

基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析

吕乐婷, 任甜甜, 李赛赛, 韩月驰

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要: [目的] 研究大连市产水量的时空分布特征和影响因子, 为该市水资源的开发与保护提供可视化的评估结果和依据。[方法] 基于 InVEST 模型的产水量模块, 探究 1980—2015 年大连市降雨、气温、潜在蒸散、实际蒸散及土地利用状况变化特征, 定量研究 1980—2015 年大连市产水量的时空分布特征及其成因。[结果] ① 1980—2015 年期间大连市年均降水和潜在蒸散发不显著下降, 年均气温和干燥系数显著增加, 年均实际蒸散量显著下降。② 研究期间大连市耕地、林地面积有所减少。城市建设用地面积有所增加, 主要由耕地转移而来。其他用地类型面积变化较小。③ 研究区平均产水量为 226.36 mm, 产水总量 $2.70 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。空间上由东北向西南递减。庄河市年均产水总量最大, 达到 $1.10 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。[结论] 研究区产水量的变化是气候变化和土地利用共同作用的结果。气候变化是影响产水量变化的主要驱动力, 土地利用变化对产水量的增加有轻微影响。

关键词: 生态系统; 产水量; InVEST 模型; 大连市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)04-0144-07

中图分类号: K903

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.023; Lü Leting, Ren Tiantian, Li Saisai, et al. Analysis on spatio-temporal variation of water supply in Dalian City based on InVEST Model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 144-150.

Analysis on Spatio-temporal Variation of Water Supply in Dalian City Based on InVEST Model

Lü Leting, Ren Tiantian, Li Saisai, Han Yuechi

(Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of the water supply in Dalian City of Liaoning Province were studied in order to provide visual evaluation results and a basis for the development and protection of water resources. [Methods] Based on the InVEST model, the characteristics of rainfall, air temperature, potential evapotranspiration, actual evapotranspiration, and land use in Dalian City from 1980 to 2015 were investigated. Quantitative estimation of spatial and temporal distribution characteristics and causes of water supply in Dalian City from 1980 to 2015 were also analyzed. [Results] ① From 1980 to 2015, the average annual precipitation and potential evapotranspiration of Dalian City did not decrease significantly, the average annual temperature and drying coefficient increased significantly, and the annual actual evapotranspiration decreased significantly. ② The area of cultivated land and woodland decreased, the area of urban construction land transferring from increased, and the area of other land types had less change. ③ The average water supply was 226.36 mm and the total water production was $2.70 \times 10^9 \text{ m}^3$. It showed a trend of decreasing form the northeast to the southwest. The annual water production in Zhuanghe City was the largest, reaching $1.10 \times 10^9 \text{ m}^3$. [Conclusion] The change of water supply was resulted from both climate change and land use. Climate change was the main driving force for water supply change, and land use change had some slight effects on the increase of water supply.

Keywords: ecosystem; water supply; InVEST model; Dalian City

收稿日期: 2019-03-08

修回日期: 2019-03-29

资助项目: 辽宁省社会科学规划基金项目“1980—2018 年辽宁省生态水源涵养服务价值时空动态变化分析”(L18CJY006); 国家自然科学基金项目“流域景观格局对非点源污染影响的定量评估: 以辽宁省汤河流域为例”(41701208)

第一作者: 吕乐婷(1984—), 女(满族), 辽宁省大连市人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事水资源评估与水文生态系统研究。E-mail: lvleting@lnnu.edu.cn.

水资源是工农业生产、经济发展和环境改善不可替代的自然资源。近年来,由于气候变化带来的水源供给的不确定性,严重威胁着生态系统的安全与稳定,影响着自然景观变化、区域人口与社会经济发展的布局^[1]。因此,量化地评估区域生态系统水源供给功能是社会经济发展的需要,也是当前生态学和文学交叉领域研究的主要议题^[2]。随着遥感 GIS 技术与水文模型的发展,越来越多的学者通过水文模型分析和评估区域生态系统水源供给功能^[3-4],如 SWAT 模型、InVEST 模型等。InVEST 模型产水量模块基于水量平衡原理,可充分考虑不同土地利用类型下土壤渗透性的空间差异性及地形、地表粗糙程度等因素对径流的影响,以栅格为单元定量估算不同景观类型的水源供给能力^[4]。该模型基于 GIS 平台,将量化的生态系统服务功能以地图的形式表现出来,不再用繁琐的计算公式和过多的文字赘述来表达,且优化了很多复杂的问题^[5]。目前已被学者应用于北京山区^[6]、黄土高原^[7]、三江源^[8]、白龙江流域^[9]等生态系统服务的评估与研究中。随着社会经济发展,土地利用方式逐渐改变,流域水源供给功能等在内的生态系统服务正在发生变化^[10]。本文应用 InVEST 模型产水量模块对不同土地利用下大连市产水量的时空分布特征和影响因子进行分析,为大连市水资源的开发与保护提供可视化的评估结果和依据,增强全社会的生态保护红线意识。

