DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.03.12

长白山北坡流域水资源涵养功能与矿泉水开发阈值研究

孙文浩[1,2], 卞建民[1,2], 李一涵[1,2], 李佳林[1,2], 孙晓庆[1,2], 王 宇[1,2]
(1. 吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021; 2. 吉林大学 新能源与环境学院, 吉林 长春 130021)

摘 要: 长白山北坡流域内矿泉水资源丰富,查明水源涵养量并制定开采阈值,有利于流域内矿泉水资源的合理利用。基于InVEST模型分析了水源涵养量和影响因素;结合Logistic模型与生态基流量理论计算和评价了矿泉水开发阈值。结果表明:研究区水源涵养总量由2000年的14.0×10^8 m^{3}增加到2020年的16.8×10^8 m^3,气候为水源涵养量的主要影响因素,控制了研究区88.2%的面积;植被覆盖度增加的区域表现为气候和土地利用共同促进水源涵养量的增长。推荐生态基流量为1.014~1.244 m^3/s,河源区和河流中下游的推荐开采系数分别为0.36~0.46、0.4~0.5,目前开发程度远未达到阈值,可以继续进行开采。本文明确了水源涵养量与矿泉水的关系,广阔的森林面积涵养了大量水源,高水源涵养量可以保证矿泉水的水量和水质,适宜开发利用,且开发阈值的划定有利于矿泉水的可持续发展。研究成果对长白山区的生态保护和矿泉水开发利用具有一定的参考意义。

关键词: 水源涵养量; InVEST模型; 生态基流量; 开发阈值; 矿泉水; 长白山
中图分类号:TV213.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2022)03-0089-09

Study on the water conservation function and mineral water development threshold of northern slope watershed, Changbai Mountain

SUN Wenhao[1,2], **BIAN Jianmin**[1,2], **LI Yihan**[1,2], **LI Jialin**[1,2], **SUN Xiaoqing**[1,2], **WANG Yu**[1,2]
(1. *Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun* 130021, *China*; 2. *College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun* 130021, *China*)

Abstract: Mineral water resources are abundant on the northern slope of Changbai Mountain in Jilin Province. Finding out the water conservation potential of this area is crucial to the rational development of mineral water resources. InVEST model is used to calculate water conservation and the impact factors, and Logistic model and ecological base flow theory are adopted to calculate and evaluate the development threshold of mineral water. The results show that the total amount of water conservation in the northern slope of Changbai Mountain increased from 1.4×10^9 m^3 in 2000 to 1.68×10^9 m^3 in 2020. Climate is the main influencing factor of water conservation, controlling 88.2% of the study area; however, climate and land use jointly promoted the increase of water conservation in the areas with increased vegetation coverage. The recommended ecological base flow is 1.014-1.244 m^3/s, and the recommended mining coefficients for the source area and middle & lower reaches of the river are 0.36-0.46 and 0.4-0.5, respectively. At present, the exploitation degree of mineral water is far below the threshold value, so the mining can be continued. In this paper, the relationship between water conservation and mineral water is clarified, vast forest area cultivated a large amount of water resources, and high water conservation can ensure the quantity and quality of mineral water, which is suitable for development and utilization. The demarcation of development threshold is conducive to the sustainable development of mineral water. The research results will have positive significance for the ecological protection of Changbai Mountain and the

收稿日期:2021-12-10; **修回日期**:2022-04-21
基金项目:吉林省科技厅重点项目(20190303076SF);国家重点研发计划项目(2019YFC0409103)
作者简介:孙文浩(1999-),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为水文学与水资源。
通讯作者:卞建民(1968-),女,吉林延边人,教授,研究方向为水资源评价与管理。

development and utilization of mineral water.

Key words: water conservation; InVEST model; ecological base flow; development threshold; mineral water; Changbai Mountain

1 研究背景

水源涵养是重要的生态服务功能,水源涵养量是在特定的时空范围内,经历蒸发、截留和土壤蓄水等过程后,得以保存在生态系统内部的水量[1]。这部分水量可以改善气候条件、调节径流、确保流域水量供给和循环,为人类提供可以开发的水资源[2]。对流域内,特别是饮用水水源地的水源涵养量进行研究,对确保区域水资源的合理开发利用、确定开发阈值及维持生态系统的平衡和稳定具有重要意义。

目前,国内外主要通过基于水量平衡法编写的 InVEST 模型进行水源涵养量评估[3]。InVEST(integrated valuations of ecosystem services and tradeoffs)模型是一个实用的生态服务计算模型,由美国斯坦福大学(Stanford University)、大自然保护协会(The Nature Conservancy,TNC)和世界自然基金会(World Wide Fund For Nature,WWF)联合开发。该模型旨在描绘和评价如水土保持、洪水风险、碳封存等与人类生产、生活和发展息息相关的生态服务功能,其中的产水量(water yield)模块可以计算生态系统的水源供给能力[1]。研究人员已通过该模型对生态系统水源涵养的变化情况和影响因素[4-6]、预测未来的水供给变化和潜在的风险[7]、评估各种因素对流域水安全带来的压力[8]、生态管理措施对流域产水量的影响[9-10]等课题开展了研究,这些研究对水源涵养功能的变化和影响进行了系统的分析,但多着眼于水资源保护方面。然而对于饮用水水源地而言,在保护的同时,对水资源进行合理的开发利用也具有重要的现实意义。且当水源地的水源涵养能力较强时,如何保证其水资源的可持续开发,应为重点讨论的问题。

