

DOI: 10.5846/stxb201910102108

刘宥延, 刘兴元, 张博, 李妙莹. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170.

Liu Y Y, Liu X Y, Zhang B, Li M Y. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6161-6170.

基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析

刘宥延, 刘兴元*, 张博, 李妙莹

兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020

摘要: 水源涵养功能是黄土高原丘陵区生态服务的主导功能, 对保障该区域生态与社会经济的可持续发展具有重要作用。以定西市安定区为例, 基于 InVEST 模型评估了 2017 年的水源涵养功能及其空间分布特征, 并利用空间统计方法计算了水源涵养功能的冷热点和重要性分布格局。结果表明, 该区 2017 年在栅格单元的水源涵养量介于 0—364.541 mm 之间, 流域单位面积平均年水源涵养量 36.37 m³/hm², 水源涵养总量为 11900×10⁴ m³。其中, 西河流域单位面积平均年水源涵养量最高, 达 54.64 m³/hm², 整个区域的水源涵养功能在空间分布上呈由西南向东北逐渐减少的特征。水源涵养功能的热点区域主要集中在南部地区, 热点分布呈由西南至东北逐渐降低的分布格局; 冷点区面积要高于热点区面积, 非显著点面积占总面积的 50% 以上。水源涵养功能的高度重要区和极重要区面积占总面积的 34.39%, 主要分布在关川河流域; 一般重要区和较重要区面积占总面积的 40.59%, 主要分布在海拔较低的称钩河和西河流域。通过对定西市安定区水源涵养功能及冷热点和重要性的空间分布特征分析, 明确了生态保护与建设的重点区域, 为黄土高原丘陵区的生态与社会经济发展提供决策依据。

关键词: 水源涵养功能; InVEST 模型; 冷热点分析; 黄土高原丘陵区

Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model

LIU Youyan, LIU Xingyuan*, ZHANG Bo, LI Miaoying

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems; Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University; Lanzhou 730020, China

Abstract: Water conservation function is the dominant function of ecological system services in the hilly region of Loess Plateau, and plays important roles in the sustainable development of ecological and social economy in this region. This study took Anding District in Dingxi City as an example to evaluate the water conservation function and its spatial distribution in 2017 by using InVEST model, and then this study calculated the cold and hot spots and presented spatial distribution pattern of the importance degree of water conservation function with spatially statistical methods. This study showed that the water annual conservation amount ranged from 0 to 364.541 mm per grid unit. The average annual water conservation amount in the watershed was 36.37 m³/hm², in which the average annual water conservation amount in the Xi River Basin was the highest with 54.64 m³/hm². The total water conservation capacity of the whole watershed was 11900×10⁴ m³, and gradually decreased from the southwest areas to the northeast areas in the whole study region. This study also found that the hot spot region of water conservation function was mainly distributed in the southern areas, and gradually decreased from the southwest areas to the northeast areas. The area of cold spots was higher than that of hot spots and the area of non-significant

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504603)

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2020-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxingyuan@lzu.edu.cn

spots accounted for more than 50% of the total area. This study further showed that the areas with highly important and extremely important degree for water conservation functions accounted for 34.39% of the total area, mainly distributing in the Guanchuan River basin, and the areas with general important and more important degree accounted for 40.59% of the total area, and these areas primarily distributed in the Chengou River and Xi River basin with relatively lower altitude. These results identified the key areas for ecological protection and construction in Anding District of Dingxi City, and provided a decision-making basis for the ecological, social and economic development in the hilly region of the loess plateau.