1 研究区概况

大连市(120°58′—123°31′E, 38°43′—40°10′N)位于辽东半岛南端,东临黄海,西临渤海,北依东北三省及内蒙古广阔腹地,南与山东半岛隔海相望^[11]。下属区县包括庄河市、普兰店区、瓦房店市、金州区、长海县、市内 4 区(中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区)及旅顺口区,总面积 $1.30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区位于暖温带大陆性季风气候区,冬无严寒,夏无酷暑,四季分明;多年平均气温 10.5℃,年均降水量在 550~950 mm 之间,降水空间分布由东北向西南逐渐减少。流域内耕地、林地资源丰富,耕地资源是大连市面积最大,分布最广的资源,面积比例为 46.43%。以林地、耕地为主的生态系统对水源的供给功能起着关键性的作用^[12]。

2 研究方法 with 数据处理

2.1 InVEST 模型产水量模型原理

InVEST 模型“产水量”子模块基于水量平衡原理估算产水量。该模块将每个栅格单元的产水量定

义为该栅格范围内的降水量扣除蒸散量(包括植物蒸腾和地表蒸发)之后,剩余的那一部分水量。然后,假设每一个栅格单元所有的产水量都通过地表径流或者地下径流的方式到达了流域出口;最后在子流域尺度上对每一个栅格的产水量进行加和或求取其平均值。模型主要算法如下:

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

式中: Y_{xj} ——年产水量; P_x ——年均降雨量; AET_{xj} ——土地利用类型 j 上栅格单元 x 的年平均实际蒸发量,由公式(2)计算:

$$\frac{\text{AET}_{xj}}{P_x} = \frac{1 + w_x R_{xj}}{1 + w_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

式中: R_{xj} ——Bydyko 干燥指数,无量纲,表示潜在蒸发量与降雨量的比值,由公式(3)计算:

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} \times \text{ET}_0}{P_x} \quad k = \min\left(1, \frac{\text{LAI}}{3}\right) \quad (3)$$

式中: k_{xj} ——栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的植被蒸散系数,由植被叶面积指数 LAI 计算获得; ET_0 ——潜在蒸发量,由 Penman-Monteith 公式计算,计算公式为:

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{\text{mean}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (4)$$

式中: ET_0 ——潜在蒸发量(mm/d); R_n ——地表净辐射[MJ/(m·d)]; G ——土壤热通量[MJ/(m²·d)]; r ——干湿表常数(kPa/℃); T_{mean} ——日平均温度(℃); u_2 ——2 m 高处风速(m/s); e_s ——饱和水汽压(kPa); e_a ——实际水汽压(kPa)。

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

式中: Z ——经验常数,代表区域降水分布及其他水文地质特征。根据相关研究,对于冬季降水为主(12月至翌年4月)的地区, Z 值接近 10,而对于降水均匀分布的湿润地区和夏季降水为主的地区, Z 值接近 1^[12]。 Z 值越高,或干旱指数较大或较小的地区,模型结果受季节常数 Z 影响越小^[13]; AWC_x ——栅格单元 x 的土壤有效含水量,由土壤深度和理化性质决定。

2.2 数据来源及处理

(1) 土地利用数据。1980, 1990, 2000 和 2015 年 4 期的土地利用数据(空间分辨率为 1 km)均来源于中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>),数据生产制作是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生

成。本研究区的土地利用类型根据实际情况归并调整为 6 类,即耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用地(表 1)。

(2) 气象数据。本研究选取大连市 1985—2015 年降水、气温、风速、日照时数、气压数据,均来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。为了提高数据的代表性,将数据分为 4 个时段(1980—1985 年,1986—1996 年,1997—2007 年,2008—2015 年),1980,1990,2000 和 2015 年的土地利用状况分别代表 4 个时段的土地利用状况。降水要素先进行多年平均,然后通过反距离加权插值得到多年平均降水量栅格数据;其它气候要素均选用日值,采用 FAO 修正的 Penman-Monteith 公式计算^[14]潜在蒸发量,通过反距离加权插值法得到多年平均潜在蒸发量栅格数据。

(3) 土壤厚度和土壤有效含水量。土壤厚度数据来源于联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库,中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据;土壤有效含水量在分析土壤质地(砂土—壤土—黏土)百分比含量基础上,利用土壤有效含水量经验公式在 SPAW 软件中计算获得。

(4) 生物物理参数表。生物物理参数表反映了研究区土地利用和土地覆盖类型的属性,包括土地利用编码、植被最大深度、蒸散系数等。这些数据根据前人的研究成果^[15]和 InVEST 模型数据库资料获得。