长白山区是我国重要的自然保护区以及饮用水水源地,区内特殊的地质和水文地质条件使其储有大量且优质的天然矿泉水资源[11]。众多国内外学者已系统分析了该地矿泉水的水化学成因[12]、补给来源与更新性[13-14]、水体交互特点[15]、特殊组分的来源以及水资源承载力[16-18],评价了其水质和潜力[19-20]。但是对其水源涵养能力仅限于变化特征的分析[21],未深入分析其影响因素,水源涵养能力与矿泉水资源的关系尚不明确,也未在此基础上讨论矿泉水应如何开发。进一步查明水源地的水源涵养能力以及开发阈值,对长白山矿泉水的可持续发展有着重要意义。因此,基于长白山区的研究现状及未来水资源与生态保护需求,本文利用 InVEST 模型对长白山北坡流域水源涵养量进行了计算,并结合情景分析法和 ArcGIS 分析了其影响因素;又综合自然和人为因素构建了 LOGISTIC 评价体系,结合生态基流量理论,计算和讨论了矿泉水开发阈值,以期为长白山区矿泉水的开发利用和生态保护提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

本文研究区为长白山北坡头道白河、二道白河和三道白河流域,为松花江流域上游地区,位于吉林省延边朝鲜族自治州安图县内,属于寒温带湿润气候。研究区内森林广布、水系发达、河网密集,河流多发源于长白山天池,向北汇入二道松花江,且矿泉水流量大,是我国重要的天然矿泉水集中分布区。已探明矿泉主要分布在头道白河至三道白河流域内,其中流量大于 5 000 m^3/d 的矿泉共 23 处。该区域内矿泉水质优良,以偏硅酸型为主,且部分为含气型。矿泉水产业的高速发展,为当地带来了极佳的经济效益。研究区内水系及矿泉分布如图 1 所示。

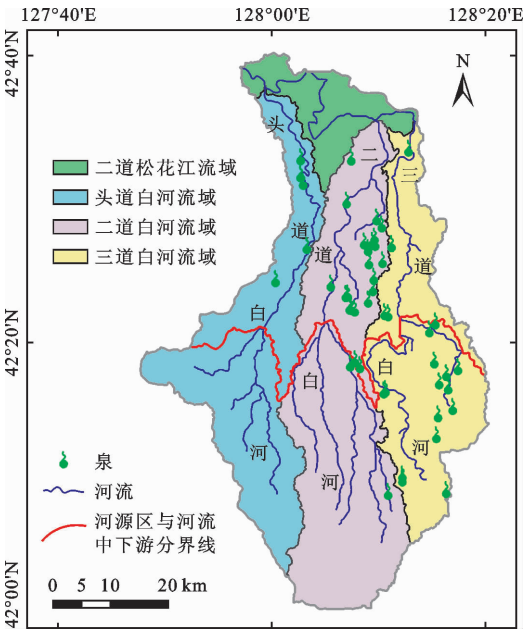

图 1 研究区水系及矿泉分布

2.2 数据来源

本文所采用的吉林省气象站 2000 – 2020 年气

象数据来自中国气象数据网（http://data.cma.cn/）；2000、2020 年土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/）；划分流域所需的数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据来自地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）；土壤相关数据来自世界土壤数据库的中国土壤数据集（https://www.fao.org/）；构建指标体系所需的 2011－2019 年供水、用水数据和模型验证所需的 2000、2020 年水资源总量数据均来自《延边朝鲜族自治州水资源公报》。

2.3　研究方法

2.3.1　InVEST 模型水源涵养量计算原理　使用 InVEST 软件（3.9.0 版本）的 Water Yield 模块计算产水量。该模型以 Budyko 水热耦合平衡原理为基础，将产水假设为通过径流的方式汇集到出口断面的水，通过降水量减去实际蒸散量计算产水量[22-23]，如图 2 所示。该模型的产水量包含地表枯落物持水量、地表径流、土壤水及地下径流。

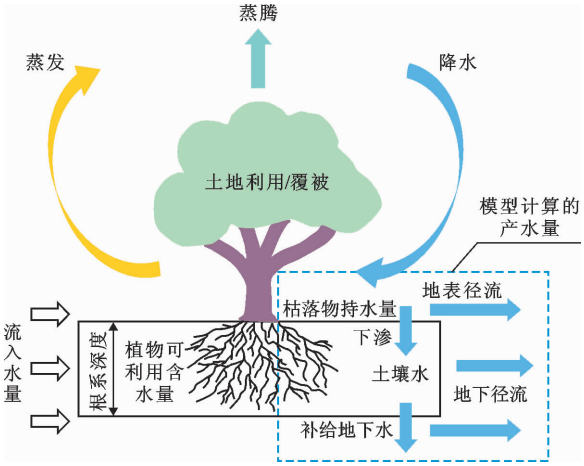

图 2　InVEST 模型运行原理示意图

根据上述原理，模型计算产水量所采用的公式如下：

$$Y = \left(1 - \frac{E_T}{P}\right)P \tag{1}$$

式中：Y 为年产水量，mm；E_T 为年实际蒸散量，mm；P 为年降水量，mm。除此之外，运行该模型还需要参考蒸散量 E_0、年潜在蒸散量 E_p、蒸散系数 K_c、植物可利用含水量 $PAWC$、季节系数 Z 等。由于 InVEST 模型的应用较多，除参考蒸散量外，其他参数的具体介绍和计算公式见参考文献[21] 和[22]。

