

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0094

巩飞, 罗勇, 田犀, 于慧. 张家口坝上地区水源涵养功能的重要性评估. 草业科学, 2020, 37(7): 1337-1344.

GONG F, LUO Y, TIAN X, YU H. Evaluating the importance of water conservation function in Bashang area, Zhangjiakou. Pratacultural Science, 2020, 37(7): 1337-1344.

张家口坝上地区水源涵养功能的重要性评估

巩飞¹, 罗勇¹, 田犀², 于慧³

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 四川省工业环境监测研究院, 四川 成都 610041;
3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 基于 InVEST 模型, 定量评价张北坝上水源涵养功能, 识别水源涵养重要性等级, 分析其空间分布特征, 为提升张北县水源涵养功能提供科学依据。结果表明: 1) 张北县水源涵养总量为 $1.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均深度为 33.98 mm, 空间分布不均。水源涵养量与降水量呈正比, 与潜在蒸散发呈反比。2) 林地的水源涵养能力最强, 旱地的水源涵养总量最大。3) 水源涵养重要性主要为中等重要, 该区域人类活动集中、旱地分布广、水源涵养量低。水源涵养极重要区分布于东部、南部以及中部稀疏的林地和草地。4) 张北县水源涵养量和重要性低的主要原因在于林地和草地稀疏生长、旱地分布广。建议在保留适当旱地规模的基础上, 继续实施退耕还草还林工程, 提高水源涵养能力。

关键词: InVEST 模型; 水源涵养; 重要性分区; 张北坝上

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)07-1337-08

Evaluating the importance of water conservation function in Bashang area, Zhangjiakou

GONG Fei¹, LUO Yong¹, TIAN Xi², YU Hui³

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Sichuan Province Academy of Industrial Environmental Monitoring, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. The Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Based on the InVEST model, the water conservation function of Zhangbei Dam was quantitatively evaluated, the importance level of water conservation was identified, and the spatial distribution characteristics were analyzed, providing a scientific basis for enhancing the water conservation function of Zhangbei County. The total water conservation in this county was $1.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, the average depth was 33.98 mm, and the spatial distribution was uneven. Water conservation was directly proportional to rainfall and inversely proportional to potential evapotranspiration. Forest land had the strongest water conservation capacity, and dry land had the highest total water conservation. Water conservation was of medium importance, and human activities were concentrated in this region. Dry land and low water conservation were widely distributed. The most important water conservation areas were distributed in sparse woodland and grassland in the eastern, southern, and central regions. The main reason for the low water conservation and importance in Zhangbei County was the sparsity of forest land and grassland and the wide distribution of dry land. Projects that return farmland to grassland and forests should be continued to improve the county's water conservation capacity by retaining the appropriate dry-land scale.

Keywords: InVEST model; water conservation; Zhangbei County; hierarchical partition

收稿日期: 2020-03-04 接受日期: 2020-06-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101001); 国家自然科学基金面上项目 (41971273)

第一作者: 巩飞 (1995-), 男, 四川绵阳人, 在读硕士生, 研究方向为资源与环境遥感。E-mail: 842256774@qq.com

通信作者: 罗勇 (1981-), 男, 四川金堂人, 副教授, 博士, 研究方向为 3S 技术在资源环境中的应用、生态评价与修复。

E-mail: luoyong2014@cdut.edu.cn

Corresponding author: LUO Yong E-mail: luoyong2014@cdut.edu.cn

水源涵养功能是生态系统服务功能中重要的组成部分, 存在调节河川径流量和蓄留水源的功能^[1], 水源涵养功能下降常常表现为水资源的枯竭, 对水源涵养的研究往往围绕着水源涵养功能的评价。

