25	17.38	553.83	2015	2 016.77	17.56	559.54

表6 2000—2015年杭州市各县区的气象因子

Table 6 Statistics of climate factors of counties and districts in Hangzhou from 2000 to 2015

各县区	年降水量/mm	年均气温/℃	年实际蒸散量/mm	各县区	年降水量/mm	年均气温/℃	年实际蒸散量/mm
上城区	1 543.10	17.39	432.37	余杭区	1 544.75	17.37	477.82
下城区	1 543.95	17.38	289.10	富阳区	1 542.52	17.36	533.47
江干区	1 543.29	17.37	455.50	临安区	1 545.74	17.34	564.34
拱墅区	1 544.40	17.38	359.98	桐庐县	1 545.84	17.35	560.42
西湖区	1 543.24	17.39	488.31	淳安县	1 550.70	17.38	617.13
滨江区	1 542.26	17.39	446.74	建德市	1 548.63	17.37	583.63
萧山区	1 540.14	17.35	497.46				

3 讨论

InVEST 模型水量平衡模型原理认为: 降水量和实际蒸散量是估算产水量的 2 个重要参数, 其中降水量作为气象因子的主要变量, 由自然条件决定, 受人为因素影响较小。也有研究^[15]认为: 景观格局比气象因子对年产水量的影响更大。本研究发现: 2000—2015 年杭州市年产水量与降水量的相关性大于其与指数, 与顾晋怡等^[13]、窦攀烽等^[14]结果一致。气温与年产水量具有一定的相关性, 而实际蒸散量由于计算方法受到气象因子、土地利用和景观格局的综合影响, 相关系数较小。年产水量与各景观格局指

数相关系数均较小,但显著性较强,说明虽然景观格局不是影响杭州市年产水量变化最重要的影响因素,但仍值得关注。提示不同地区或生态系统间影响年产水量的决定性因素应该是不同的。

研究发现:2000—2015 年间,杭州市年产水量总体上表现为先降低后增加,建设用地的年产水量高于其他各土地利用类型。建设用地是研究区变化规模和速度最快的土地利用类型,由不透水性的下垫面组成,植被覆盖少,不利于有效拦截大量降水,同时地表蒸散发能力较弱,人类活动更为剧烈;建设用地的增加一定程度上引起年产水量的增加^[11]。相比之下,水体单位面积产水量最小。研究区水域

广布(千岛湖、西湖、西溪湿地、钱塘江),水体下渗程度小于其他土地利用类型,但由于水面蒸散速度与强度高^[29],因此水体的年产水量也最小。这也可能是研究区生态系统质量整体提升所带来的效应^[30]。林地通过林冠层、枯枝落叶层和土壤层拦截降雨,并通过蒸腾作用散失水分。快速城市化导致研究区部分高质量城市绿地损失,景观破碎化和异质性显著增大,因此林地提供的产水量不稳定^[15];而为建设绿色城市、生态城市新增的城市林地大部分处于幼龄阶段,这可能是林地产水量在 2000—2015 年间增长率大于耕地和草地的原因,也说明了城市林地恢复及提供优质服务需要较长时间,具有较大的提升空间。

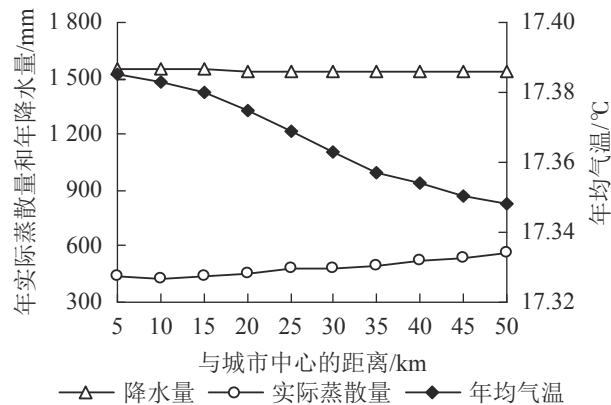


图 4 杭州市气象因子沿梯度变化趋势

Figure 4 Changes of climate factors along gradient in Hangzhou

表 7 杭州市年产水量与气象因子、景观格局指数的 Spearman 相关性分析

Table 7 Spearman correlation coefficients among water yield, climate factors and landscape pattern indices

指标	相关性	显著性	指标	相关性	显著性
Pre	0.959**	0.000	ED	0.148**	0.002
Tem	0.325**	0.000	LSI	0.129**	0.006
AET	-0.110**	0.000	CONTAG	-0.132**	0.002
PD	0.153**	0.103	SHDI	0.139**	0.001
LPI	-0.109*	0.016			

说明: ** 表示在 0.01 水平极显著相关(双尾), * 表示在 0.05 水平上显著相关(双尾)