Key Words: water conservation function; InVEST model; cold and hot spot analysis; hilly region of the Loess Plateau

黄土高原丘陵区是我国水资源匮乏和水土流失最严重地区,水源涵养作为该地区最重要的生态服务功能之一^[1],对气候、水文、植被、生产力和土壤养分循环等具有直接的影响^[2]。长期以来,受特殊的自然地理条件和传统农业生产模式的制约,导致黄土高原丘陵区生态环境不断恶化,水源涵养能力降低,生态系统服务功能减弱,严重影响和制约着黄土高原丘陵区生态和社会经济的可持续发展^[3]。由于黄土高原丘陵区生态环境的脆弱性和水源涵养功能的重要性,自 20 世纪 80 年代以来,国家在该地区先后开展了小流域治理、退耕还林草工程和生态补偿等一系列生态工程和政策,该地区的生态条件和水土保持功能得到了显著的改善^[4]。但随着植被结构变化与盖度的增加,产生了人工植被稳定性低、植物蒸腾量增大、土壤干化、流域产水减少等问题^[5-6],由此产生的水源涵养功能及其空间变化对区域生态服务的影响引起广泛关注。目前,国内针对黄土高原生态系统水源涵养功能,应用多种方法开展了大量的研究。苏常红和傅伯杰^[7]利用 InVEST 模型对黄土高原在气候和土地利用变化情境下的水源涵养进行评估,表明陕北黄土高原水源涵养在 1990—2008 年呈下降趋势。李晶和任志远^[8]基于 GIS 对陕北黄土高原水源涵养及其价值进行了评估,表明 1990—2000 年以年均 0.68% 递减。包玉斌等^[9]基于 InVEST 水源涵养功能评价模块,定量评价退耕还林还草工程背景下土地利用/覆被变化对研究区水源涵养的影响并进行了水源涵养空间分区,表明 2000—2010 年,随着陕北黄土高原草地、灌丛和林地面积的增加,但水源涵养量整体呈减少趋势。王超和甄霖^[10]利用综合蓄水能力法对宁夏固原市森林水源涵养功能时空动态进行了分析,表明在 2000—2010 年灌木林的单位面积水源涵养量最大,对水源涵养量增长的贡献占 93.34%。已有的研究对黄土高原生态建设与保护发挥了积极作用,但主要集中在黄土高原典型区域退耕前后植被状况发生变化的评价,时序较早,没能通过水源涵养功能评估来甄别区域内水源涵养的冷热点范围和确定水源涵养的重要区域。由于黄土高原地貌类型多样^[11],丘陵区作为主要的地貌单元,定量地评估黄土高原丘陵区的水源涵养功能其空间分布特征,确定水源涵养的热点和重要保护区域,对促进该区域生态保护和水资源的合理配置,实现可持续发展具有重要科学意义。

对水源涵养水源功能评估主要是基于水量平衡、土壤蓄水力和径流量计算,评估的模型和方法较多,但 InVEST 模型作为整合多种算法的集成式模型^[12],自 2016 年发布最新的 InVEST3.3.1 版本后,结合土地利用和覆被、降水和土壤深度等数据计算供给水量,用于分析生态系统的结构和功能变化对生态系统服务及其价值的影响^[13],在我国主要应用于不同土地利用策略的生态系统服务功能差异及对多种生态系统服务权衡/协同关系的定量辨识,为区域土地利用规划中潜在的生态系统服务供需提供优化方案^[14]。该模型将 GIS 技术融合到生态系统服务评估中,利用函数定量评估现状和未来情景下的多种生态系统服务价值,是集精细化和定量化为一体的空间化生态系统服务功能评估方法,在空间格局测度中具有数据易于获取和操作简单的优势,被国内外广泛的应用^[15-16]。

目前国内对生态服务方面的研究很多,但针对黄土高原丘陵区水源涵养的研究不多,且主要是以功能和价值评估为主的单一性研究,缺乏结合功能评估、热点分析和重要性分区的综合研究。因此,本研究应用 InVEST 模型,选择地处黄土高原中部定西市安定区开展水源涵养功能的定量评估,应用空间统计方法对水源涵养功能的冷热点区的空间分布特征进行分析和热点区识别,以明确水源涵养功能的强弱分布,在此基础上

