

引用格式: 黄菁, 范继辉, 何晓蓉. 基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究[J]. 山地学报, 2021, 39(3): 327-337.

HUANG Jing, FAN Jihui, HE Xiaorong. InVEST-Model Based Evaluation of Water Conservation Function in Zhangjiakou Area, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(3): 327-337.

## 基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究

黄菁<sup>1,2</sup>, 范继辉<sup>2\*</sup>, 何晓蓉<sup>1\*</sup>

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430063; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:** 水源涵养是生态系统提供的最重要的功能之一, 开展水源涵养功能评价对了解地区水环境、合理发展分区管理有重要意义。张家口作为京津重要的水源地与生态屏障, 承担着维护区域经济与生态环境质量改善的关键任务, 深入探究其水源涵养现状具有现实意义。然而, 当前针对张家口实际降雨强度与地表覆被等特征开展的水源涵养功能研究与探讨仍较为缺乏。本文以张家口市为研究对象, 采用 InVEST 月尺度产水模型, 估算该区域水源涵养量, 分析其时空变化规律, 并对不同土地利用类型的水源涵养功能进行评估。结果表明: (1) 张家口地区 2016 年水源涵养平均深度为 75.99 mm, 水源涵养总量为 28.09 亿 m<sup>3</sup>, 以地方区县级行政区划为评价单元, 逐鹿、赤城涵养情况最佳; 制约本地区水源涵养功能的最主要因素是降水, 包括降水总量以及单次降水强度; (2) 不同类型的土地覆盖对于水源涵养的贡献值不同, 贡献值最大的为草地, 贡献值最小的为未利用地, 具体表现为: 草地 > 林地 > 耕地 > 建设用地 > 未利用地; (3) 在降雨较少的干旱地区以植被配置作为提高水源涵养水平的主要措施时, 需要重点考虑待选植物的生长特性, 以耗水要求低、蒸腾作用弱的抗旱树种为最佳, 同时应当适度移除地区现有的多耗水树种。本研究成果可为优化张家口区域水源涵养水平、系统科学保护当地水生态提供参考, 并可为进一步建设维护京津两大重要城市生态环境作出贡献。

**关键词:** 水源涵养; InVEST 月尺度产水模型; 时空变化; 土地利用; 张家口

**中图分类号:** K903

**文献标志码:** A

生态系统服务中, 水源涵养功能的作用主要体现在拦蓄降水、抑制蒸发、缓和地表径流、调节河川流量、影响降雨等对水分分配过程的影响<sup>[1-4]</sup>。开展水源涵养功能评估, 厘清区域水源涵养现状及变化趋势, 是保障地区水环境稳定与生态安全的重要条件。

最早的水源涵养功能研究集中在对有林地与无

林地水源涵养的差异评估方面, 当前研究更为广泛深入, 从早期的户外观测、样品采集等逐渐演变成为搭建模拟水文过程机制的模型研究, 以及从样地小区域的估算演变成为大范围的评估。定量评估水源涵养的方法则从早期以专家打分为主的当量法<sup>[5-6]</sup>逐渐丰富形成了包括蓄水能力法<sup>[7]</sup>、水量平衡<sup>[8]</sup>、降水贮存法<sup>[2]</sup>和地下径流增长法<sup>[9]</sup>等一系列方法

**收稿日期** (Received date): 2019-01-09; **改回日期** (Accepted date): 2021-05-31

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金 (41871072); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101001)。[National Natural Science Foundation of China (41871072); National Water Pollution Control and Management Science and Technology Major Project (2017ZX07101001)]

**作者简介** (Biography): 黄菁 (1995-), 女, 湖南湘潭人, 硕士, 主要研究方向: 流域、生态水文与修复。[HUANG Jing (1995-), female, born in Xiangtan, Hunan province, M. Sc., research on watershed, ecological hydrology and restoration] E-mail: jingnn1210@outlook.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 范继辉 (1980-), 男, 河南开封人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 工程水文学与生态水文学。[FAN Jihui (1980-), male, born in Kaifeng, Henan province, Ph. D., associate professor, research on engineering hydrology and ecological hydrology] Email: jhfan@imde.ac.cn; 何晓蓉 (1974-), 女, 湖北恩施人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 区域环境退化与生态重建。[HE Xiaorong (1974-), female, born in Enshi, Hubei province, Ph. D., associate professor, research on regional environmental degradation and ecological reconstruction] E-mail: hxr970114@163.com

体系。其中,InVEST模型年产水模块是由斯坦福大学在水量平衡的基础原理下编写构建的<sup>[10]</sup>,模型认为地表覆被截取的降水会由于自身生长需要被消耗,地表覆被截流的降水对于区域整体生态来说产生的影响较小<sup>[11]</sup>,因此该模块将降雨去除蒸散发与地表径流后渗入地下的水量作为水源涵养量。由于InVEST模型具有结构简单、参数获取便捷、能够反映水源涵养功能的空间特征等优点,在美国俄勒冈州Willamett流域、阿根廷Chubut流域、西班牙东北部Ebro盆地等地区得到广泛应用<sup>[12-15]</sup>。国内学者也陆续以北京山区、都江堰、汉江上游等地区为研究对象开展了水源涵养空间格局、功能重要性、动态变化分析等多方面的探究<sup>[11,16-17]</sup>。随着对水源涵养这一课题的进一步研究,InVEST年度模型在对季节性产流、区域年内的水文情况等进行分析时暴露出了多方面问题,其一,年度模型的评估结果仅仅包括全年总产流,没有关注径流在不同时期的变化状况,不利于掌握区域年内详细的水分分配特点;其二,旱季和雨季所形成的地表径流对于本地水源涵养的价值显然是存在差别的,雨季地表水量虽大,但受限于土地的蓄集能力,大多数产流会流出本地,这部分产流将无益于本地生态功能,而年度模型不区分地区降水的季节性,导致涵养功能的估算存在偏差。基于此,斯坦福大学进而设计搭建了更新后的月尺度产水模块(Seasonal yield model)<sup>[10]</sup>,将丰水期产生的快速流与枯水期产生的基流进行区分并分别计算,对于气候季节性明显的地区,涵养在土壤中的基流可能比地表快速流更具有利用意义。基于月尺度产水模型的运行机制,本文以土壤中涵养的基流作为评价水源涵养的指标。