由主城区梯度变化可知:景观格局在距离城市中心 10~20 km 处破碎化程度尤其严重,表明 2000—2015 年间此区域是人类活动最为密切、景观破坏最为严重的区域。距离城市中心 10 km 处的单位面积产水量最大,表明这是年产水量在梯度上变化的拐点;气象因子在该区域内变化不大,表明景观格局的变化将重新分配城市产水服务,对城市生态平衡和可持续发展产生积极或消极影响^[31]。该结果提示:快速发展的城市化进程中,合理布局规划城市用地^[32],可避免因大规模集中建设导致的生态系统服务功能的降低。

目前 InVEST 模型产水模块已被广泛应用,与邱问心等^[33]研究相比,本研究利用 Penman-Monteith 公式计算年蒸散量具有一定的可行性。《杭州市水资源公报》数据显示:杭州市 2000、2005、2010 和 2015 年实际产水深度均值分别为 0.63、0.54、1.13 和 1.43 m。本研究结果对比验证发现:4 个年份相对误差为 5.90%,说明模拟结果相对可信。但其中部分输入参数的选择仍会影响结果的准确性,选择不同的经验公式、空间插值方式和土地利用类型分类均会得到不同的结果。本研究采用研究年份的当年气象数据进行模型估算,未考虑到气象因子作用于环境过程的时间滞后性^[34];对景观格局的分析仅考虑了景观水平,对斑块和类型水平的研究有待进一步研究。未来可通过评估其他指标与景观格局的空间相关性来进一步研究生态系统服务与城乡景观格局的关系,为实现区域可持续规划提供科学依据。

4 参考文献

[1] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystem and Human Well-being: Synthesis* [M]. Washington DC: Island Press, 2005:

137.

- [2] BAI Yang, OCHUODHO T O, YANG Jian. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. *Ecol Indic*, 2019, **102**: 51 – 64.
- [3] LANG Yanqing, SONG Wei, ZHANG Ying. Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China [J]. *Physic Chem Earth*, 2017, **101**: 102 – 111.
- [4] ZHENG Hua, LI Yifeng, ROBINSON B E, *et al.* Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices [J]. *Front Ecol Environ*, 2016, **14**(10): 527 – 532.
- [5] 吕乐婷, 任甜甜, 李赛赛, 等. 基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(4): 144 – 150, 157.
- LÜ Leting, REN Tiantian, LI Saisai, *et al.* Analysis on spatio-temporal variation of water supply in Dalian City based on InVEST model [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2019, **39**(4): 144 – 150, 157.
- [6] 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.
- PAN Tao, WU Shaohong, DAI Erfu, *et al.* Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(1): 183 – 189.
- [7] LEGESSE D, VALLET-COULOMB C, GASSE F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia [J]. *J Hydrol*, 2003, **275**(1): 67 – 85.
- [8] PESSACG N, FLAHERTY S, BRANDIZI L, *et al.* Getting water right: a case study in water yield modelling based on precipitation data [J]. *Sci Total Environ*, 2015, **537**: 225 – 234.
- [9] SAMPLE J E, BABER I, BADGER R. A spatially distributed risk screening tool to assess climate and land use change impacts on water-related ecosystem services [J]. *Environ Modelling Software*, 2016, **83**: 12 – 26.
- [10] HOYER R, CHANG Heejun. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization [J]. *Appl Geogr*, 2015, **53**: 402 – 416.
- [11] GAO Jie, LI Feng, GAO Hui, *et al.* The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China [J]. *J Cleaner Prod*, 2016, **163**(S): 148 – 155.
- [12] NIE Wenming, YUAN Yongping, KEPNER W, *et al.* Assessing impacts of land use and land cover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed [J]. *J Hydrol*, 2011, **407**: 105 – 114.
- [13] 顾晋飴, 李一平, 杜薇. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养能力评价及其变化特征分析[J]. 水资源保护, 2018, **34**(3): 62 – 67, 84.
- GU Jinyi, LI Yiping, DU Wei. Evaluation on water source conservation capacity and analysis of its variation characteristics of Taihu Lake Basin based on InVEST model [J]. *Water Resour Prot*, 2018, **34**(3): 62 – 67, 84.
- [14] 窦攀烽, 左舒翟, 任引, 等. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(7): 2398 – 2409.
- DOU Panfeng, ZUO Shudi, REN Yin, *et al.* The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo region [J]. *Acta Sci Circum*, 2019, **39**(7): 2398 – 2409.
- [15] HU Wenmin, LI Guo, GAO Zhihai, *et al.* Assessment of the impact of the Poplar Ecological Retreat Project on water conservation in the Dongting Lake wetland region using the InVEST model[J/OL]. *Sci Total Environ*, 2020, **733**: 139423[2021-01-20]. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.139423](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139423).
- [16] MOREIRA M, FONSECA C, VERGÍLIO M, *et al.* Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: a case study of Pico Island (Azores, Portugal) [J]. *Land Use Policy*, 2018, **78**: 637 – 649.
- [17] LOGSDON R A, CHAUBEY I. A quantitative approach to evaluating ecosystem services [J]. *Ecol Modelling*, 2013, **257**(24): 57 – 65.
- [18] VIGERSTOL K L, AUKEMA J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services [J]. *J Environ Manage*, 2011, **92**(10): 2403 – 2409.
- [19] de GROOT R S, ALKEMADE R, BRAAT L, *et al.* Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making [J]. *Ecol Complex*, 2009, **7**(3): 260 – 272.