对于参考蒸散量 E_0，本文采用 Hargreaves 提出的公式进行计算[24]：

$$E_0 = CR_a(T_{max} - T_{min})^E\left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} + T\right) \tag{2}$$

式中：T_{max} 和 T_{min} 为月最高气温和最低气温，℃；R_a 为地外辐射量，mm/d，参考文献[24] 中给出的各纬度带内全年每个月的辐射值；C、E、T 为经验参数，由胡庆芳等[25] 的研究成果确定。

InVEST 模型直接计算结果为产水量。根据水量平衡原理，生态系统保持的水量即为水源涵养量，即为产水量减去地表径流量。则水源涵养量计算公式如下：

$$W_R = Y - R_s \tag{3}$$

$$R_s = P \cdot a \tag{4}$$

式中：W_R 为水源涵养量，mm；R_s 为地表径流量，mm；a 为径流系数。

2.3.2　情景分析法　利用情景分析法，可假定某种因素不随时间变化时，其他因素对水源涵养量的影响程度。本文构建 4 种情景以确定气候和土地利用变化对水源涵养量的相对重要性和影响机理。情景 1：气候和土地利用数据均为 2000 年的实际情况；情景 2：20 a 内土地利用条件为影响水源涵养量变化的唯一驱动因素，即 2000 年气候数据和 2020 年土地利用数据；情景 3：20 a 内气候条件为影响水源涵养量变化的唯一驱动因素，即 2000 年土地利用数据和 2020 年气候数据；情景 4：气候和土地利用数据均为 2020 年的实际情况。

在这 4 种情景下，利用相对重要性指数（relative importance index，R_{II}）和综合效应指数（combined effect index，C_{EI}）分别分析气候和土地利用对水源涵养量的相对重要性和综合作用情况[26]。

$$R_{II} = \frac{|W_{R2} - W_{R1}| - |W_{R3} - W_{R1}|}{\max(W_{R1})}\begin{cases} > 0, & \text{土地利用} \\ = 0, & \text{平衡} \\ < 0, & \text{气候} \end{cases} \tag{5}$$

$$C_{EI} = \frac{W_{R2} + W_{R3} - W_{R1} - W_{R4}}{\max(W_{R1})}\begin{cases} > 0, & \text{相互抑制} \\ = 0, & \text{相互独立} \\ < 0, & \text{相互协同} \end{cases} \tag{6}$$

式中：R_{II} 为相对重要性指数；C_{EI} 为综合效应指数；W_{Ri} 为情景 i 下的水源涵养量，mm；i = 1、2、3、4 表示 4 个不同的情景。

情景分析法需要同时用到 InVEST 模型和 ArcGIS 数据处理，具体步骤如下：将设置的 4 种情景输入到 InVEST 模型中，根据前文 2.3.1 小结中的计算方法输出对应情景的水源涵养量，随后在 ArcGIS 10.8 的栅格计算器中将水源涵养量按照公

式(5)、(6)输入,即得到气候和土地利用对水源涵养量的影响程度栅格。利用 ArcGIS 的分区统计功能,可定量得出各影响因素所控制的区域占研究区总面积的比例。

2.3.3 Logistic 模型原理 Logistic 模型反映了区域水资源开发利用总体模式的 3 个阶段,即 V_1、V_2、V_3(图 3),利用该模型,结合制约矿泉水开发利用的重要自然因素和社会经济因素建立评价指标体系,可以定性评价矿泉水开发利用现状以及与开发阈值的接近程度[27-29]。

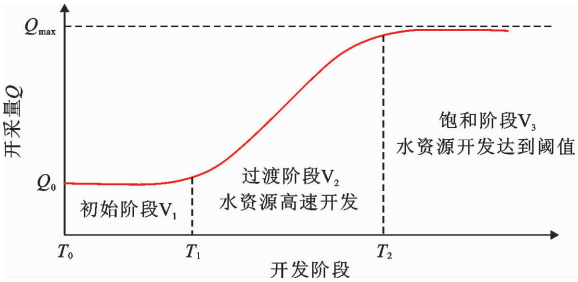

图 3 区域水资源开发利用总体模式示意图

为反映各因素对水资源开发阈值的影响程度,对 V_1、V_2、V_3 3 个阶段进行 0~1 之间的综合评分,结果分别为 $\alpha_1=0.95$、$\alpha_2=0.50$、$\alpha_3=0.05$,数值越小,说明开发程度越接近阈值。通常,首先建立权重矩阵以表示指标体系中每个评价因子的权重,而后计算各评价因子对每个评价等级的隶属度 b_1、b_2、b_3,详细的计算公式和参数解释见参考文献[29]。最后,按公式(7)计算得到矿泉水阈值分级的综合评分值。

$$\alpha=\frac{\sum_{j=1}^{3}b_j\cdot a_j}{\sum_{j=1}^{3}b_j} \tag{7}$$

式中:α 为综合评分值;a_j 为评价因子在第 j 个阶段的评分值;b_j 为评价因子在第 j 个阶段的隶属度;$j=1$、2、3 分别表示初始、过渡、饱和阶段。