表 1 1980—2015 年大连市土地利用类型					%
编号	土地利用类型	1980 年 比例	1990 年 比例	2000 年 比例	2015 年 比例
1	耕地	47.00	47.03	46.49	46.43
2	林地	39.76	39.34	38.89	37.95
3	草地	1.52	1.47	1.45	1.38
4	水域	4.05	3.98	4.16	4.18
5	城乡工矿居民用地	7.31	7.99	8.96	9.97
6	未利用地	0.35	0.19	0.06	0.1

3 结果与分析

3.1 产水量的时间变化特征

大连市 1980—2015 年降水、气温、潜在蒸发、实际蒸散、干燥系数(实际蒸散量占降水量的比例)、产水量的年际变化趋势如图 1 所示。研究区多年平均降水量 677.50 mm,最高降水量 1 007.01 mm(1985 年),最低降水量 403.39 mm(2015 年),年均降水量呈不显著下降趋势,多年平均气温 9.64 ℃,呈显著上升趋势($p=0.025$),上升速率为 0.179 ℃/10 a;年均潜在蒸散量 947.74 mm,呈不显著下降趋势,降低速率为 12.67 mm/10 a;年均实际蒸散量 445.78 mm,呈显著下降趋势($p=0.001$),降低速率为 19.22 mm/10 a;年均干燥系数 0.72,呈显著上升趋势,上升速率为 0.057/10 a,这意味着大部分降水通过实际蒸散返回到了大气当中。在气象要素变化的影响下,研究区多年平均产水量 226.36 mm,占降水量 33.41%,呈不显著下降趋势,降低速率为 14.7 mm/10 a。

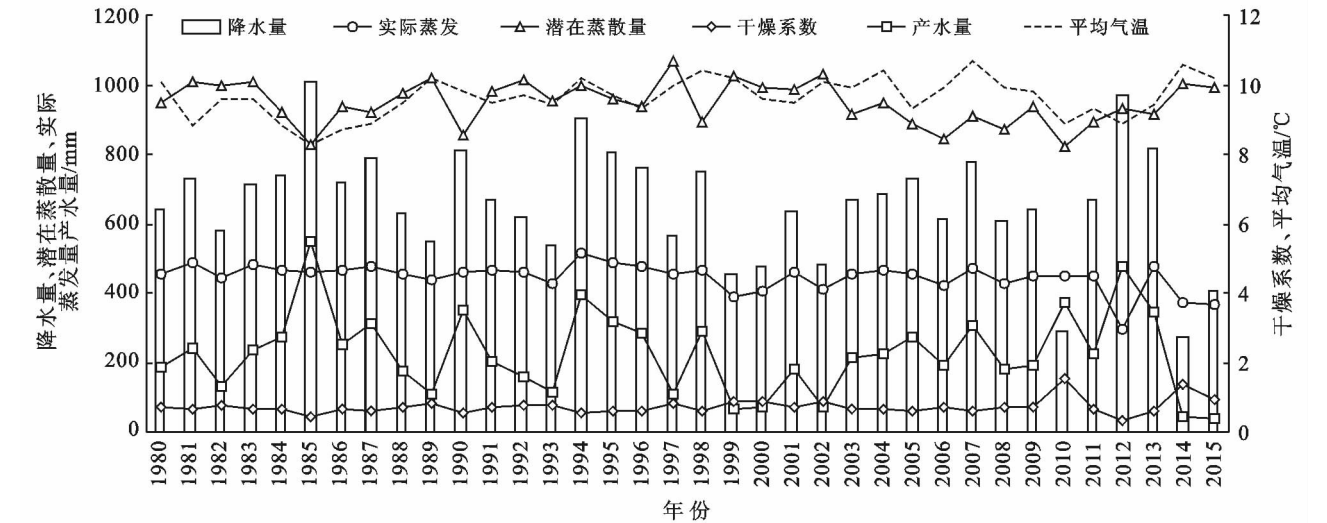


图 1 大连市降水、气温、潜在蒸散、实际蒸散、干燥系数及产水量时间变化

经过相关分析得出(表 2),1980—2015 年,研究区产水量与降水量呈显著正相关,相关系数为 0.793($p<0.01$);与气温、潜在蒸散、干燥系数呈显著负相关,相关系数分别为 $-0.517(p<0.01)$, $-0.624(p<0.01)$, $-0.486(p<0.01)$ 。潜在蒸发反映了水分充分供给

条件下最大的蒸散量,受气温的显著影响($R=0.344,p<0.05$)。实际蒸散代表了综合考虑气候要素及下垫面状况下的蒸发能力,受降水和潜在蒸发影响,与降水呈显著正相关($R=0.365,p<0.05$),与潜在蒸发呈不显著负相关,相关系数为 -0.086 ,也与地