- [20] GRAFIUS D R, CORSTANJE R, HARRIS J A. Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis [J]. *Landscape Ecol*, 2018, **33**(4): 557 – 573.
- [21] DAVIES Z G, EDMONDSON J L, HEINEMEYER A, *et al.* Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale [J]. *J Appl Ecol*, 2011, **48**(5): 1125 – 1134.
- [22] ANDERSSON E, AHRNÉ K, PYYKÖNEN M, *et al.* Patterns and scale relations among urbanization measures in Stockholm, Sweden [J]. *Landscape Ecol*, 2009, **24**(10): 1331 – 1339.
- [23] 李全, 李腾, 杨明正, 等. 基于梯度分析的武汉市生态系统服务价值时空分异特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(6): 2118 – 2125.
- LI Quan, LI Teng, YANG Mingzheng, *et al.* Spatiotemporal variation of ecosystem services value based on gradient analysis in Wuhan: 2000–2010 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(6): 2118 – 2125.
- [24] 游松财, 邸苏闯, 袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J]. 自然资源学报, 2009, **24**(3): 545 – 552.
- YOU Songcai, DI Suchuang, YUAN Ye. Study on soil field capacity estimation in the Loess Plateau Region [J]. *J Nat Resour*, 2009, **24**(3): 545 – 552.
- [25] ZHANG Lingyushan, HICKEL K, DAWES W R, *et al.* A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J]. *Water Resour Res*, 2004, **40**(2): 89 – 97.
- [26] DONOHUE R J, RODERICK M L, McVICAR T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model [J]. *J Hydrol*, 2012, **436/437**: 35 – 50.
- [27] ZHANG Canqiang, LI Wenhua, ZHANG Biao, *et al.* Water yield of Xitiaoxi River Basin based on InVEST modeling [J]. *J Resour Ecol*, 2012, **3**(1): 50 – 54.
- [28] HOU Lei, WU Faqi, XIE Xinli. The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an city, China[J/OL]. *Ecol Indic*, 2020, **108**: 105720[2021-01-20]. doi: [10.1016/j.ecoind.2019.105720](https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2019.105720).
- [29] 赵晓松, 刘元波, 吴桂平. 基于遥感的鄱阳湖湖区蒸散特征及环境要素影响[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 428 – 436.
- ZHAO Xiaosong, LIU Yuanbo, WU Guiping. A remote-sensing-based study on evapotranspiration and the environmental factors over the Lake Poyang region [J]. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 428 – 436.
- [30] 卢慧婷, 黄琼中, 朱捷缘, 等. 拉萨河流域生态系统类型和质量变化及其对生态系统服务的影响[J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8911 – 8918.
- LU Huiting, HUANG Qiongzong, ZHU Jieyuan, *et al.* Ecosystem type and quality changes in Lhasa River Basin and their effects on ecosystem services [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(24): 8911 – 8918.
- [31] YU Zhaowu, YAO Yawen, YANG Gaoyuan, *et al.* Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution [J]. *For Ecol Manage*, 2019, **446**: 214 – 225.
- [32] 寿飞云, 李卓飞, 黄璐, 等. 基于生态系统服务供求评价的空间分异特征与生态格局划分: 以长三角城市群为例[J]. 生态学报, 2020, **40**(9): 2813 – 2826.
- SHOU Feiyun, LI Zhuofei, HUANG Lu, *et al.* Spatial differentiation and ecological patterns of urban agglomeration based on evaluations of supply and demand of ecosystem services: a case study on the Yangtze River Delta [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(9): 2813 – 2826.
- [33] 邱问心, 张勇, 俞佳骏, 等. InVEST 模型水源涵养模块实地应用的可行性验证[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(5): 810 – 817.
- QIU Wenxin, ZHANG Yong, YU Jiajun, *et al.* Feasibility verification with field application of a water conservation module using the InVEST Model [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(5): 810 – 817.
- [34] NALEWANKOVÁ P, SITKOVÁ Z, KUCERA J, *et al.* Impact of water deficit on seasonal and diurnal dynamics of European Beech transpiration and time-lag effect between stand transpiration and environmental drivers[J/OL]. *Water*, 2020, **12**(12): 3437[2021-01-20]. doi: [10.3390/w12123437](https://doi.org/10.3390/w12123437).