水源涵养功能的评价方法^[2]有土壤蓄水法、区域水量平衡法、降水储存量法和地下径流增长法等。张三焕等^[3]同时使用降水存量法和水量平衡法计算长白山珲春林区森林资源水源涵养量, 取其两者的平均值作为最终结果; 肖寒等^[4]以海南岛尖峰岭热带森林为例, 使用水量平衡法来计算森林水源涵养量, 评价了海南岛尖峰岭地区热带森林生态系统服务功能的生态经济价值。如今的研究方式主要以此构建模型, 如 InVEST 模型、TVDI 模型、TerrainLab 模型、SWAT 模型等, 构建模型有助于系统地计算区域水源涵养, 减少误差。其中 InVEST 模型的计算结果有着功能性强、操作性强、动态性强和应用性强等优势, 被广泛使用于水源涵养的计算。另外, InVEST 模型相对其他模型而言, 导入数据较少, 输出数据量大, 成功解决了张家口市由于基础数据、遥感数据等缺失造成的不便。余新晓等^[5]和王耕等^[6]利用 InVEST 模型分别对北京山区森林生态系统和大凌河上游汇水区的水源涵养功能进行了评估, 邱问心等^[7]对 InVEST 计算水源涵养实地应用的可行性进行了验证, 结果显示 InVEST 模型计算水源涵养具有很好的推广价值。

张家口市处于蒙古高原与华北平原的过渡带, 特殊的地理位置决定了其防风固沙、水源涵养、生态保护等不可替代的生态地位。在过去的几十年里, 受气候变化和人类活动的双重影响, 张家口水资源短缺程度加剧, 湿地萎缩, 水源涵养功能衰退。鉴于此, 本研究对张北坝上进行水源涵养功能评价, 分析水源涵养重要性, 为张北坝上水源涵养功能提升提供科技支撑。

1 研究区概况

张家口市处于蒙古高原与华北平原的过渡带, 地势西北高、东南低。张北县位于张家口市坝上地区, 地处河北省西北部, 位于 $114^{\circ} 10' - 115^{\circ} 27' E$, $40^{\circ} 57' - 41^{\circ} 34' N$, 总面积 $4\,184\text{ km}^2$, 总人口达

37 万, 研究区属于中温带大陆性季风气候, 多年平均降水量为 $300 \sim 400\text{ mm}$ 。张北县地貌特征大致分为东部坝头区、中部平原和西部丘陵地貌, 西南部和南部是内蒙古高原边缘地区。总体海拔为 $1\,300 \sim 2\,128\text{ m}$, 四季分明, 日照充足。土地利用类型以耕地和草地为主。

2 研究方法

2.1 产水量计算

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 是由美国自然资源项目组开发的一套模型系统, 包含多种模块可计算陆地、淡水和海洋 3 类生态系统服务评估, 其中常用的水源涵养评估模块基于 Budyko 水热耦合平衡假设并结合年平均降水量数据, 计算公式:

$$Y_{jx} = (1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_{jx} 为第 j 类土地利用类型栅格 x 中的水源涵养量 (mm); AET_{xj} 为第 j 类土地利用类型栅格 x 中的实际年均蒸散发量 (mm); P_x 表示栅格单元 x 的年降水量 (mm); $\frac{AET_{xj}}{P_x}$ 的计算采用 Zhang 等^[8]提出的 Budyko 水热耦合平衡假设公式为:

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad (2)$$

式中: R_{xj} 为第 j 类土地利用类型栅格 x 中的干燥度指数; ω_x 表示自然气候-土壤性质的非物理参数, 计算公式为:

$$R_{xj} = \frac{k \times ET_0}{P_x}; \quad (3)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} + 1.25. \quad (4)$$

式中: k 为蒸散系数; ET_0 表示参考作物潜在蒸散量; AWC_x 表示栅格 x 的植被可利用水含量 (mm); Z 指 Zhang 系数。

2.2 水源涵养量计算

通过 InVEST 模型计算出产水量, 在此基础上, 还需利用地形指数、流速系数和土壤饱和导水率对产水量进行修正才能获得水源涵养量, 计

算公式为：

$$R = \min(1, 249/V) \times \min(1, 0.3 \times TI) \times \min(1, K/300) \times Y。$$

(5)