对水源涵养功能进行重要性分级和空间分区,确定水源涵养优先和重点保护的区域,为科学合理地制定黄土高原丘陵区生态恢复与水源涵养保护决策提供依据。

1 研究区概况

定西市安定区位于黄土高原中部,东经 104°12'48"—105°01'06"之间,北纬 35°17'54"—36°02'40";地貌以梁峁、沟壑、丘陵为主,海拔在 1662—2570 m 之间;年均气温 3—9℃ 之间,多年平均降水量 515.2 mm,干燥指数在 1—2 之间,属于中温带半干旱大陆性气候,自然植被覆盖率较低,土地利用类型以草地、耕地、林地、灌草地、建设用地和未利用土地为主,是典型的干旱半干旱地区^[17]。总面积为 363871 hm²,境内河流分布为北部的关川河,西部的称钩河,西南部的西河,东南部的东河,东部的西巩河。其中,关川河为境内最大河流,干流全长 180 km。该区多年平均土壤侵蚀模数达到 3500—6000 t km⁻² a⁻¹ 以上,水土流失面积达 3.65×10⁵ hm²,占土地总面积的 80.64%,是我国水土流失最严重的区域之一^[18]。2017 年总人口达 43.05 万人,农村人口 22.31 万人,生产总值达到 80.08 亿元,是以农牧业生产为主导产业的传统农业地区,脆弱的自然生态环境与落后社会经济水平相互作用,使该地区的生态经济问题十分严重^[19]。研究区地理位置图(图 1)。

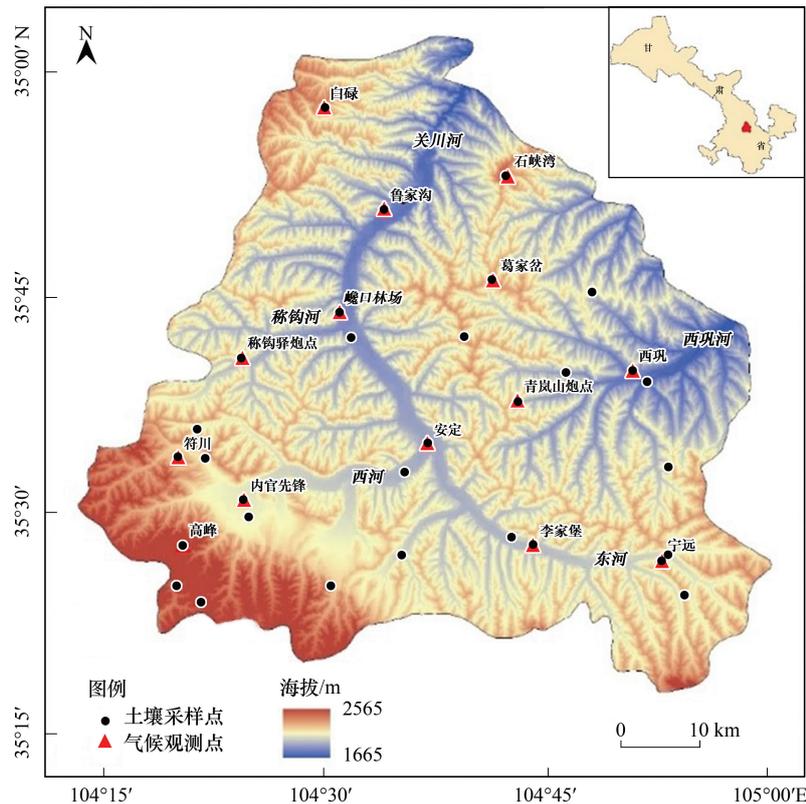


图 1 研究区位置及数据采样点分布图
Fig.1 Study area and data sampling site

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

数据主要包括土地利用、植被覆盖、土壤、水分、气候、DEM 及社会经济等数据。土地利用和植被覆盖数据来源于地面监测和地理空间数据云的 Landsat-8 影像数据,空间分辨率为 30 m;降水、温度、日照和蒸发等数据来源于中国气象局西北区域气象中心在定西市安定区内 14 个气象站点 2017 年数据插值和中国气象科