表覆盖类型有关。综合分析,本研究认为降水量是影响大连市产水量的主要气候因素,同时受气温、潜在蒸发与干燥系数的影响。

表 2 1980—2015 年大连市产水量与气候要素的相关性					
项 目	降水量/ mm	气温/ ℃	潜在 蒸发/mm	实际 蒸散/mm	干燥 系数
相关性	0.793**	-0.517**	-0.624**	0.284	-0.486**
显著性	0.000	0.001	0.000	0.094	0.003
样本数	36	36	36	36	36

注:**表示在 0.01 水平,相关性显著。

3.2 产水量的空间变化特征

大连市气象要素、土地利用类型、产水量空间分布特征如图 2 所示。由图 2 可知,1980—2015 年,大连市年均降水量自东北向西南 597.57~803.29 mm。其中,庄河市年均降水量最丰富,达 733.65 mm,其次为普兰店区,达 672.09 mm,瓦房店市和南部 7 区县的降水量次之,分别为 644.73,643.94. mm。潜在蒸发空间特征与降水量相反,自东北向西南递增 858.33~1 036.39 mm。其中,南部 7 区县潜在蒸发量最大,为 998.94 mm;瓦房店市、普兰店区的潜在蒸发量次之,分别为 954.06,938.30 mm;庄河市的潜在蒸发量最小,为 881.92 mm。实际蒸散空间分布与土地利用类型、降水基本一致,不同土地利用类型单位面积实际蒸散量不同,具体表现为:水域(616.74 mm)>林地(508.87 mm)>耕地(423.55 mm)>草地(422.86 mm)>居民地(306.83 mm)>未利用地(409.57 mm)。庄河市降水量居大连市之首,用地类型以水域、耕地、林地为主,蒸散发能力强,因此年均实际蒸散量最高,达 457.22 mm,分别是南部七区县、普兰店区、瓦房店市的 1.12,1.00 和 1.02 倍(图 2,表 3)。

受降水、蒸散发、土地利用(图 2)的综合影响,大连市产水量总体变化趋势为由东北向西南波动变化。高值区主要集中在庄河市东北部、瓦房店市南部,多年平均产水量在 295.46~611.34 mm 之间。庄河市东北部降水丰富,产水量大;瓦房店南部、南部 7 区县

中部以城市建设用地为主,蒸发能力弱,产水量亦最大;庄河市、瓦房店市北部及南部 7 区县东北部、普兰店区产水量次之,集中在 168.62~295.46 mm 之间;南部 7 区县西南部、瓦房店市东北部以耕地和林地为主,蒸散系数高,对降水的截留能力强,产水量相对较小。从产水总量来看,庄河市因其降水量最大,土地面积广阔,年均产水量最大,达 276.78 mm,占降水量的 37%,产水能力最高,分别是南部 7 区县、普兰店区、瓦房店市的 1.16,1.29,1.39 倍(表 3)。

表 3 1980—2015 年大连市年均气象要素及产水量					
地 区	降水量/ mm	潜在蒸散 量/mm	实际蒸散 量/mm	产水量/ mm	产水量 占比/%
庄河市	733.65	881.92	457.22	276.78	37.73
普兰店区	672.09	938.30	457.16	215.28	32.03
瓦房店市	644.73	954.06	445.72	199.65	30.97
南部七区县	643.94	998.94	406.57	237.82	36.93

4 气候变化和土地利用变化对产水量的影响

4.1 土地利用结构及转移方向分析

由表 4 可知,大连市耕地和林地面积所占比例较大,分别为 46%,38%,其次为城市建设用地,达 10%,而草地、水体及未利用地所占的比例较小,分别为 1.4%,4.2%和 0.1%。1980—2015 年,耕地、林地、未利用地面积均有不同程度的减小。其中,耕地面积减小 87 km²,减幅 1%,主要 59%转向建设用地及 29%转向林地;林地面积减小 216 km²,减幅 2%,主要 95%转向耕地。城镇建设用地、草地、水域的面积均有不同程度的增加。草地、水域面积增幅较小,分别为 0.1%和 0.2%。城镇建设用地面积增加 339 km²,增幅 2.7%,主要由 60%以上的耕地转移而来。从总体特征来看,大连市域是一个典型的快速城市化区域,建设用地 36 a 间快速增长,这主要是因为快速城镇化过程中,耕地转为建设用地,而由于自然地理位置的原因,其它土地利用类型转换为建设用地的面积很小^[16]。

表 4 1980—2015 年大连市土地利用类型转移矩阵								km ²
项 目		2015 年面积						总计
		林地	耕地	草地	水体	建设用地	未利用地	
1980 年 面积	林地	4 763	232	19	2	81	0	5 007
	耕地	100	5 355	4	40	211	4	5 714
	草地	18	18	156	7	11	1	200
	水体	6	20	2	450	30	0	508
	建设用地	4	1	0	0	956	0	961
	未利用地	1	1	0	25	11	7	45
	总计	4 791	5 627	181	524	1 300	12	12 435