式中： R 表示水源涵养量， V 为流速系数， TI 为地形指数， K 为土壤饱和导水率， Y 为产水量。

2.3 水源涵养功能重要性

2.3.1 归一化划分等级

根据 InVEST 模型计算出的水源涵养量，通过 Arcgis 软件对其进行归一化处理^[9]，公式为：

$$Y = (Y_x - Y_{x\min}) / (Y_{x\max} - Y_{x\min})。$$

(6)

式中： Y 表示归一化后的水源涵养量； Y_x 指 InVEST 模型计算得出的水源涵养量； $Y_{x\min}$ 指水源涵养量

的最小值； $Y_{x\max}$ 指水源涵养量的最大值。

2.3.2 水源涵养功能重要性

研究水源涵养功能重要性也是生态系统服务评价的一部分。重要性评价方法有很多种，常用的方法就是综合指数法^[10]，相较于其他方法，综合指数法有着更好的客观性和层次性。前人研究指出，水源涵养重要性收到多种因素的影响，通过对张北县的研究选取了降水量、蒸散量、坡度、土地利用和植被覆盖度 5 个因子作为主要因子，对 5 个主要因子进行归一化标准分级 (表 1)，进而通过层次分析法计算出权重，最后结合主要因子和权重构建出张北县水源涵养功能重要性体系。

表 1 水源涵养功能重要性归一化标准分级
Table 1 Classification of importance of water conservation function in Zhangbei County

主要因子 Main factor	极重要 Extremely important	高度重要 Highly important	中度重要 Moderately important	轻度重要 Slightly important	一般重要 Generally important
降水量 Rainfall	$1.0 \geq P > 0.8$	$0.8 \geq P > 0.6$	$0.6 \geq P > 0.4$	$0.4 \geq P > 0.2$	$0.2 \geq P \geq 0.0$
蒸散量 Evapotranspiration	$0.0 \leq E \leq 0.2$	$0.2 < E \leq 0.4$	$0.4 < E \leq 0.6$	$0.6 < E \leq 0.8$	$0.8 < E \leq 1.0$
植被覆盖度 Vegetation coverage	$1.0 \geq C > 0.8$	$0.8 \geq C > 0.6$	$0.6 \geq C > 0.4$	$0.4 \geq C > 0.2$	$0.2 \geq C \geq 0.0$
坡度 Slope	$0.0 \leq S \leq 0.2$	$0.2 < S \leq 0.4$	$0.4 < S \leq 0.6$	$0.6 < S \leq 0.8$	$0.8 < S \leq 1.0$
土地覆盖 Land cover	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	旱地 Dry land	其他用地 Other land
赋值 Assignment	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0

根据 AHP 确定主要因子权重，通过构建 AHP 模型，得出 5 个因子权重 (表 2)。最后通过加权求和的公式计算得出水源涵养重要性，公式^[10]：

$$R = \sum_{i=1}^n R_i x_i。$$

(7)

式中： R 表示水源涵养重要性等级指数， R_i 表示主要因子标准化分级， x_i 指权重。

表 2 水源涵养重要性因子权重
Table 2 Water conservation importance factor weight

主要因子 Main factor	权重 Weight
降水量 Rainfall	0.294 6
蒸散量 Evapotranspiration	0.161 9
植被覆盖度 Vegetation coverage	0.269 8
坡度 Slope	0.093 6
土地覆盖 Land cover	0.180 1

3 数据来源与计算

InVEST 模型软件计算水源涵养的模块 (Water-Yield) 需要的数据包括降水量、土地利用、植被可利用水量、土壤最大根系埋藏深度、年均潜在蒸散量、流域及次一级子流域、生物物理系数表、Zhang 系数和土壤饱和导水率。

1) 降水量。根据 2015 年张北县及其周围 10 个气象站点年均降水量数据，通过 Arcgis10.3 软件进行空间插值，得到降水量栅格数据。

2) 土地利用。通过遥感影像解译获得 2015 年张北县的土地利用数据，经过 Arcgis 处理后，分出包括林地、草地、水域、城乡工矿用地、未利用土地和旱地 6 个一级分类和 18 个二级分类土地利用类型。