2.3.4 生态基流量计算方法 本文采用 Tennant 法、Texas 法和基流比例法计算生态基流量。Tennant 法以河流多年平均流量的 10%~30% 作为生态基流量,而 Texas 法将 50% 保证率的月平均流量的特定百分率作为最小生态流量,这一特定百分率通常定为 20%[30]。基流比例法首先根据年流量频率计算划分丰水年($P=25\%$)、平水年($P=50\%$)、枯水年($P=75\%$)及特枯水年($P=90\%$)。不同水文年型对应的生态基流量计算公式如下:

$$S_k=Q_k\cdot T_k \tag{8}$$

$$T_{k+1}=T_k+u\cdot\frac{Q_k-Q_{k+1}}{Q_k}\cdot T_k \tag{9}$$

式中:S_k 为 k 年型的生态基流量,m^3/s;T_k 为 k 年型的基流比例,%;Q_k 为 k 年型的年均径流量,m^3/s;u 为比例削减系数,与河流的丰枯特性有关,一般取 $u=0.4$;$k=1$、2、3、4 分别代表丰水、平水、枯水、特枯水年。

3 结果与分析

3.1 水源涵养量

3.1.1 模型参数校正 模型所需参数为蒸散系数 K_c、径流系数 β 以及季节系数 Z,根据 InVEST 模型使用手册提供的参考数据以及《生态保护红线监管技术规范生态功能评价(试行)》中提供的不同土地利用类型径流系数经验值,确定的研究区蒸散系数和径流系数见表 1。

表 1 研究区不同土地利用类型的蒸散系数和径流系数

土地利用类型	蒸散系数 K_c	径流系数 β	土地利用类型	蒸散系数 K_c	径流系数 β
水田	1.35	0.347	河渠	1.0	1.00
旱地	0.76	0.497	湖泊	1.1	1.00
有林地	1.00	0.229	水库坑塘	1.0	0.90
灌木林	0.90	0.417	滩地	0.2	0.80
疏林地	0.85	0.192	城镇用地	0.3	0.85
其他林地	0.80	0.200	农村居民点	0.3	0.85
高覆盖度草地	0.65	0.478	其他建设用地	0.3	0.85
中覆盖度草地	0.65	0.820	沼泽地	1.2	0.80
			裸岩	0.5	0.90

由于产水量代表研究区地表水与地下水的水资源总量,因此对于季节系数 Z,采用《延边朝鲜族自治州水资源公报》中的安图县水资源总量与模型模拟结果进行验证,计算模拟值与实测值在不同季节

系数时的误差变化,结果如图 4 所示。由图 4 可以确定,Z =27 时模型的拟合效果最佳。

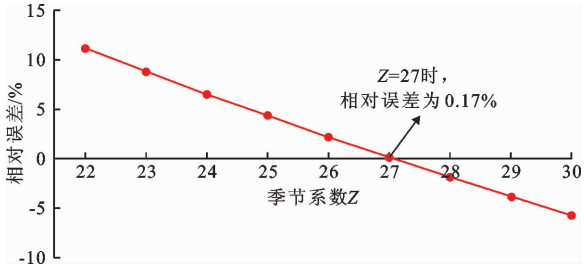

图 4　InVEST 模型相对误差与季节系数关系曲线

3.1.2　水源涵养量计算结果　计算出的研究区 2000、2020 年平均产水量及水源涵养量的空间分布如图 5 所示。计算结果表明,研究区 2000、2020 年的的平均产水量分别为 265.25、321.66 mm,产水总量分别为 15.9 × 10^8、18.9 × 10^8 m^3。研究区 2000、2020 年平均水源涵养量分别为 234.27、285.57 mm,水源涵养总量分别为 14.0 × 10^8、16.8 × 10^8 m^3,水源涵养量占产水量的比例达到了 88%。这是因为研究区大部分地区处于长白山保护区,区域内森林广布、城镇建设规模较小而且耕地面积较少,使得区域涵养能力大为增强。相比于 2000 年,2020 年的产水量和水源涵养量均有所增加,空间整体分布为研究区南部的长白山天池附近以及西部水源涵养量较高,东南部相对较低。高水平的水源涵养量可以保证研究区内矿泉水有充足的补给,有利于矿泉水的储存和开发利用。