张家口地处北京、河北交界处,具有重要的生态防护功能,如水土保持、防风固沙、水源涵养等。因在多个重点规划方案中被设计为重要生态屏障和水源地,张家口还承担着为城市提供优质水资源,并促进区域生态环境质量全面改善的双重任务,该地区的水源涵养功能在当地区域生态环境保护中扮演着重要角色<sup>[18]</sup>。近年来,当地管理者实施的一系列退耕还林等生态保护政策使当地的草地、林地得到了有效的恢复,但由于张家口所在区域本身生态环境较为脆弱,生态系统处于易崩塌状态,在这种情况下,必须结合地区特点谨慎采取符合地区实际的保护措施<sup>[18-20]</sup>。为了选择适当的保障方案,需要结合

张家口当地的实际降雨强度、地表覆被等属性进行科学的规划与建设,这也是当前该区域水源涵养问题改进的关键所在。

本文以InVEST月尺度模型为工具,选择2012—2016年作为研究时段,对张家口的水源涵养进行定量评估。根据研究地区的时空变化特点,对水源涵养功能和气候条件、土地利用间的关系进行详细分析,以期后续研究优化配置方案,提升区域涵养水平提供参考,从而进一步为建设维护京津两大重要城市生态环境作出贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

张家口市位于河北省西北部,行政面积3.68万km<sup>2</sup>,南北跨度约289.2 km,东西跨度约216.2 km。其区位情况如图1所示,处于华北平原和内蒙古高原的交界处,整体呈现出东南较低、西北区域较高的特征,境中部为阴山山脉横切,分为坝上高原区与坝下低中山盆地两大部分。该区属于大陆性干旱气候,处于温暖和温暖交界处,四季鲜明,降水少且集中在夏季<sup>[21]</sup>。由于山脉对暖湿空气的阻挡作用,坝上水汽来源不足,降水较少,年降水量330~400 mm,坝下降水相对较多,年降水量为400~500 mm。坝上、坝下气温差异大,坝上年平均气温为1℃~3℃,坝下为6℃~8℃。植被类型以高原植被和丘陵植被为主。区域隶属海河流域,分属永定河、滦河和内陆河等水系。其中,洋河、桑干河为永定河水系的主要干流,两河流域面积为17 662 km<sup>2</sup>,占全市总面积的47.89%。

### 1.2 月尺度产水模型

月尺度模型建立在栅格尺度的水量平衡原理基础上<sup>[10]</sup>,需要对研究区外部客观环境原因进行综合分析,同时结合对潜在基流、实际基流的合理计算,以实际基流为涵养量,从而开展研究对象的水源涵养情况评估。计算公式如下:

$$P_i = AET_i + QF_i + L_i \quad (1)$$

式中, $P_i$ 为年降水量(mm); $AET_i$ 为年实际蒸散量(mm); $QF_i$ 为全年快速径流(mm); $L_i$ 为潜在基流(mm)。区域全年的快速径流 $QF_i$ 通过对月径流量求 $QF_{i,m}$ 和获得:

$$QF_i = \sum_{m=1}^{12} QF_{i,m} \quad (2)$$

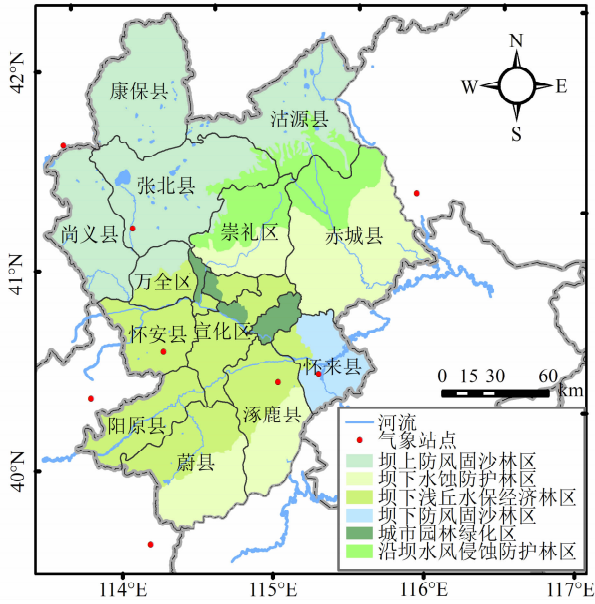


图1 研究区区位图

Fig. 1 Location of research area

$$QF_{i,m} = n_m \times \left\{ \left( (a_{i,m} - S_i) \exp\left(-\frac{0.2S_i}{a_{i,m}}\right) + \frac{S_i^2}{a_{i,m}} \exp\left(\frac{0.8S_i}{a_{i,m}}\right) E_i\left(\frac{S_i}{a_{i,m}}\right) \right) \times (25.4 \left[ \frac{mm}{in} \right]) \right\} \quad (3)$$