3) 植被可利用水含量。指土壤土层中为植物生长提供的水量所占比例，根据 InVEST3.7 手册中的要求，植被可利用水含量取值范围在 [0~1]，根据

周文佐等^[11]提出的利用田间持水量和永久萎蔫系数的插值进行估算。

4) 土壤最大根系埋藏深度。指由于环境的物理和化学特征不同, 植物根系在土壤中能够延伸的最大深度。数据来源于联合国世界土壤数据库(HWSD), 经过 Arcgis 进行空间转换处理后, 得到土壤深度图层。

5) 年均潜在蒸散量。算潜在蒸散量的方法有很多种, 本研究选取的估算方法是 Modified-Hargreaves 法, 计算公式为:

$$ET_0=0.0013\times0.408\times RA\times(T_{\text{avg}}+17)\times(TD-0.0123P)^{0.76}。$$

(8)

式中: RA 指太阳大气顶层辐射; T_{avg} 为日最高气温均值和日最低气温均值的均值; TD 为日最高气温

均值和日最低气温均值的差值; P 指降水量。所有数据均在中国气象数据网获取。得到 ET_0 后再利用 Arcgis 进行空间插值, 得到潜在蒸散量的栅格数据图。

6) 流域及次一级子流域。利用 Arcgis 对研究区 DEM 数据进行水文分析, 再根据河流山脊数据进行校正后得到流域图。

7) 生物物理系数表。生物物理系数表包括土地利用类型代码 (Lucode)、土地利用类型命名 (LULC_desc)、实际蒸散发代码 (LULC_veg)、最大根系深度 (root_depth) 以及 KC 系数 (表 3)。其中土地利用类型代码和土地利用类型命名按照研究区土地利用数据填写, 实际蒸散发代码与最大根系深度参照模型手册, KC 系数可以根据植物叶面积指数计算, 这里根据模型手册与前人研究结果获取得到。

表 3 InVEST 生物物理系数

Table 3 InVEST biophysical coefficients

土地利用类型命名 LULC_desc	土地利用类型代码 Lucode	蒸散发系数 Kc	最大根系深度 Root_depth/mm	实际蒸散发代码 LULC_veg
有林地 Woodland	21	1.00	3 000	1
灌木林地 Shrubland	22	1.00	3 000	1
疏林地 Sparse woodland	23	1.00	3 000	1
其他林地 Other woodlands	24	1.00	3 000	1
高覆盖度草地 High coverage grassland	31	0.40	500	1
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	32	0.30	500	1
低覆盖度草地 Low-coverage grassland	33	0.30	500	1
湖泊 Lake	42	1.25	1	0
水库、坑塘 Reservoir	43	1.25	1	0
滩地 Beach	46	0.90	1	0
城镇用地 Town land	51	0.20	1	0
农村居民点用地 Rural residential land	52	0.20	1	0
工交建设用地 Construction land	53	0.20	1	0
盐碱地 Saline land	63	0.21	1	0
沼泽地 wetlands	64	0.90	300	0
山地旱地 Mountain dry land	121	0.60	400	1
丘陵区旱地 Hilly drylands	122	0.60	400	1
平原区旱地 Drylands in the plains	123	0.60	400	1

8) Zhang 系数。Zhang 系数是根据季节性降水分布定义的常数^[12], 取值范围在 [1~30], 软件默认为 5, 本研究根据研究区所在地理位置、降水量次数以及查阅文献资料, 经过反复运行验证后, 最终将 Zhang 系数设定为 22。

9) 土壤饱和和导水率。通过 SPAW 软件和土壤参数计算得到 (表 4)。

表 4 土壤饱和和导水率

Table 4 Soil saturated hydraulic conductivity

土地利用类型 Land use type	土壤饱和和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity/(mm·h ⁻¹)
耕地 Arable land	18.0
草地 Grassland	23.0
灌木林 Shrubbery	8.2
其他林 Shelter forest	6.5