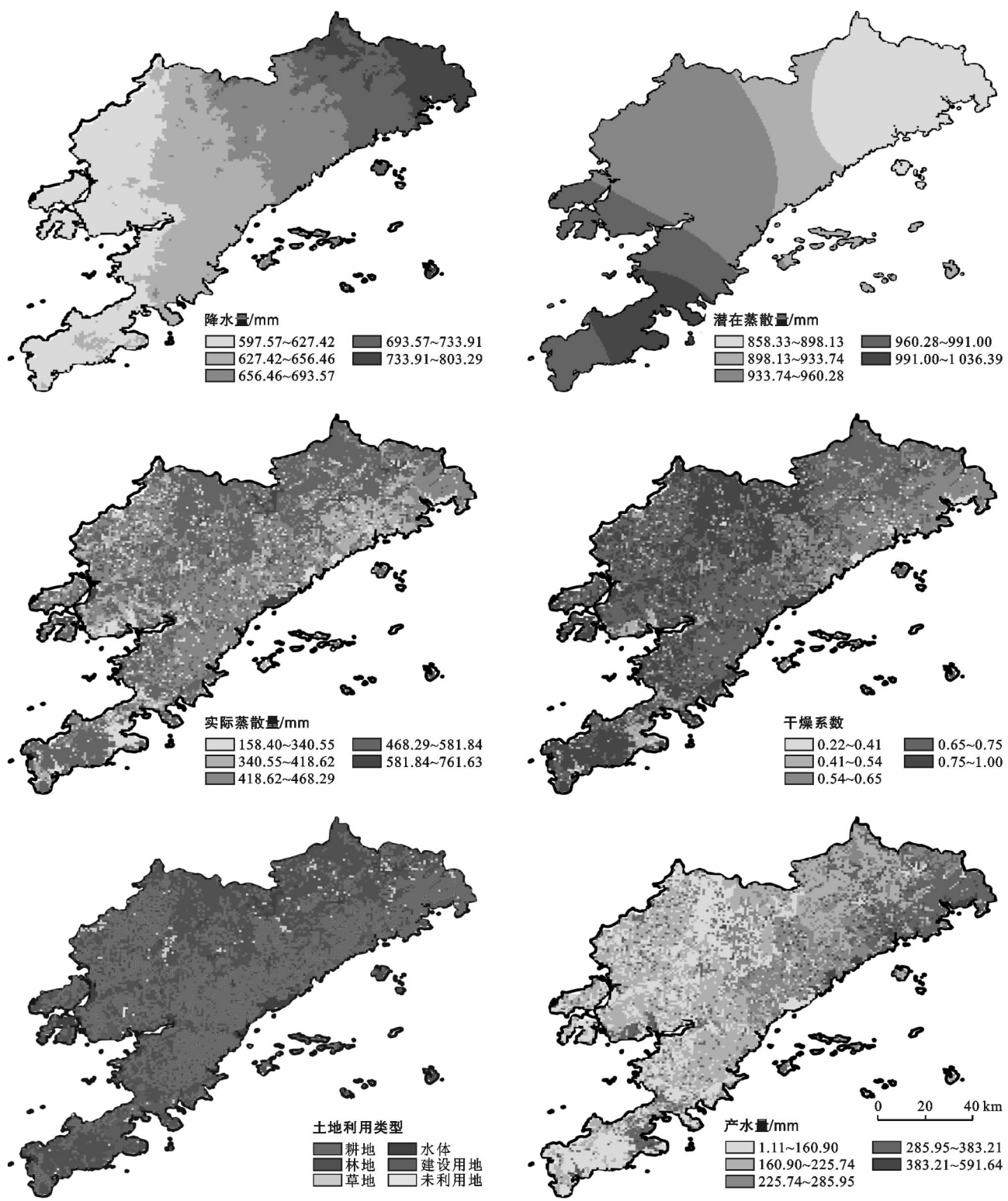


图 2 大连市气象要素、土地利用类型(2015 年)、产水量空间分布特征

4.2 情景设置

为了区分 1980—2015 年研究区气候变化和土地利用变化对产水量的影响,本研究选择两个阶段,第一阶段是 1980—1990 年,另一阶段是 2005—2015 年。1980 年和 2015 年的土地利用图用来表示这两个时期的土地利用模式。本研究设置了 4 种情景。