式中,栅格  $i$  在  $m$  月下雨日的平均降水深度  $a_{i,m}$  (mm) 由当月降水量与降雨事件  $n_m$  运算得到,结果单位在式(3)中进行转换成为 mm,其中  $S_i$  为潜在蓄水能力(mm),利用栅格单元  $i$  的径流曲线数  $CN$  转换计算,所述  $CN$  表示雨水事件前地表和土壤的特性<sup>[22]</sup>,它受到多方面因素影响,例如土壤类型、地表覆被种类。由此计算得到潜在基流  $L_i$  (mm) 为:

$$L_i = P_i - QF_i - AET_i \quad (4)$$

式中,年实际蒸散量  $AET_i$  为每个月的实际蒸发量的汇总(mm),另外每个月的实际蒸发量受到当月可用水的影响,而每个月的可用水与  $P_{i,m}$ 、 $QF_{i,m}$  存在一定关联。

$$AET_{i,m} = \min(PET_{i,m}; P_{i,m} - QF_{i,m} + \alpha_m \beta_i L_{sum,avail,i}) \quad (5)$$

$$PET_{i,m} = K_{c,l,m} \times ET_{o,i,m} \quad (6)$$

式中,  $\alpha_m$  为上坡栅格单元年可用潜在基流在  $m$  月的可用比例;  $\beta_i$  为下游栅格单元蒸散的上坡栅格单

元潜在基流的比例;  $K_{c,l,m}$  为蒸散系数;  $ET_{o,i,m}$  为月份的参考蒸散(mm)。其中栅格单元  $i$  的累积可用潜在基流  $L_{sum,avail,i}$  (mm) 计算如下:

$$L_{sum,avail,i} = \sum_{j \in \{ \text{流向像素} i \text{ 的相邻像素} \}} p_{ij} \cdot (L_{avail,j} + L_{sum,avail,j}) \quad (7)$$

$$L_{avail,i} = \min(\gamma L_i, L_i) \quad (8)$$

$$L_{sum,i} = L_i + \sum_{j \in \{ \text{所有流经像素} i \text{ 的像素} \}} L_{sum,j} \cdot p_{i,j} \quad (9)$$

式中,  $0 \leq p_{ij} \leq 1$  为从栅格单元  $i$  流到栅格单元  $j$  的流量的比值;  $L_{sum,i}$  为栅格单元  $i$  的累积潜在基流(mm);  $L_{avail,i}$  为栅格单元的可用潜在基流(mm); 当  $L_i < 0$ , 潜在的基流值可能是  $L_i$ , 当  $L_i > 0$ , 则  $L_{avail,i} = \gamma L_i$ ,  $\gamma$  为下行像元补给的分数,通过式(7) - (9) 进行累积各个栅格上的基流总和,为实际基流进行计算奠定基础。

在实际计算中,累积基流要分成2种情况进行计算。当汇入和河流相邻的栅格单元或栅格单元本身处于流域出水口时,由于该部分栅格的产水直到进入河流之前都没有进行有效的消耗,因此此类栅格单元全部上游栅格的基流之和等同于该栅格单元潜在基流的数值。考虑其他栅格单元,累积基流值与离开邻近下游栅格单元的累积总量和同一下游栅格上形成的累积值的差值成一定比率,公式为:

$$B_{sum,i} = L_{sum,i} \sum_{j \in \{ \text{像元} i \text{ 流入的像元集} \}} \begin{cases} p_{i,j} \left( 1 - \frac{L_{avail,j}}{L_{sum,j}} \right) \frac{B_{sum,j}}{L_{sum,j} - L_j} & \text{当 } j \text{ 不为水流像元} \\ p_{i,j} & \text{当 } j \text{ 为水流像元} \end{cases} \quad (10)$$

除此之外,在计算得到河流实际流量的基础上,进一步获取基流指数。所谓的基流指数指的是某一栅格单元对抵达河流的累积基流的贡献程度,离开该栅格单元的实际累积量与该栅格上游累积的可用水量之间的比值即基流指数,而栅格的涵养量受到潜在基流与基流指数的直接制约。当某一栅格单元潜在基流值  $< 0$  时,意味着该像元对产流无贡献,此时涵养量被设置为零,计算公式如下:

$$B_i = \max(B_{sum,i} \cdot \frac{L_i}{L_{sum,i}}, 0) \quad (11)$$

### 1.3 数据获取与处理

本研究应用的产水模型需要的数据有月降水量、气候区划以及逐月对应的降水事件表等。模型

表 1 数据来源及处理说明  
Tab.1 InVEST data and data sources

数据名称	数据来源	处理方法	数据格式
降水量	气象数据共享网中国地面气候资料日值数据集	张家口及周边共 13 个气象站点 2012—2016 五年月降水观测数据,采用 Kriging 法插值 <sup>[23]</sup> 。	.tif
参考蒸散量	气象数据共享网中国地面气候资料日值数据集	气象站点五年气温、日照、风速、湿度日观测数据为基础,通过彭曼公式计算各站点月参考蒸散量 <sup>[24]</sup> ,并采用 Kriging 法插值。	.tif
水文土壤组	土壤有机质含量数据产品、土壤质地数据产品	选择 Soil Survey Manual 建议方法 <sup>[25]</sup> ,使用经验公式对土壤的饱和导水率进行计算,将其作为土壤组划分的标准 <sup>[22]</sup> 。	.tif
流域	地理空间数据云	HEC-HMS 模型工具水文分析提取流域。	.shp
DEM	来源于地理空间数据云 SRTMDEMUTM 90 m 分辨率数据产品。		.tif
土地利用	中科院遥感所解译卫星影像,分辨率 100 m 的土地利用栅格数据。		.tif
降水事件表	根据气象数据共享网地面气候资料日值数据集,统计站点月降水事件。		.csv
气候区	基于气象站经纬度数据,绘制泰森多边形网络划分气候区。		.shp
径流曲线数	查阅 CN 查算表与相关文献 <sup>[22,26-27]</sup> 。		.csv
蒸散系数	世界粮农组织灌溉与排水手册与参考文献 <sup>[28-29]</sup> 。		.csv

驱动数据的来源与基础处理方法如表 1 所示,全部数据设置统一大地坐标与投影坐标系。

2 结果与分析

2.1 模型关键参数与结果验证

上述模型中涉及到多个参数,如径流曲线数和蒸散系数,通过查阅参考文献与专业手册率定得到适合研究区域的参数结果<sup>[18,22,26-29]</sup>。其中不同覆被类型的月蒸散系数获取较为困难,因此在本次分析中假设一整年的系数相同。