4 结果与分析

4.1 水源涵养量评估

张北县是京津水源涵养功能区，为京津承担着保水源、送清风、防沙源的重要任务。

由张北县 2015 年产水量和水源涵养分布图(图 1)可知，张北县 2015 年产水量平均深度 52.17 mm，产水总量 $2.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；水源涵养平均深度为 33.98 mm，水源涵养总量为 $1.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

研究区水源涵养平均深度 33.98 mm，从总体结果来看，研究区东部坝头有着高覆盖度草地，海拔相对于高，人类活动痕迹相对少，水源涵养较

高；中部平原区和西南丘陵地区，主要土地利用类型为丘陵区旱地以及低覆盖度草地，水源涵养量偏低；湖泊和河流以及沼泽地蒸发作用大，水源涵养量低；还有部分水源涵养低的城镇用地和建设用地零碎分散。

InVEST 的产水量模型结果是由径流量和水源涵养量两部分组成，参照《张北县水资源公报》和张占贵^[13]的研究，对应径流量指标，对模型结果进行验证。结果表明，模拟径流量为 7 610.2 万 m^3 ，实际径流量为 7 400 万 m^3 ，相对误差 2.85%，表明该模型在张北县的水源涵养研究中的计算结果可行。

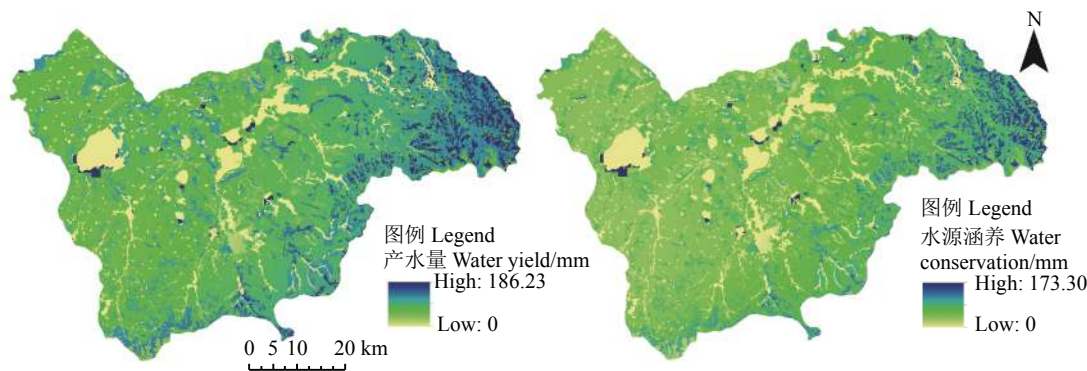


图 1 张北县产水量和水源涵养空间分布图

Figure 1 Spatial distribution maps of water yield and water conservation in Zhangbei County

4.2 水源涵养功能重要性评价

根据公式 (6) 计算得到张北县水源涵养等级划分图；根据生态红线划定方法^[6](参照 2015 年环境保护部颁发的《生态保护红线划定技术指南》重要性分级方法)，利用 Arcgis 软件空间分类方法的分位数方法对水源涵养重要性进行分类，分为一

般重要、中等重要、极重要 3 个重要性级别(图 2)。

从研究结果来看，水源涵养较低等级占比面积最大，低等级占比面积最小。结合图 3，研究区水源涵养等级低的区域在西部，地类基本是低覆盖度的草地和旱地，这些区域降水量低，植被少，截留能力低，导致该区域水源涵养量少且等级