情景 1:1980—1990 年的气候和 1980 年的土地利用;
情景 2:1980—1990 年的气候和 2015 年的土地利用;
情景 3:2005—2015 年的气候和 1980 年的土地利用;
情景 4:2005—2015 年的气候和 2015 年的土地利用。
情景 1 和情景 4 分别表示两个时期的实际情况;情景 1—2 揭示土地利用变化对产水量的影响;情景 1—3

描述气候变化对产水量的影响;情景 4—1 描述土地利用和气候变化对产水量的综合影响。

4.3 不同情景下产水量的时间变化

表 5 显示了 1980—2015 年不同情景下研究区的产水量以及变化量。情景 2 和情景 1 的产水量差异表明,土地利用变化的影响增加了 6.97 mm,占情景 1 条件下产水量的 5%。情景 3 和情景 1 的产水量差异代表了气候变化的效应,减少了 16.92 mm,占情景 1 条件下产水量的 12%。与情景 1 相比,情景 4 下土地利用和气候变化的综合效应下产水量减少了 10.09 mm,占情景 1 产水量的 7%。结果表明,土地利用和气候变化都影响了研究区的产水量,气候变化的影响大于土地利用变化的影响。当气候变化效应发挥主导作用时,土地利用变化对产水量的影响并不明显。

4.4 不同情景下产水量的空间变化

图 3 显示了不同情境下大连市产水量的空间分

布图,表 6 显示了不同情景下不同地区的产水量。总体上,在不同情景下,产水量的空间分布趋势基本一致。在情景 1 条件下,平均产水量 142.75 mm。其中,庄河市产水量最大,为 194.92 mm;长海县、普兰店区的产水量次之,分别为 180.78,131.85 mm;旅顺口区的产水量最小,为 75.54 mm。在情景 2 条件下,土地利用为主要驱动因素,平均产水量为 149.72 mm,相比情景 1,增加了 6.97 mm,绝大部分地区的产水量呈增加趋势。

表 5 不同情景下大连市的产水量及变化值

情景	土地利用年份	气候时段	产水量/mm	变化量/mm
1	1980 年	1980—1990 年	142.75	
2	2015 年	1980—1990 年	149.72	6.97
3	1980 年	2005—2015 年	125.83	-16.92
4	2015 年	2005—2015 年	132.66	-10.09