2013—2016 年《河北省水资源公报》数据表明,张家口行政面积为 3.69 万 km<sup>2</sup>。期间,2013 年地表水资源量为 6.93 亿 m<sup>3</sup>,2014 年地表水资源量为 4.71 亿 m<sup>3</sup>,2015 年地表水资源量为 5.75 亿 m<sup>3</sup>,2016 年地表水资源量为 7.84 亿 m<sup>3</sup>,并据此计算出四年的产流深度分别为 18.75、12.82、15.56 和 21.21 mm,将模型估算的预测值和公报中披露的实际结果进行比较,详细结果如图 2 所示。基于对比结果,可以看出整个研究时段的模拟数据相对误差都低于 20%,其中 2013 年预测最精准,误差最小,2016 年结果稍差。综合来看,全时段相对误差为 1.7%,代表参数率定效果比较好,说明模拟的可信度较高。

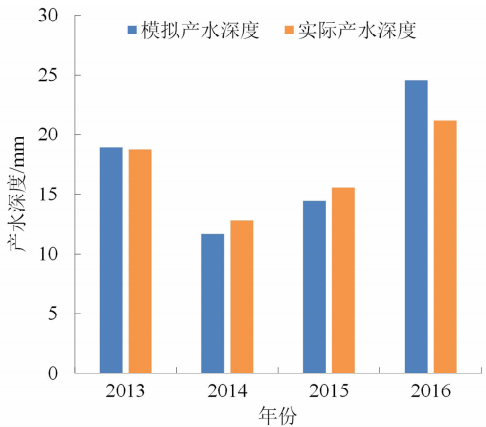


图 2 月尺度模型验证结果  
Fig.2 Verification of chosen model

2.2 水源涵养量时空分布特征

不同于分布式水文模型对水文过程的模拟,InVEST 模型在水源涵养力的估算中忽略地表覆被对雨水的截获部分,只考虑稳定涵养在土壤中的基流涵养量,基于不同地表覆被所表征的不同土壤的渗透性,结合地形地表因素,在栅格单元尺度上估算相应的水源涵养量,因此本文以模型计算的土壤涵养基流作为评价水源涵养的基础指标。

模型计算的结果显示,在 2012—2016 年这 5 年里,2012 年平均水源涵养深度和区域年度涵养量分别为 44.43 mm、16.42 亿 m<sup>3</sup>,2013 年平均水源涵养



深度和区域年度涵养量分别为 64.07 mm、23.68 亿  $\text{m}^3$ , 2014 年年平均水源涵养深度和区域年度涵养量分别为 15.81 mm、5.84 亿  $\text{m}^3$ , 2015 年年平均水源涵养深度和区域年度涵养量分别为 64.10 mm、23.69 亿  $\text{m}^3$ , 2016 年年平均水源涵养深度和区域年度涵养量分别为 75.99 mm、28.09 亿  $\text{m}^3$ 。进一步统计分析区域内斑块尺度上的年际变化情况, 结果显示, 四年以来区域的平均变化率分别为 41.29%、55.55%、69.38%、33.45%, 可见整体变动幅度较大, 此外水源涵养数值变动剧烈的个体多, 四年里变化幅度超过原水平一半的斑块数量均占总数的 30% 以上。2016 年总体斑块的平均变化率相对于邻近年份 2014 和 2015 年较小, 该年份水源涵养年变化在区域内分配相对均匀, 而 2013 年处于中等水平。结合地区的年降雨情况, 张家口以 2014 年作为关键时间点, 时序前后的水源涵养量表现出显著差异, 这表明地区降水的大幅变动对于该区域的水源涵养效果具有直接影响。

以 2016 年涵养量分布作为研究区最新水源涵养状态展开分析, 全区水源涵养平均深度为 75.99 mm/a, 涵养总量为 28.09 亿  $\text{m}^3$ , 相当于年降雨的 14% (见图 3)。基于空间分布结果, 可以看出水源涵养功能在张家口市整体处于中下等, 高涵养量多呈长条状分布于坝下河谷盆地, 低于地区平均水平的地块分布鲜明, 特别是官厅水库、西洋河等水

体覆被表现出接近 0 的极低状态。

根据张家口的行政区划、张家口辖区内的平均涵养数值与涵养总量, 获取各区县单元对总量的贡献比值。分析可知, 各个区县的水源涵养量和涵养的深度之间存在着显著差异, 表现出明显的空间特点, 例如在张家口市平均涵养深度最大的是逐鹿和赤城两个县, 区县的平均深度都超过了 115 mm, 而平均涵养深度最低的是康保、尚义、张北三个地区, 都没有超过 45 mm, 远低于区域平均水平。由于各区县管辖面积存在一定差异, 各区县对整个张家口市的水源涵养贡献量同样不同, 逐鹿和赤城贡献最大。张家口市市区尽管本地的水源涵养水平良好, 但受制于控制面积, 最终对全市涵养总量的贡献只占据 3.20%。

### 2.3 不同土地利用的水源涵养量

土地利用类型 (即地表覆被) 是月尺度模型中的驱动因素之一, 作为评估水源涵养功能时体现人类活动的基本要素, 其对于计量栅格单元的蒸发、蓄水情况等具有关键作用。基于图 4 展示的解译情况, 可以对张家口多种类型的土地利用和总体土地的比值进行计算, 草地、林地、耕地、水体、建设用地的占比分别是 23.61%、22.12%、46.77%、1.50%、3.57% 和 2.43%, 其中耕地的面积占据整体面积将近一半, 而湖泊等地表水域数量较少, 该地区的水量资源稀缺。