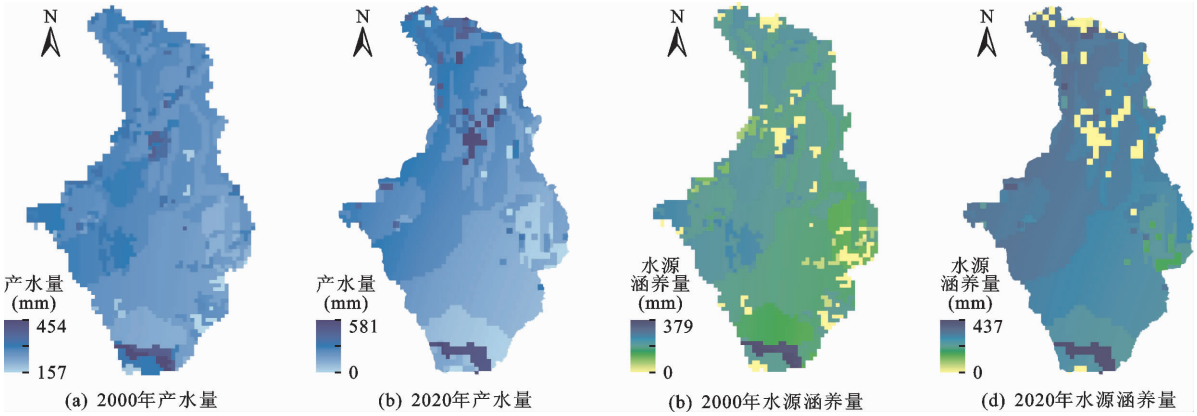

图 5　研究区 2000、2020 年产水量及水源涵养量空间分布

3.1.3　气候和土地利用对水源涵养量的影响程度　通过 InVEST 模型对不同情景的输出数据以及 ArcGIS 栅格进行计算,得到研究区气候和土地利用因素的相对重要性和综合影响情况,如图 6 所示。再利用 ArcGIS 的分区统计工具,对各部分占研究区总面积的比例进行计算,结果表明:气候因素在研究区 88.2% 的面积上具有较高的相对重要性;有 10.8% 的面积上表现为土地利用因素的影响更显著;其余 1.0% 面积表现为二者具有相同的重要性(图 6(a)),这表明气候是影响研究区水源涵养量的主要因素。气候和土地利用对水源涵养量的影响相互抑制的区域占研究区总面积的 80.6%;18.5% 的区域表现为相互协同;而剩余 0.9% 的区域表现为相互独立(图 6(b))。

与 2000 年相比,2020 年研究区实际降水量增加,且随着区内生态保护政策的实施,大量疏林地、裸地已改变为植被更为茂密的有林地。研究区发生上述土地利用类型改变的区域均表现为气候与土地利用协同促进水源涵养量,说明保护政策效果显著,有效地提升了水源涵养能力。而土地利用类型在 2000 和 2020 年均为有林地的地区,则表现为二者相互抑制,这是因为有林地为研究区水源涵养量最高的土地利用类型,若土地利用发生改变,将会使水源涵养量减少。

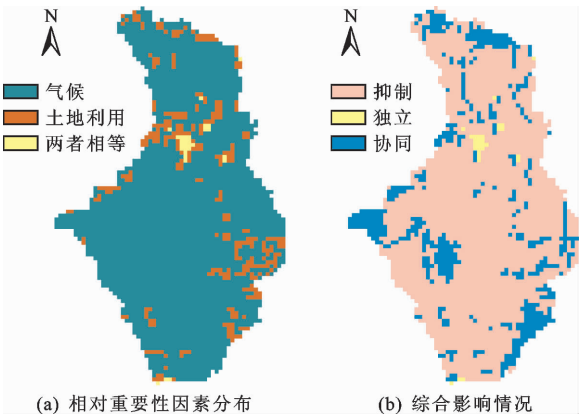

图 6　研究区气候及土地利用因素的相对重要性和综合影响情况

因此应继续保护区内森林资源,以应对气候变

化对研究区可能造成的负面影响,确保区内生态服务功能的正常运作。

3.2 矿泉水开发阈值

水源涵养量作为一种基本的生态服务功能,反映了研究区储存的水资源总量。研究区为重要的森林生态系统分布区,矿泉水资源丰富,水资源的开发利用必须保证生态服务功能的正常运行。因此有必要对矿泉水的开发阈值进行研究。

3.2.1 Logistic 指标体系构建 综合考虑研究区内矿泉水资源、经济社会和生态环境因素,结合国内以往的研究经验[28],选取灌溉率 U_1、产水系数 U_2、水资源开发程度 U_3、供需水模数 U_4、人均供水量 U_5 及生态环境用水率 U_6 建立综合评价指标体系,分别得出水资源开发利用的 3 个阶段 V_1、V_2、V_3 的水资源阈值分级评分标准以及权重,如表 2 所示。

表 2 水资源开发利用各阶段的评价因子 U_1 ~ U_6 的评分标准和权重赋值

评价因子	V_1	V_2	V_3	权重
灌溉率 U_1 /%	<20	20 ~ 60	>60	0.20
产水系数 U_2 /%	>60	20 ~ 60	<20	0.15
水资源开发程度 U_3 /%	<30	30 ~ 70	>70	0.25
供需水模数 U_4 /10^4(m^3 · km^{-2})	<1	1 ~ 15	>15	0.15
人均供水量 U_5 /m^3	<200	200 ~ 400	>400	0.15
生态环境用水率 U_6 /%	<2	2 ~ 5	>5	0.10
评分值 α_i	0.95	0.50	0.05	

3.2.2 开发阈值定性分析 根据指标体系以及权重,分别计算研究区 2011 – 2019 年各评价因子相对于 V_1、V_2、V_3 3 个阶段的隶属度 b_1、b_2、b_3,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,2011 – 2019 年研究区矿泉水资源开发程度平均综合评分为 0.697 7,说明水资源开发率较低,距离阈值较远。任意一年的评判矩阵对 3 个阶段的隶属度均为 V_1 阶段最高、V_2 阶段次之,V_3 阶段最低,且 V_1、V_2 的隶属度相差较小。反映了研究区矿泉水资源的开发利用程度处于Logistic模型的第 1 阶段,即初始阶段,但正在向过渡阶段发展,即虽然矿泉水资源开发利用程度仍然较低,但是开发量正在逐渐增加,且目前远未达到开发阈值(V_3 阶段),可以继续对矿泉水进行开发,以充分发挥区域资源优势。