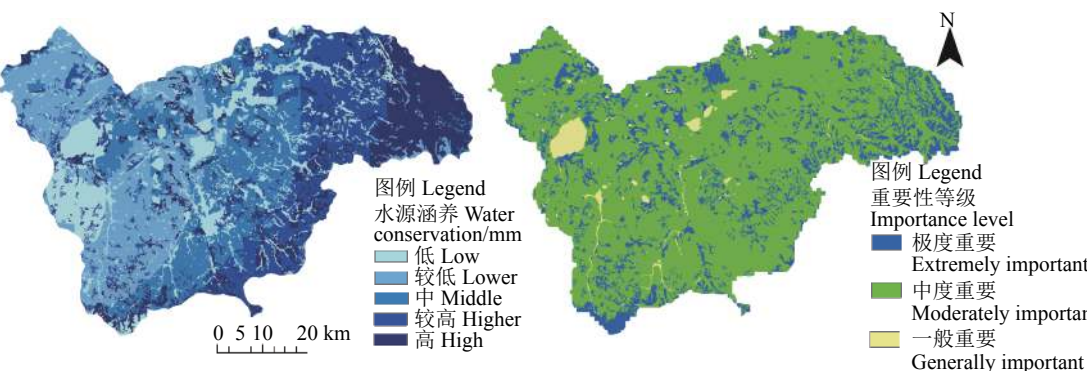
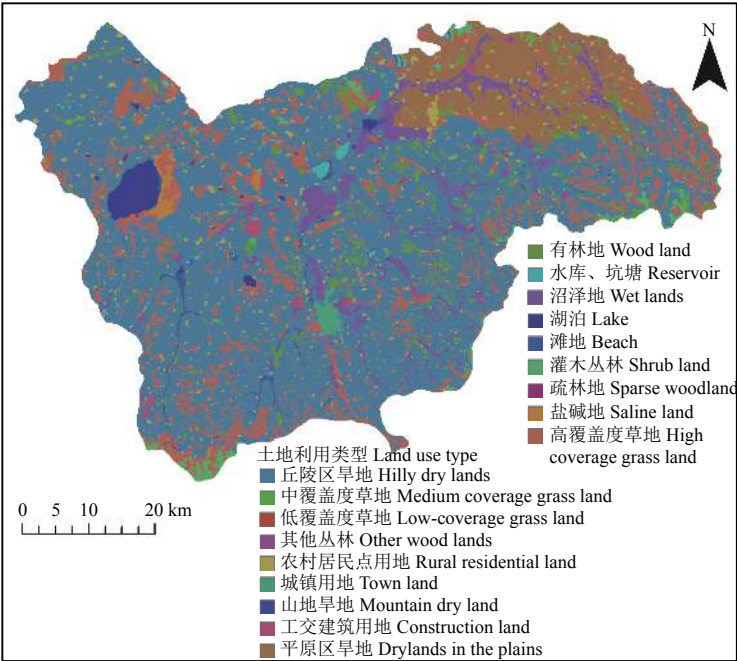


图 2 张北县水源涵养等级划分和重要性分区图

Figure 2 Water conservation level classification and importance zoning maps of Zhangbei County



低。水源涵养等级高区域位于研究区东部和南部，这里海拔高，人类活动痕迹少，地类基本是高覆盖度的草地，降水量高，并且蒸发作用小，促进水源涵养量的增加。

总体上来看，研究区水源涵养重要性主要为中等重要，极重要主要集中在东部和西南部，这些区域主要地类为高覆盖度的草地和林地，人类活动痕迹少，东部和西南部都是坝头区，由此可见，极重要区主要分布于海拔较高和降水量高的区域，其余地区也有零碎分布。

5 讨论

5.1 土地利用类型对水源涵养的影响

根据土地利用数据划分出的 6 种一级分类，包括林地、草地、旱地、水域、城乡工矿用地和未利用地。其中，旱地所占面积最大，占总面积的 69.32%；其次是草地，占总面积的 13.62%；林地、未利用地、城乡工矿用地和水域分别占 5.52%、5.16%、3.63%、2.76%，由大到小的顺序依次是旱地 > 草地 > 林地 > 未利用地 > 城乡工矿用地 > 水域。