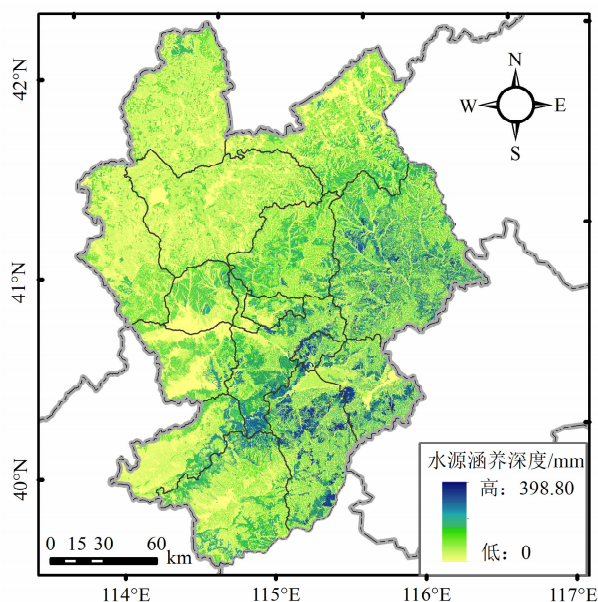


图 3 区域 2016 水源涵养分布

Fig. 3 Water conservation map in 2016

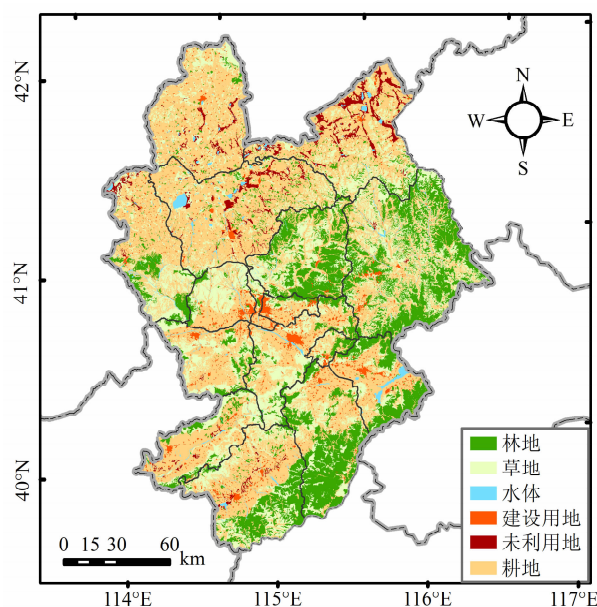


图 4 区域土地利用类型

Fig. 4 The classification of land use

对模型得到的研究时段多年平均水源涵养量进行分区统计,分区统计结果表明,草地的平均涵养数值最大,未建设用地最小,其次分别是林地、耕地、建设用地,各土地利用类型对区域涵养总量贡献的大小情况基本对应。草地的整体贡献度最大,在当地的相应生态功能中占主导地位,耕地和林地在其中同样扮演着重要角色,两者的贡献度之和接近一半。

一般而言,林地的水源涵养能力是地表覆被中最好的,然而如图 5 所示,本研究中林地覆被的相应功能表现并不理想,据此进一步分析出现此种情况的原因。InVEST 产水模型以地区降水为最主要的水分来源,并将水分流动过程中产生的快速流和地块本身蒸散的部分去除,模型指出植物以及枯枝落叶等获取的降水最终会以蒸腾作用的形式回到大气层<sup>[10]</sup>,这部分水分对区域整体的水源涵养作用有限,因此以枯枝落叶层所蓄集的水分为主体的林地在本研究中所使用的模型里优势不再明显。从植物特性的角度来看,叶片面积大、树体体量大的林地植物在生长过程中所消耗的水远远多于草地,进一步结合当地实际情况,资料显示张家口地区的林地作物以灌木、落叶乔木等为主要品种<sup>[30]</sup>,该类型的植物具有强烈的蒸腾作用,成长需水量大,因此地区林地覆被的蒸发量远高于草地覆被,因此相对于草地来说,其呈现的水源涵养功能不足。

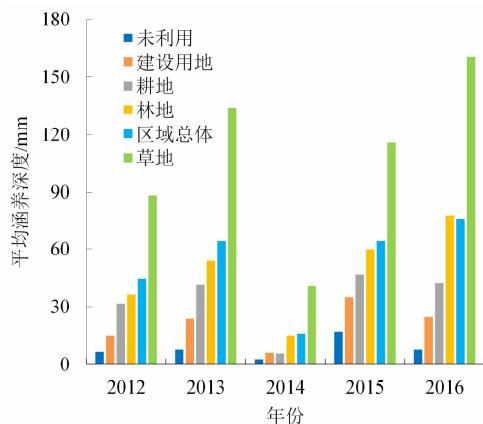


图 5 各土地利用类型年际水源涵养深度

Fig. 5 Water conservation depth of different land use during the period

进一步,针对不同土地利用对地区水源涵养总量的贡献进行分析,草地和耕地的贡献效果最大。一方面,草地覆被在该地区的水源涵养水平相对于

其他土地利用形式来说占绝对优势,因此草地的贡献程度是最好的,而耕地以其控制的面积优势,同样对地区的总量作出了很大贡献。林地覆被受到自身植物特性的约束,涵养水平远不如草地,因此最终对于总量的贡献程度低于草地。

以地形界线将张家口地区划分成为坝上和坝下,水源涵养结果表明,坝上地区的水源涵养水平低于坝下地区,另外在坝上坝下不同地表覆被的区域性表现一致。对于建设用地,由于此种土地利用的蓄水形式以快速径流为主,因此当出现强降雨时,地块产水往往会以地表径流的形式很快经由地表流向下游地区,因此在基本地形存在较大分异时,水源涵养的差异仍然不明显,这意味着地形对于建筑用地类地表覆被的水源涵养影响不大。

### 3 讨论

#### 3.1 气象因素对水源涵养功能的影响

通过分析研究时段内研究区水源涵养可知,水源涵养功能与蒸发情况、降雨的强度等存在一定关联,水源涵养量的时间顺序变化和降水趋势保持同步,而蒸发因素对于水源涵养功能具有一定的阻碍效果。

进一步统计 2012—2016 年地区径流量可以发现,产水模型模拟的数值和实际的降雨时序变化存在出入。从模型驱动的原理着手,各月份的快速径流量与年内总径流量之间有密切关联,强降雨导致短期内地面上产生大量的雨水,地表难以全部下渗,从而产生快速径流。以 2012 年和 2013 年的降雨情况为例进行分析,这两年的丰水时期 6—9 月的平均降水事件数分别为 10.58 和 13.06,从数据中可以看出,2013 年的降水频率相对于 2012 年较高,因此在降水总量相近的基础上,在降水事件发生集中的时期地表无法存蓄的水量增多,从而使得地表产生了较多快速径流,进一步制约了本地水源涵养的数值。