表 3 2011 – 2019 年研究区各评价因子相对于 3 个阶段的隶属度及综合评分计算结果

年份	b_1	b_2	b_3	综合评分
2011	0.4725	0.4668	0.0608	0.6853
2012	0.4984	0.4307	0.0710	0.6923
2013	0.5170	0.4284	0.0546	0.7081
2014	0.4942	0.4335	0.0723	0.6899
2015	0.4945	0.4019	0.1036	0.6759
2016	0.4970	0.4300	0.0730	0.6908
2017	0.5197	0.4169	0.0634	0.7054
2018	0.5005	0.4957	0.0038	0.7235
2019	0.4981	0.4655	0.0365	0.7077
平均值	0.4991	0.4410	0.0599	0.6977

3.2.3 生态基流量计算

(1)Tennant 法。根据二道白河 1960 – 2019 年共 60 a 的实测数据,计算多年平均流量为 5.70 m^3/s。参照 Tennant 法计算原则,确定生态基流量范围为 0.570 ~ 1.709 m^3/s。

(2) Texas 法。对 1960 – 2019 年共 420 个月的实测数据进行频率计算,确定 50% 保证率下月均流量为 5.07 m^3/s,在此基础上取特定百分率 20%,求得流域生态基流量为 1.014 m^3/s。该方法计算得到的生态基流处于 Tennant 法计算的生态基流区间内,表明计算结果合理。

(3) 基流比例法。对 1960 – 2019 年共 60 a 的实测流量数据进行频率计算,确定丰水、平水、枯水、特枯水年 4 种年型对应的设计流量,并从实测序列中选出对应的代表年,根据 Tennant 法的相关取值,将 20% 作为丰水年生态流量需求占年平均流量的比例,并以此值为标准值来推求其他年型的基流比例以及生态基流量,计算结果见表 4。

表 4 基流比例法的生态基流量计算结果

年型	丰水年(P =25%)	平水年(P =50%)	枯水年(P =75%)	特枯年(P =90%)
典型年流量 Q_i /(m^3 · s^{-1})	6.219	5.511	4.985	4.676
比例系数	0.128	0.106	0.066	
基流比例 T_i /%	20.00	21.03	21.91	22.49
生态基流量 S_i /(m^3 · s^{-1})	1.244	1.159	1.092	1.052
占多年平均流量比例/%	21.84	20.34	19.18	18.47

由表 4 可知,研究区生态基流量占多年平均流量的 18.47% ~21.84%,符合 Tennant 法的推荐比例。按照此方法计算得到的生态基流量为 1.052 ~ 1.244 m^3/s。

综合以上 3 种方法的计算结果,根据确保生态稳定以及保障河流流量和水生植物正常生长的原则,确定研究区流域内生态基流量为 0.570 ~ 1.709 m^3/s,推荐生态基流量为 1.014 ~ 1.244 m^3/s。

3.2.4　开发阈值定量计算　在考虑矿泉水开发阈值时,需要矿泉预留一部分水量以满足流域内的生态基流量。研究区流域内有大量天然矿泉分布,总流量为 418 160.51 m^3/d,其中位于河源区的流量共计 98 983.18 m^3/d,位于河流中下游的矿泉流量为 319 177.33 m^3/d。因此,根据比例计算,河源区矿泉提供给流域生态基流量的矿泉水流量应为生态基流量的 23.67%,河流中下游应为生态基流量的 76.33%。除满足生态基流量外,每个矿泉还需要部分流量以满足河道流量、基本生态环境用水量、生态环境调节量以及与上下游矿泉的交换量,将该 4 类水量统称为除提供河流生态基流量外的其他不可开采量。根据以往对长白山矿泉的研究[31],确定其他不可开采量的计算原则如表 5 所示。

研究区流域推荐生态基流量为 1.014 ~ 1.244 m^3/s,即 87 609.6 ~ 107 455.87 m^3/d;最小生态基流量为0.57 m^3/s,即 11 657.00 m^3/d,结合开采原则,综合考虑生态基流量和其他不可开采量,计算得出矿泉水的开发阈值以及达到阈值时对应的开采系数,如表 6 所示。

表 5　其他不可开采量占矿泉流量比例表

矿泉位置	河道流量/%	基本生态环境用水量/%	生态环境调节量/%	与上下游矿泉的交换量/%	总计/%
河源区	30	3	3	3	39
河流中下游	20	3	3	3	29

表 6　矿泉水开发阈值计算表

生态基流量条件	矿泉位置	提供河流生态基流量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	其他不可开采量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	开发阈值/($m^3 \cdot d^{-1}$)	建议开采系数/%
推荐生态基流量	河源区	20737.19 ~25434.8	38603.44	34944.94 ~39642.55	0.36 ~0.46
	河流中下游	66863.65 ~82010.32	92561.43	144594.84 ~159743.50	0.40 ~0.50
最小生态基流量	河源区	11657.00	38603.44	48722.74	0.49
	河流中下游	37586.07	92561.43	189024.91	0.59