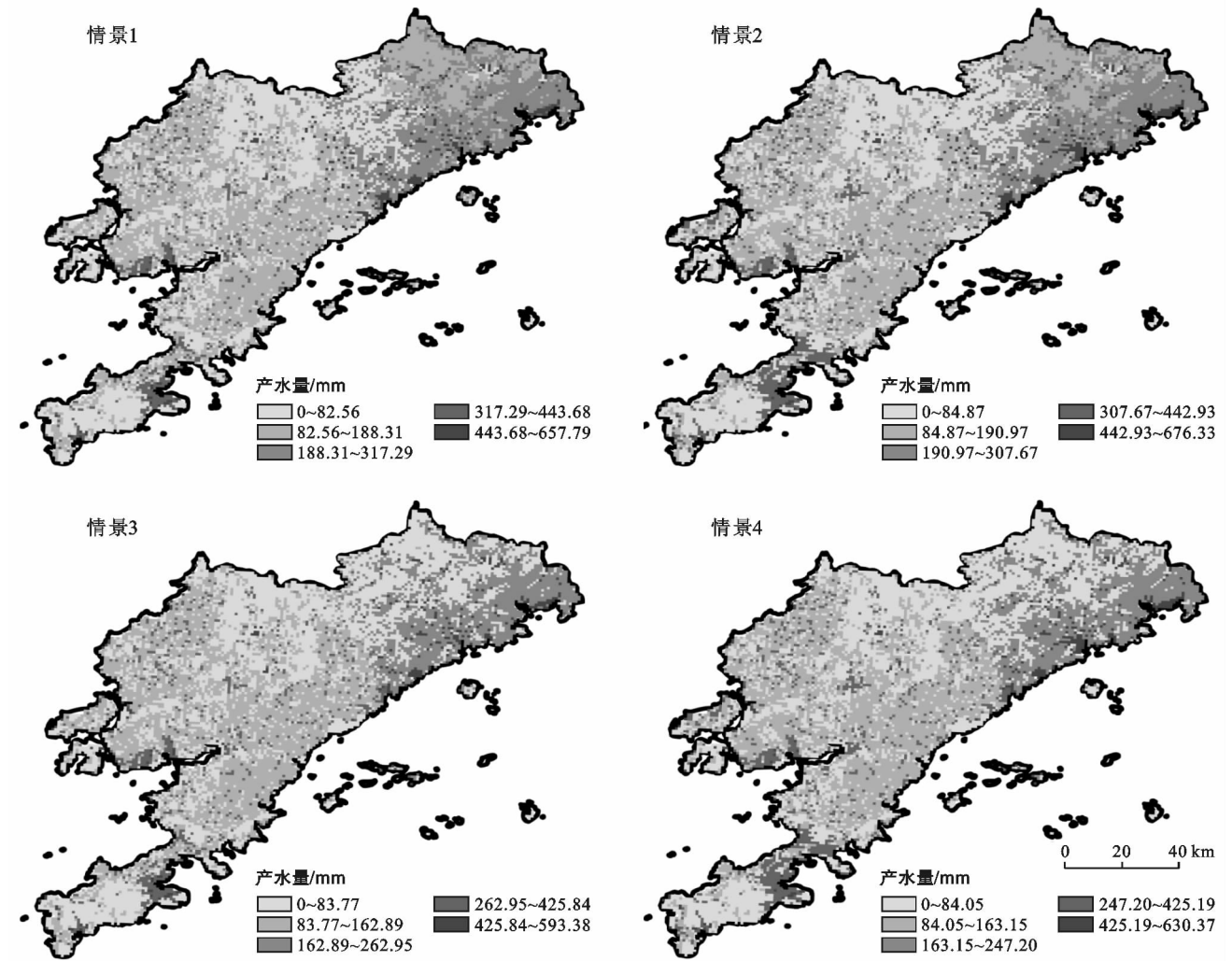


图 3 不同情景下产水量的空间分布

其中,市内 4 区耕地面积减少了 46 km²,林地面积减少 24 km²,城市建设用地增加了 73 km²,相应平

均产水量增加最大,为 30 mm;其次为金州区,耕地、林地面积分别减少了 55 和 15 km²,城市建设用地增

加了 78 km²,相应平均产水量增加了 16.84 mm;旅顺口区、瓦房店市、普兰店区,耕地、林地、城市建设用地面积变化较小,产水量亦变化较小,平均产水量分别增加了 6.78,6.5,4.08 mm;庄河市耕地、林地面积分别减少 8 和 48 km²,城市建设用地增加 64 km²,平均产水量增加最小,分别为 3.17 mm。综合分析,林地和耕地面积的下降,城市建设用地的增加,对大连市产水量有些微的影响。在情景 3 条件下,气候变化为主要驱动因素,平均产水量为 125.83 mm,相比情景 1,减少了 16.92 mm,绝大部分地区的产水量呈减少趋势,尤其庄河市的产水量减少最大,为 42.82 mm,主要原因在于 1980—2015 年期间,气温增加明显,降水量减少最大,达 65 mm 以上。在情景 4 条件下,气候变化和土地利用为主要驱动因素,平均产水量为 132.66 mm,相比情景 1,减少了 10.09 mm。庄河市、长海县、普兰店产水量呈减少趋势,其中,庄河市减少量最大,为 39.69 mm。金州区、旅顺口区、市内 4 区、瓦房店产水量呈增加趋势,其中,市内 4 区产水量增加最大,为 40.55 mm。结果表明,不同情景下,产水量的空间分布趋势基本一致。研究区土地利用的变化对产水量的增加有些微影响,气候变化是影响产水量变化的主要驱动力。

表 6 不同情景下不同地区的产水量				mm
地 区	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
金州区	116.78	133.62	118.82	135.34
旅顺口区	75.54	82.32	82.14	88.93
普兰店区	131.85	135.93	118.02	121.94
瓦房店市	115.06	121.56	109.63	115.95
长海县	180.78	180.78	156.30	156.30
庄河市	194.92	198.09	152.12	155.23
市内 4 区	130.89	161.89	140.45	171.44

5 结 论

(1) 1980—2015 年,大连市年均降水量 677.50 mm,年均潜在蒸发 947.74 mm,二者不显著下降,下降速率分别为 22.22 和 12.67 mm/10 a。平均气温 9.64 ℃,年均干燥系数为 72%,二者显著增加,增加速率分别为 0.179 和 0.057/10 a;年均实际蒸散量 445.78. mm,显著下降,降低速率 19.22 mm/10 a。研究区多年平均产水量 226.36 mm,占降水量 33.41%。在研究时段内,平均产水量不显著下降,降低速率 14.7 mm/10 a。在降水波动的影响下,不同年代,各地区潜在蒸散、实际蒸散量波动变化;产水量变化趋势与降水变化趋势一致,都呈先降低后增加的

趋势。降水量是影响大连市产水量的主要气候因素,同时受潜在蒸发量与干燥系数的影响。

(2) 1980—2015 年大连市产水量总体上由东北向西南波动变化。高值区主要集中在庄河市东北部、瓦房店市南部、南部 7 区县中部,多年平均产水量在 295.46~611.34 mm 之间;庄河市、瓦房店市北部及南部 7 区县东北部、普兰店区产水量次之,集中在 168.62~295.46 mm 之间;南部 7 区县西南部、瓦房店市东北部产水量相对较小,集中在 1.11~168.62 mm 之间。从产水总量来看,庄河市年均产水总量最大,达 1.10×10⁹ m³。