另一方面,降水总量与降水的年内分配也对斑块尺度上涵养量的逐年变化起到关键作用,以斑块水平变化最为剧烈的 2014 年和 2015 年为深入讨论对象,两者当年的降水总量相对于其对应的上一年的降水总量都具有明显的变化幅度,整个区域所输入的水量很大程度上决定了最终能够存蓄的资源水

平;除了总量的影响,如前面所提到的,不同年份之间降水次数也存在显著区别,数据显示,斑块尺度上变化最为强烈的重要节点 2014 全年的平均降水天数是整体时间序列中最小的,这表明该年份雨水相对集中,难以被涵养存蓄的地表径流多,导致本地截留下来的水量少,加之属于地区干旱情况较为严重的时期,降水少且蒸散程度高,最终导致在该年份前后斑块尺度上水源涵养结果的变化程度相当大。

比较降水和蒸发对于区域水源涵养功能的影响,可以得到降水占据主导地位的结论,地区的降水量直接制约当地的水源涵养功能。除此之外,基于图 5 统计对比的结果,降水量的改变驱动各地表覆被的生态服务功能发生明显变化。通常来说,各覆被类型的水源涵养功能与降雨量的变化呈现正相关关系,降水越多,地块的水源涵养能力越强。然而这种关系并不绝对,比较 2013 和 2015 这两个年份的数据,以年际潜在蒸散量的变化情况为分析基础,从中推导得出在年蒸发水平更大、年降雨量更低的前提下,除草地之外的其余地表覆被的水源涵养功能反而呈现上升的趋势。造成这种情况的原因其一可能是这两年的降水总量变动较小,而变化涉及的地域较大,因此这种微弱的降水变动不足以干扰到其他覆被类型区域的总体趋势,或者在这些特殊覆被区域的降水变化趋势与区域整体相反;其二,上述其余几种地表覆被对降水、蒸散这两种气象因素的敏感性较弱,其所体现的水源涵养功能在一定的气象因素变化区间内响应不足。

### 3.2 研究时段选取对水源涵养评估的影响

历史数据显示,张家口市的多年平均降水量是 396.5 mm,这表示开展区域评估的 2016 年属于降雨充沛的年份。以本次分析涉及到的时间段和区域为对象统计不同年份的雨水数据以及水源涵养功能情况,可以了解到张家口地区在干旱年份 2014 年涵养的水量结果仅为 5.84 亿  $\text{m}^3$ ,而雨水相对充足的 2016 年水源涵养总量则达到 28.09 亿  $\text{m}^3$ ,年际差异剧烈。从这一数据可以看出,地区的水源涵养功能在时间尺度上表现出特异性,在同一地区区域空间属性基本不发生改变的条件下(如地表覆被类型、土壤性质等短时间内难以变动的地理属性),由于不同时段具有不同的气象条件,从而造成同一地区在不同时期模拟得到的水源涵养结果差距极大。因

此分析区域水源涵养功能时,若仅以单一年份的计算结果作为考量区域常规水平的基础,将难以避免如极端天气等因素导致的不具备普适性的特殊结果,从而导致得到的评估成果不符合实际。

将部分涉及极端天气的年份去掉,选择 2012 年、2013 年、2015 年这 3 年的水源涵养深度平均值作为评估研究区水源涵养的指标,三年的水源涵养深度平均值为 57.53 mm,涵养总量为 21.27 亿  $\text{m}^3$ ,上述指标与地区 5 年平均计算的结果 52.88 mm,涵养总量 19.55 亿  $\text{m}^3$  大致接近,误差低于 10%,由此表明,选择一个较长的时段作为了解地区涵养情况的基础,对于消除极端气候因素的影响具有良好的效果。另外,气象条件在演化的过程中常常呈现整体性的变化趋势,比如在当下全球温度日渐上升的环境背景下,邻近年份内张家口的潜在蒸散量数值相对于多年均值 890 mm 要高出很多,若选择长时序内多年平均的数据进行计算分析,往往很难将地区的近况体现出来,无法起到预测效果。本次研究主要涉及研究区近年来的水源涵养功能评估,着重呈现该地区生态功能的近期情况。

### 3.3 InVEST 模型结果讨论

InVEST 模型的年产水模块是在得到区域产水总量的前提下,基于土壤性质、地形特点、覆被属性等因素的经验公式,对选定对象的水源涵养情况进行研究<sup>[11]</sup>。进一步调整后,月尺度模型定义栅格单元的产水量为实际产生的径流,同时在模型中涉及多个重要的过程指数:快速径流、潜在基流和实际基流<sup>[10]</sup>,其分别表征停留时间不到数天的地表径流、可能用于补充或形成土壤蓄水的潜在径流、涵养在土壤中停留时间达到数月甚至数年的基流,而本文以土壤涵养的实际基流作为栅格最终的水源涵养量。

对比余新晓团队<sup>[11]</sup>以 InVEST 年产水模块在张家口邻近山区模拟的林地水源涵养深度值 75 mm,本研究在雨量充沛年份得到的林地涵养深度结果为 78.05 mm,数值差异不大,然而张家口的实际雨水要少于北京山区,从而可推导得到年产水模型的模拟数值在同等雨水前提下会低于月产水模型。在计算产水量时,年产水模型设定栅格单元产生的水量等于进入栅格的雨水与栅格本身蒸发蒸散的差值。这一定义下,当上坡栅格单元产生的水量顺着地形

流入计算栅格单元时,就可能出现实际蒸发量要比栅格单元接收的实际雨量大情况,此时就会出现某些栅格产水量小于 0 的结果,这严重违背自然规律。这一缺陷是由于忽略了水分在其流动路径中在某单元被取出或者被蒸发的情况,意味着年产水模型并没有考虑产生的径流最终是否汇入到河流当中。