将水源涵养量与土地利用数据进行空间叠加，利用 Arcgis 的区域统计工具，计算出不同地类的水源涵养量。

不同土地利用类型的单元水源涵养量存在较大的差异，林地和草地远大于其他土地利用类型，由高到低的顺序依次为林地 > 草地 > 旱地 > 城乡工矿用地 > 未利用地 > 水域 (表 5)。水源涵养总量由大到小的顺序依次是旱地 > 草地 > 林地 > 城乡工矿用地 > 未利用地 > 水域，旱地的单元水源涵养量虽然不高，但其占的面积最大，因此水源涵养总量最大。林地和未利用地所占面积接近，但由于林地的单元水源涵养量远大于未利用地，因此水源涵养总量远高于未利用地。说明水源涵养总量的大小不仅和单元水源涵养量相关，还与地类的面积有很大的关系。

表 5 不同土地类别水源涵养量			
Table 5 Water conservation of different land types			
类别 Type	像元个数 Pixel number	单元水源涵养量 Unit water conservation capacity/mm	水源涵养总量 Total water conservation/ ($\times 10^7 m^3$)
林地 Forest land	23 073	92.96	2 1448 660.8
草地 Grassland	56 965	55.89	31 837 738.5
旱地 Dry land	289 889	29.91	86 705 799.9
水域 Water	11 541	0.00	0.0
城乡工矿用地 Construction land	15 176	5.78	877 172.8
未利用地 Unused land	21 570	4.01	864 957.0

5.2 水源涵养功能重要性空间分布

结合图 2 和图 3，研究区水源涵养归一化面积及占比结果如表 6 所示。

表 6 归一化值所占比例
Table 6 Proportion of normalized value

归一化等级 Normalization level	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%
低 Low	756.52	18.08
较低 Lower	953.43	22.79
中 Medium	885.95	21.17
较高 Higher	819.18	19.58
高 High	768.92	18.38

水源涵养低等级地区面积为 756.52 km²，占研究区总面积的 18.08%；较低等级地区面积 953.43 km²，占总面积的 22.79%；中等级地区面积 885.95 km²，占总面积的 21.17%；较高等级地区面积 819.18 km²，占总面积的 19.58%；高等级地区面积 768.92 km²，占总面积的 18.38%。研究区水源涵养大部分处于较低级别，低等级所占面积最小。结合土地利用分类得出结论，研究区林地和草地分布稀疏，旱地所占面积最多，从而导致该地整体水源涵养量不高。张北县应该做好对水源地的有效利用和管理，提高水源涵养等级。

根据水源涵养重要性分区图，通过统计获得不同分区面积。

结合图 2、图 3 和表 7 可知，研究区水源涵养中等重要面积最大，为 3 280.02 km²，占比 78.39%，远高于一般重要区域的 18.82% 和极度重要的 2.78%，空间上分布不均匀，格局与水源涵养空间分布基本一致。中等重要区域人类活动痕迹较大，旱地分布广泛，极度重要区域分布着林地和草地，并且人类活动痕迹少，可对极度重要区域进行重点

表 7 水源涵养功能重要性分级及面积百分比
Table 7 Water conservation function importance classification and area percentage

水源涵养重要性等级 Water conservation importance level	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%
一般重要 Generally important	787.61	18.82
中等重要 Moderately important	3 280.02	78.39
极度重要 Extremely important	116.37	2.78

保护，并在此基础上实施退耕还林措施，将中等重要提升为极度重要。

6 结论

1) 2015 年张家口市张北县产水量平均深度 52.17 mm，产水总量 $2.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水源涵养量平均深度为 33.98 mm，水源涵养总量为 $1.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。产水量平均深度和水源涵养平均深度空间分布格局相似；通过 InVEST 模型计算得知，水源涵养量与降水量呈正比，与潜在蒸散发呈负比，并且与植被可利用水含量、土壤深度、土地覆被等因素也息息相关；研究区不同地类之中林地的水源涵养能力最强，旱地的水源涵养总量最大，说明水源涵养总量大小与地类面积紧密相关；张北县政府应该做好对水源地的有效利用和管理，提高水源涵养等级。