(3) 1980—2015 年,研究期间大连市耕地、林地面积有所减少。城市建设用地面积有所增加,主要由耕地转移而来。其它用地类型面积变化较小。

(4) 气候变化和土地利用变化是引起大连市产水量时空变化的两个主要因素,气候变化的影响大于土地利用变化的影响,当气候变化效应发挥主导作用时,土地利用变化对产水量的影响并不明显。气候因子主要通过改变降水和潜在蒸散来影响产水量,降水的增加可以提高产水量的源头水量,潜在蒸散表征区域生态系统的水分消耗能力。土地利用的变化可以影响实际蒸散,进而影响产水量。

(5) InVEST 模型的引入,为大中尺度流域的水源供给服务的估算与空间分布提供了定量和可视化的参考,但由于模型结构的简化以及缺乏长期的野外观测数据,致使研究结果存在一定的不准确性。因此,建议在今后的研究工作中,加强野外数据的观测、调整模型参数使其本土化,确保评估结果的可靠性。

[参 考 文 献]

- [1] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. 不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟[J]. 水资源保护,2014,30(3): 9-13.
- [2] Robert H, Heejun C. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization[J]. Applied Geography, 2014,53:402-416.
- [3] Mansoor D K L, Marty D. M, Eric C. C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013,165(1751):6-18.
- [4] 孙艳伟,李加林,马仁锋,等. 于桥水库流域水源供给服务的空间分布格局[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):1-6.
- [5] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带作物学报,2013,33(4):58-62.

- plant species on bare flats in coastal salt marshes[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 827(1): 51-63.
- [5] Chen Chaomei. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature[J]. *Journal of the Association for Information Science & Technology*, 2014, 57(3): 359-377.
- [6] 孟伟庆, 李洪远. 再议 Ecological Restoration 一词的中文翻译与内涵[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2824-2830.
- [7] Fernando H J S, McCulley J L, Mendis S G, et al. Coral poaching worsens tsunami destruction in Sri Lanka[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2005, 86(33): 301-304.
- [8] Wolanski E. *Estuarine Ecohydrology*[M]. Elsevier, 2007.
- [9] Palmer M A. Reforming watershed restoration: Science in need of application and applications in need of science[J]. *Estuaries and Coasts*, 2009, 32(1): 1-17.
- [10] You Soojin, Kim M, Lee J, et al. Coastal landscape planning for improving the value of ecosystem services in coastal areas: Using system dynamics model[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 2040-2050.
- [11] Firth L B, Thompson R C, Bohn K, et al. Between a rock and a hard place: Environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 87: 122-135.
- [12] Tang Jianwu, Ye Shufeng, Chen X, et al. Coastal blue carbon: Concept, study method, and the application to ecological restoration[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(6): 637-646.
- [13] Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services[J]. *Ecological monographs*, 2011, 81(2): 169-193.
- [14] Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(30): 12377-12381.
- [15] Bulleri F, Chapman M G. The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(1): 26-35.
- [16] Suding K N, Gross K L, Houseman G R. Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(1): 46-53.
- [17] Elliott M, Burdon D, Hemingway K L, et al. Estuarine, coastal and marine ecosystem restoration: Confusing management and science: A revision of concepts[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(3): 349-366.
- [18] Benayas J M R, Newton A C, Diaz A, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis[J]. *Science*, 2009, 325(5944): 1121-1124.
- [19] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems[J]. *Science*, 2008, 319(5865): 948-952.
- [20] Kelble C R, Loomis D K, Lovelace S, et al. The EBM-DPSER Conceptual Model: Integrating Ecosystem Services into the DPSIR Framework[J]. *PloS One*, 2013, 8(8): e70766.
- ////////////////////////////////////

(上接第 150 页)

- [6] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.
- [7] 包玉斌. 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.
- [8] 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.
- [9] 谢余初. 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): 1337-1347.
- [10] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. *地理科学*, 2015, 35(6): 790-797.
- [11] 顾蓉, 张华. 大连市土地利用景观格局分析[J]. *科技信息*, 2010(14): 421-422.
- [12] 徐翠, 张林波, 杜加强, 等. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(8): 2388-2399.
- [13] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(4): 409-416.
- [14] 童宏良. 我国蒸发力计算的气候学方法[J]. *南京气象学院学报*, 1989, 12(1): 19-33.
- [15] 张灿强, 李文华, 张彪, 等. 基于土壤动态蓄水的森林水源涵养能力计量及其空间差异[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 697-704.
- [16] 袁先强, 王鹏, 闫吉顺, 等. 大连市近 20 年景观格局变化及驱动力研究[J]. *地理空间信息*, 2017, 15(3): 77-80.