而选择月尺度模型则不会出现上述缺陷,月尺度产水模型将实际基流和潜在基流的概念引入到计算机制中,将实际产生的径流作为栅格单元的产水量,从而不会发生某单元产流为负的错误,以此保证了数据的准确度。而这种计算机制也提高了总产水量的数值,导致涵养量的结果也有所提高,因此本文的涵养量数值总体高于采用年尺度产水模型得到的数值这一结果是可信的。

## 4 结论

本文采用 InVEST 月尺度产水模型,以 2012—2016 年为研究时段,定量评估张家口地区水源涵养。结果表明:

(1)本研究区在 2016 年水源涵养的平均数值是 75.99 mm,水源涵养总量是 28.09 亿  $\text{m}^3$ 。各区县中,水源涵养深度和总量最大的是逐鹿和赤城。以不同土地利用类型为评价对象,涵养量贡献最大的是草地,占比将近一半,草地在该地区的水源涵养功能中占据主导地位。从不同地形来看,坝上的水源涵养功能结果普遍不如坝下。制约本地区水源涵养功能的最主要因素是降水,其中进一步包括降水总量以及单次降水强度,无论是区域当年的涵养水平还是年际斑块尺度上的变化幅度都受到总量和强度的直接影响。

(2)不同土地利用方式的水源涵养功能存在差异,其中草地的水源涵养效果最好,最差的是未利用地,具体表现为:草地 > 林地 > 耕地 > 建设用地 > 未利用地。草地的水源涵养效力超过降水的 30%,而最差的未利用地中超过 98% 的水分都会流失。林地覆被受到自身植物特性的约束,水源涵养功能要低于草地,水分涵养的比例仅 15%。因此在外部分水补充不足的干旱半干旱地区,大规模植树造林可能反不利于地区的水源涵养。在雨量稀少的区域以

植被配置作为提高水源涵养的主要措施时,应当以备选植物的生长特性为考察重点,以小叶片、需水要求低、蒸腾作用弱的抗旱树种为最佳,同时应当适度移除地区现有的多耗水树种。

(3)相对于年产水模块,改进调整后的 InVEST 月尺度模型能够获取更符合实际的水源涵养结果。该模型的输出涵盖月内径流量、快速径流、实际基流等多方面内容,能够帮助了解大规模区域年内水分的产生、流动、分配情况,模拟结果的可解释性强。

**版权声明:** 本文是第一作者硕士学位论文《基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究》的相关研究,采用了学位论文的基础数据和研究区域,但在研究方法与研究内容方面有所深入,进一步讨论了导致斑块尺度上水源涵养变化剧烈的主要原因;结合本地植被品种以及其对应的植物特性集中讨论了在研究区采用月尺度模型估计水源涵养功能时,在土地利用这一要素上整体表现出特异性的原因;提出了适宜本地水源涵养提升的生态措施。硕士论文版权归原培养单位:武汉理工大学。特此申明。

## 参考文献 (References)

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387**: 253 - 260. DOI: 10.1038/387253a0
- [2] 李文华等. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 4 - 32. [LI Wenhua, et al. Theories, methods and applications of value evaluation of ecosystem service function [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008: 4 - 32]
- [3] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2017, **37** (7): 1 - 82455 - 2462. [GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial characteristics patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37** (7): 2455 - 2462] DOI: 10.5846/stxb201512012406
- [4] 张宏斌, 牛赞, 王荣新, 等. 祁连山大野口流域森林水源涵养功能监测 [J]. *山地学报*, 2015, **33** (5): 553 - 559. [ZHANG Hongbin, NIU Yun, WANG Rongxin, et al. Monitoring on water resource conservation of forests in Dayekou Basin of Qilian Mountains [J]. *Mountain Research*, 2015, **33** (5): 553 - 559] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000069
- [5] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估 [J]. *自然资源学报*, 2003, **18** (2): 189 - 196. [XIE Gaodi, LU