2) 通过综合指数法对研究区水源涵养进行重要性分区，可以得知研究区重要性主要为中等重要，极重要区多分布在人类活动痕迹少的林地和草地，对这些区域建议进行重点保护，中等重要区域人类活动集中，旱地分布较多，水源涵养量低。张北县水源涵养量低、水源涵养重要性低的主要原因在于林地和草地稀疏生长，旱地分布过多。应当在保留适当旱地规模的基础上，继续实施退耕还草还林工程，提高水源涵养能力。

参考文献 References:

[1] 白杨, 初东, 田良, 冯宇, 张哲. 武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 233-241.
BAI Y, CHU D, TIAN L, FENG Y, ZHANG Z. Study on the importance evaluation of water conservation function in Wuhan City Circle. Journal of Earth Information Science, 2014, 16(2): 233-241.

[2] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
BO B, XU P, WANG Y K, PENG Y, REN J. Spatial pattern of water conservation function in Dujiangyan City. Acta Ecologica

- Sinica, 2013, 33(3): 789-797.
- [3] 张三焕, 赵国柱, 田允哲, 玄莲玉. 长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究. 延边大学学报(自然科学版), 2001(2): 126-134.
- ZHANG S H, ZHAO G Z, TIAN Y Z, XUAN L Y. Evaluation of the ecological environment value of forest resource assets in the Hunchun forest area of Changbai Mountain. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2001(2): 126-134.
- [4] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 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. 应用生态学报, 2000(4): 481-484.
- XIAO H, OUYANG Z Y, ZHAO J Z, WANG X K. A preliminary study on the service function of forest ecosystem and its eco-economic value assessment: Taking the Jianfengling tropical forest in Hainan Island as an example. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000(4): 481-484.
- [5] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- YU X X, ZHOU B, LYU X Z, YANG Z G. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST Model. Forestry Science, 2012, 48(10): 1-5.
- [6] 王耕, 韩冬雪. 基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估. 水土保持通报, 2018, 38(3): 206-211.
- WANF G, HAN D X. Evaluation of water conservation funcyion in Daling River Catchment based on InVEST Model. Soil and Water Conservation Bulletin, 2018, 38(3): 206-211.
- [7] 邱问心, 张勇, 俞佳骏, 张超, 郑超超, 余树全. InVEST 模型水源涵养模块实地应用的可行性验证. 浙江农林大学学报, 2018, 35(5): 810-817.
- QIU W X, ZHANG Y, YU J J, ZHANG C, ZHENG C C, YU S Q. Feasibility verification with field application of a water conservation module using the InVEST Model. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2018, 35(5): 810-817.
- [8] ZHANG L, HICKEL K, DAWES W R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. Water Resources Research, 2004, 40(2): 89-97.
- [9] 王小琳. 基于 InVEST 模型的贵州省水源涵养功能研究. 贵阳: 贵州师范大学硕士学位论文, 2016.
- WANG X L. Modelling water conservation function based on the InVEST model: Case studies in Guizhou. Master Thesis. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.
- [10] 刘兆芹. 水源涵养功能重要性评价: 以湖北省为例. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2013.
- LIU Z Q. The importance of water conservation function evaluation: A case of Hubei Province. Master Thesis. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [11] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究: 以东北黑土为例. 干旱区资源与环境, 2003(4): 88-95.
- ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J. Research on empirical estimation of soil available water content: Taking black soil in northeast China as an example. Resources and Environment in Arid Areas, 2003(4): 88-95.
- [12] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 吴婧, 胡宝清. 基于 InVEST 模型的白龙江流域水源供给服务时空分异. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1337-1347.
- XIE Y C, GONG J, QI S S, WU J, HU B Q. Spatio-temporal variation of water supply service in Bailong River Watershed based on InVEST Model. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1337-1347.
- [13] 张占贵. 张北县水资源现状分析. 海河水利, 2014(2): 21-22.
- ZHANG Z G. Analysis of current status of water resources in Zhangbei County. Haihe Water Conservancy, 2014(2): 21-22.

(执行编辑 苟燕妮)