除去生态基流量和其他不可开采量后,剩余的矿泉水流量即为开发阈值。由表 6 可知,按照推荐生态基流量,河源区矿泉水的开发阈值为 34 944.94 ~ 39 642.55 m^3/d,河流中下游矿泉水的开发阈值为 144 594.84 ~ 159 743.50 m^3/d;按照最小生态基流量,河源区矿泉水的开发阈值为 48 722.74 m^3/d,河流中下游矿泉水的开发阈值为 189 024.91 m^3/d。河源区距长白山天池较近,保障其河道流量对整个流域的水资源供给有着重要意义,因此河源区矿泉水的建议开采系数比河流中下游更低。

4　讨　论

长白山区是我国重要的矿泉水资源分布区。本文已对长白山区的水源涵养量和矿泉水的开发阈值进行了计算和分析,解读了气候和土地利用对水源涵养量的影响,并进一步计算和分析了矿泉水的开发阈值,对长白山的生态保护及矿泉水的合理开发具有一定的意义。但是 InVEST 模型的特点为将地表水、地下水和基流视为一个整体,对于长白山来说,明确水源涵养量与矿泉水资源的关系,是实际生产和政策制定过程中需要解决的关键问题。因此有必要对此进行讨论,以明确水源涵养量如何转化为矿泉水。

InVEST 产水模块的运行原理表明,水源涵养量可以概化为除去蒸散发和径流损失外,得以保存在生态系统中的降水量。这部分降水量的一部分可被植物截留或者渗入土壤,成为生态系统所保持的水分,维持河流的生态基流量;另一部分进一步下渗补给地下水,为矿泉水提供补给量[22]。前期对于长白

山矿泉水同位素的研究表明,其补给来源比较单一,为大气降水补给,降水首先通过土壤和包气带进入到含水层,在含水层中与玄武岩充分进行交换形成优质矿泉水,且此处矿泉水可更新能力较强,对大气降水变化较为敏感[32]。马于曦[21]的研究表明,长白山矿泉水集中分布区的水源涵养量远大于长白山区的平均水平。因此,具有高水源涵养量的研究区使得该地区矿泉水能够得到充足的水分补给,保证了矿泉水的水量。研究区南部为长白山主峰,西部、东部均为海拔较高的分水岭,地形起伏较大,流域相对闭合,地下水与地表水总体流向均从南部长白山天池向北汇入二道松花江,地下水基本不存在与流域外的交换。这使得涵养的水源补给矿泉水后,能够维持在流域内部而不随侧向径流流失,从而可与流域内玄武岩地层进行充足的水 - 岩反应,保证了矿泉水的水量和水质。综上所述,研究区内较高的水源涵养量中的一部分可以充分补给矿泉水,有利于矿泉水的补给和储存,使矿泉水的水量和水质均有所保证,适宜进行开发利用。

矿泉水的补给量充足,储存量大,而如何对其进行合理开发则是应解决的另一个关键问题。本文计算的流域矿泉水开发阈值是当整个流域的所有矿泉都得到相当程度的开发时,每个矿泉需要遵循的阈值。结合实际情况,目前研究区已开发利用的矿泉较少,总体开发水平较低,距离整个流域的矿泉水开发阈值仍较远。因此在整个流域尺度内,当少数矿泉的开采量高于阈值时,仍可通过其他未开发矿泉补充流域生态基流量。因此对于已开发矿泉,目前的开采量可以略高于开发阈值,但不能高于允许开采量,以防止矿泉自身的可持续性遭到破坏。未来研究区矿泉水开发利用率明显增加时,应严格按照阈值开采。

本文选取的渗透系数和蒸散系数多是根据经验参数或者引用模型手册中的推荐数据。这些参数在大尺度区域研究时有一定的普适性和代表性,但是在小尺度的研究区,可能使得水源涵养量计算结果产生一定的误差。因此根据研究区的具体情况,因地制宜地测量或者选取渗透系数和蒸散系数,是未来研究中应重点关注的内容。

5 结 论

(1)长白山北坡流域的水源涵养量从 2000 年的 14.0×10^8 m^3 增加到 2020 年的 16.8×10^8 m^3。在 88.2% 的区域内,气候是影响水源涵养量的主要因素,林地面积增加的地区表现为气候和土地利用共同促进水源涵养量的增长,而土地利用类型为有林地且未发生改变的地区,则表现为二者相互抑制。高水平的水源涵养量可以保证矿泉水得到充足的补给,有利于矿泉水的储存和开发利用。

(2)研究区生态基流量为 0.570 ~ 1.709 m^3/s,推荐生态基流量为 1.014 ~ 1.244 m^3/s,河源区和河流中下游矿泉相应的推荐开采系数分别为 0.36 ~ 0.46、0.40 ~ 0.50。目前,研究区矿泉水资源的开发程度处于初始阶段,正在向过渡阶段即高速开发阶段发展,距离阈值较远。在目前矿泉水开发利用率较低的情况下,对单个矿泉的开采量可以略高于开发阈值,但不能高于允许开采量,以防止破坏矿泉的可持续性。

本文的研究结论有助于厘清长白山北坡水源涵养量的影响因素及其与矿泉水资源的相互关系,明确矿泉水的开发阈值,促进区域以矿泉水为主导的经济发展,对长白山区生态保护政策的制定和矿泉水的可持续开发利用具有一定的参考意义。在后续的研究中,可以选取和测定更准确的参数,使计算结果更贴近小尺度研究区的特点。

参考文献:

[1] 王云飞,叶爱中,乔 飞,等. 水源涵养内涵及估算方法综述 [J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1041 - 1071.