- Chunxia, LENG Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(2): 189 – 196] DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2003.02.010
- [6] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究[J]. *自然资源学报*, 2011, **26**(12): 2100 – 2109. [SI Jin, HAN Peng, ZHAO Chunlong. Review of water conservation value evaluation methods of forest and case study [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, **26**(12): 2100 – 2109] DOI: 10.11849/zrzyxb.2011.12.009
- [7] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 91 – 132. [MA Xuehua. Forest hydrology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 91 – 132]
- [8] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2000, **11**(4): 481 – 484. [XIAO Han, OUYANG Zhiyun, ZHAO Jingzhu, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(4): 481 – 484] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2000.0119
- [9] 侯元兆, 张颖, 曹克瑜, 等. 森林资源核算: 上卷[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 51 – 56. [HOU Yuanzhao, ZHANG Ying, CAO Keyu, et al. Valuation of forest resource: first volume [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2005: 51 – 56]
- [10] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST + VERSION + User's guide [M]. Stanford: Stanford University Press, 2016: 114 – 132 + 237 – 247.
- [11] 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. [YU Xinxiao, ZHOU Bin, LV Xizhi, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(10): 1 – 5] DOI: 10.11707/j.1001-7488.20121001
- [12] OCHOA V, URBINA – CARDONA N. Tools for spatially modeling ecosystem services: Publication trends, conceptual reflections and future challenges [J]. *Ecosystem Services*, 2017, **26**: 155 – 169. DOI: 10.1016/j.ecoser.2017.06.011
- [13] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, **7**(1): 4 – 11. DOI: 10.1890/080023
- [14] PESSACG 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.148
- [15] BOITHIAS L, ACUNA V, VERGONOS L, et al. Assessment of the water supply: Demand ratios in a mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives [J]. *Science of the Total Environment*, 2014 (470 – 471): 567 – 577. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.003
- [16] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. *生态学报*, 2013, **33**(3): 789 – 797. [FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al. Spatial pattern of water retention in Dujiangyan County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(3): 789 – 797] DOI: 10.5846/stxb201203260410
- [17] 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[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(5): 213 – 217. [WANG Jiwei, LIU Kang, WENG Naiyi. Research on water conservation service function of forest ecological system in upstream of Hanjiang River based on In – VEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(5): 213 – 217] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.046
- [18] 黄菁. 基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019: 1 – 3, 37 – 38. [HUANG Jing. Research on water conservation function in Zhangjiakou area based on InVEST seasonal water yield model [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019: 1 – 3, 37 – 38]
- [19] PAN Tianshi, ZUO Lijun, ZHANG Zengxiang, et al. Impact of land use change on water conservation: A case study of Zhangjiakou in Yongding River [J]. *Sustainability*, 2021, **13**(1): 1 – 21. DOI: 10.3390/su13010022
- [20] 巩飞, 罗勇, 田犀, 等. 张家口坝上地区水源涵养功能的重要性评估[J]. *草业科学*, 2020, **37**(7): 1337 – 1344. [GONG Fei, LUO Yong, TIAN Xi, et al. Evaluating the importance of water conservation function in Bashang area, Zhangjiakou [J]. *Pratacultural Science*, 2020, **37**(7): 1337 – 1344] DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0094
- [21] 王丽新. 基于 GIS 的克山病地理环境分析——以张家口为例[D]. 北京: 首都师范大学, 2007: 14 – 17. [WANG Lixin. Analysis of geographical environment of Keshan disease based on GIS—taking Zhangjiakou as an example [D]. Beijing: Capital Normal University, 2007: 14 – 17]
- [22] 符素华, 王红叶, 王向亮, 等. 北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数[J]. *地理研究*, 2013, **32**(5): 797 – 807. [FU Suhua, WANG Hongye, WANG Xiangliang, et al. The runoff curve number of SCS-CN method in Beijing [J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(5): 797 – 807] DOI: 10.11821/yj2013050003
- [23] 朱蕾, 黄敬峰. 山区县域尺度降水量空间插值方法比较[J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(7): 80 – 85. [ZHU Lei, HUANG Jingfeng. Comparison of spatial interpolation method for precipitation of mountain areas in county scale [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, **23**(7): 80 – 85] DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2007.07.015
- [24] 毕彦杰, 赵晶, 赵勇, 等. 京津冀地区潜在蒸散量时空演变特征及归因分析[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(5): 130 – 140. [BI

- Yanjie, ZHAO Jing, ZHAO Yong, et al. Spatial - temporal variation characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in Beijing - Tianjin - Hebei region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(5): 130 - 140] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.015
- [25] Soil Survey Division Staff, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Soil survey manual [R]. Washington: Government Printing Office, 2017.
- [26] CRONSHEY R, H. MCCUEN R, MILLER N, et al. Urban hydrology for small watersheds [R]. Washington: Government Printing Office, 1986: 13 - 28.
- [27] PASLEY R, SNIDER D. National engineering handbook [R]. Washington: Government Printing Office, 1972: 14 - 65.
- [28] 李春梅, 高素华. 我国北方半干旱区草地水分供需状况研究 [J]. 干旱区研究, 2004, **21**(4): 338 - 342. [LI Chunmei, GAO Suhua. Study on the moisture budget of the grasslands in the semiarid regions in North China [J]. Arid Zone Research, 2004, **21**(4): 338 - 342] DOI: 10.13866/j.azr.2004.04.006
- [29] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. FAO irrigation and drainage paper no. 56: Crop evapotranspiration [M]. Rome: Food and Agriculture Organization, 2006: 103 - 156.
- [30] 安塞. 京津冀地区土地利用/覆被与地表蒸散发动态变化及关系研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017: 13 - 14. [AN Sai. Research on dynamic change and relationship between land use/cover and evapotranspiration in Beijing - Tianjin - Hebei region [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2017: 13 - 14]

## InVEST-Model Based Evaluation of Water Conservation Function in Zhangjiakou Area, China

HUANG Jing<sup>1,2</sup>, FAN Jihui<sup>2\*</sup>, HE Xiaorong<sup>1\*</sup>

( 1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Water conservation is one of the main functions provided by ecosystems. It is of great significance to carry out evaluation on water conservation function in a region for understanding regional water environment and rationally developing region management. Zhangjiakou, a city to the northwest of Beijing - Tianjin, China, as an important water source and ecological barrier of Beijing and Tianjin, is playing a key role in maintaining the sustainable development of regional economy and improving the quality of ecological environment. Unfortunately, there was a lack of research and discussion on water conservation function in terms of actual rainfall intensity and surface cover in Zhangjiakou. In this paper, Zhangjiakou city was targeted for evaluation on its water conservation function. It used InVEST seasonal yield water model to estimate the local water conservation amount. The temporal and spatial variation law of water conservation in Zhangjiakou was analyzed and then the water conservation function of different land use types were evaluated. The results find that: (1) The average depth of water conservation storage in Zhangjiakou in 2016 was 75.99 mm, with a total amount of water conservation storage 2.809 billion m<sup>3</sup>. Water conservation storage in Zhangjiakou were evaluated on a county (or district) basis in accordance with administrative divisions. It found that there was the most favorable water conservation capacity in Zhuolu county and Chicheng county, 120.67 mm per year and 115.32 mm per year, respectively. Precipitation was the main factor regulating the function of water conservation in this region, which comprised the total amount of precipitation and the intensity of a single precipitation. (2) The contribution of different types of land cover to water conservation was different. Grassland had the largest contribution, following in order by woodland, cultivated land, construction land. Unused land had smallest performance. (3) In order to promote the level of water conservation in arid areas

by vegetation allocation as a main measure, it was necessary to focus on the growth characteristics of the plants to be selected, and the drought-resistant tree species with low water consumption requirements and weak transpiration are the best. Meanwhile, the existing water-consuming tree species in the area should be moderately removed. The results of this study can provide reference for optimizing the level of water conservation in Zhangjiakou, scientifically planning and managing local water resources, and it further contributes to the construction and maintenance of the ecological environment of Beijing and Tianjin.

**Key words:** water conservation; InVEST seasonal water yield model; spatial and temporal variation; land use; Zhangjiakou