[2] 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):5191 - 5196.

[3] 唐 尧,祝炜平,张 慧,等. InVEST 模型原理及其应用研究进展 [J]. 生态科学,2015,34(3):204 - 208.

[4] 杨昀则,田 鹏,张海涛,等. 基于 InVEST 模型的甬江流域水源供给功能时空变化特征 [J]. 水资源与水工程学报,2021,32(5):107 - 117.

[5] 魏培洁,吴明辉,贾映兰,等. 基于 InVEST 模型的疏勒河上游产水量时空变化特征 [J/OL]. 生态学报,2022,42(15):1 - 12 [2022-05-23] (2022-04-07). https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220406.1539.020.html.

[6] ZHANG Lu, CHENG Lei, CHIEW F, et al. Understanding the impacts of climate and landuse change on water yield [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2018, 33: 167 - 174.

[7] LIU Xueqi, LIU Yansui, WANG Yongsheng, et al. Evaluating potential impacts of land use changes on water supply-demand under multiple development scenarios in dryland region [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127811.

[8] DANESHI A, BROUWER R, NAJAFINEJAD A, et al.

Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST [J]. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125621.

[9] MATIOS E, BURNEY J. Ecosystem services mapping for sustainable agricultural water management in California's Central Valley [J]. Environmental Science Technology, 2017, 51(5): 2593 - 2601.

[10] SHOYAMA K, YAMAGATA Y. Predicting land-use change for biodiversity conservation and climate-change mitigation and its effect on ecosystem services in a watershed in Japan [J]. Ecosystem Services, 2014, 8: 25 - 34.

[11] 刘家福,李 帅,任春颖,等. 吉林省地下水功能区划分研究[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(7): 159 - 165.

[12] 李佳林,马于曦,卞建民,等. 长白山地区安图县矿泉水水化学成因及水质健康功能评价 [J]. 中国农村水利水电,2021(6): 42 - 48.

[13] YAN Baizhong, XIAO Changlai, LIANG Xiujuan, et al. Hydrogeochemical tracing of mineral water in Jingyu County, Northeast China [J]. Environmental Geochemistry Health, 2016, 38(1): 291 - 307.

[14] LIANG Xiujuan, TIAN Hui, XIAO Changlai et al. Recharge of natural mineral water Jingyu County, northeastern China [C]// E3S Web of Conferences, 2019.

[15] 董 毅. 长白山玄武岩区天然矿泉水与地表水关系研究[D]. 长春: 吉林大学,2020.

[16] XIAO Changlai, YUAN Yajie, LIANG Xiujuan, et al. Sources of metasilicate in mineral water of Jingyu County, northeastern China [C]// E3S Web of Conferences, 2019.

[17] 张慧荣,梁秀娟,董 毅,等. 抚松县天然矿泉水水化学特征及形成机理 [J]. 水电能源科学,2020,38(4): 55 - 59.

[18] 张真真. 抚松县矿泉水资源承载力及可持续利用研究[D]. 长春: 吉林大学,2016.

[19] 马于曦,卞建民,孙晓庆,等. 吉林省抚松县天然矿泉水水化学特征及健康评价 [J]. 吉林农业大学学报,2021,43(3): 355 - 362.

[20] 于叶翔,卞建民,李一涵,等. 长白山地区安图县矿泉水资源潜力评价 [J]. 水电能源科学,2021,39(12): 47 - 50.

[21] 马于曦. 安图县矿泉水水源涵养能力评估与生态红线划定 [D]. 长春: 吉林大学,2021.

[22] YANG Dong, LIU Wen, TANG Lingying, et al. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model [J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 182: 133 - 143.

[23] BAGSTAD K, SEMMENS D J, WAAGE S, et al. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation [J]. Ecosystem Services, 2013, 5: 27 - 39.

[24] HARGREAVES G H. Defining and using reference evapotranspiration [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1994, 120(6): 1132 - 1139.

[25] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价 [J]. 水科学进展,2011,22(2): 160 - 167.

[26] BAI Yang, OCHUODHO T O, YANG Jian. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 51 - 64.

[27] 白 露,吴成国,金菊良,等. 基于 Logistic 关联分析的水资源承载力评价 [J]. 人民黄河,2019,41(12): 43 - 49.

[28] 刘志明,周召红,王永强,等. 区域水资源承载力及可持续发展综合评价研究 [J]. 人民长江,2019,50(3): 145 - 150.

[29] 佘孝云. 杭州市水资源承载能力研究 [D]. 长春: 吉林大学,2005.

[30] 何 兵,高 凡,覃 姗,等. 基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构 [J]. 水土保持通报,2019,39(1): 160 - 166.

[31] 赖乔枫. 长白山玄武岩区生态基流量与矿泉水研究[D]. 长春: 吉林大学,2019.

[32] LI Yihan, BIAN Jianmin, LI Jialin, et al. Hydrochemistry and stable isotope indication of natural mineral water in Changbai Mountain, China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 40: 101047.