学数据共享网 (<http://data.cma.cn>); DEM 数据下载自地理空间数据云, 空间分辨率为 30 m; 土壤含水量、砂粒、粉粒、粘粒、有机质、氮磷、容重和植物根系深度等数据是在 2016 年 10 月开始到 2017 年 10 月期间, 定西市安定区 33 个土壤监测点获取的, 分别在阳坡和阴坡沿顺坡方向设置样带 (间隔 15 m), 采用网格布点法设置 5 个水分和土壤监测点, 平均每 15 d 测定一次土壤水分, 使用时域反射仪 TDR (TRIME, IMKO Micromodultechnik, Germany) 测定 0—180 cm 土层的土壤水分; 土壤的其他理化指标于 2016 年 10 月和 2017 年 10 月取样 2 次, 在实验室进行分析。DEM 数据下载自地理空间数据云, 空间分辨率为 30 m; 社会经济数据来源于《定西市统计年鉴》, 行政区域、道路、水系等矢量数据, 来自国家基础地理数据库。

2.2 研究方法

本研究利用 InVEST 模型进行分析与评价。InVEST 水源涵养模型是基于栅格单元的降水、植物蒸腾、地表蒸发、植物根系深度、植物有效可利用水和土壤最大根系埋藏深度等参数计算出产水量, 包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水 量和冠层截留量^[20]。计算出年产水量后, 根据 DEM 计算径流路径地形指数, 利用土壤渗透性、地表径流流速系数计算径流在栅格上停留时间, 计算出水源涵养量^[21]。该模型综合考虑了不同土地利用类型的土壤渗透性、地形差异、地表粗糙程度等对地表径流的影响, 能够较好地表达流域水源涵养量的空间分布状况及其影响水源涵养量的主要因素^[22]。

(1) 产水量计算模型

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_x}{1 + \omega_x R_x + \left(\frac{1}{R_x}\right)} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_x = \frac{K_x \times ET_0}{P_x} \quad (4)$$

式中, Y_x 为年产水量 (mm); P_x 表示栅格单元 x 的年降水量; AET_x (annual evapotranspiration) 为不同土地利用类型栅格单元 x 的年平均蒸散发量 (mm); R_x 为 Bydyko 干燥指数; ω_x 为自然气候-土壤性质的非物理参数; Z 为经验常数 (ZHANG 系数), 取值范围为 1—10; AWC_x (available water content) 为栅格单元 x 的土壤有效含水量 (mm); K_x 为栅格单元 x 中不同土地覆被类型的植被蒸散系数; ET_0 (evapotranspiration) 为参考作物蒸散系数。

(2) 水源涵养量计算模型

$$WR = \text{Min}\left(1, \frac{249}{\text{Velocity}}\right) \times \text{Min}\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \text{Min}\left(1, \frac{K_{\text{sat}}}{300}\right) \times Y_x \quad (5)$$

$$TI = \log_{10}\left(\frac{\text{Drainage area}}{\text{Soil depth} \times \text{Percent slope}}\right) \quad (6)$$

式中, WR (water resource) 为水源涵养量 (mm); Velocity 为流速系数; TI (terrain index) 为地形指数; K_{sat} 为土壤饱和导水率 (cm/d); Drainage area 为流域单元集水区的栅格数量; Soil depth 为土层厚度 (mm); Percent slope 为百分比坡度 (%)。

(3) 热点分析法

水源涵养功能的热点或冷点区域是指水源涵养功能的特征值分布聚集度高或者低的区域。热点地区要求水源涵养具有高值, 在空间统计中, 通常采用 G_i^* 统计方法探查流域水源涵养功能的高值或低值在空间上的聚集情况, 是一种基于距离全矩阵的局部空间自相关指标^[23]。 G_i^* 的统计意义可用标准化的 Z 值来检验^[16], 运用 ArcGIS 中的 Hot Spot Analysis with Rendering 工具对定西市安定区水源涵养功能的冷热点区域进行分析。

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n W_{ij} x_j}{\sum_j^n x_j} \quad (7)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{VAR}(G_i^*)}} = \frac{\sum_j W_{ij} - \bar{x} \sum_j W_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_j W_{ij}^2 - (\sum_j W_{ij})^2}{n-1}}} \quad (8)$$

式中, W_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间的空间权重矩阵; x_j 为斑块 j 的属性值; \bar{x} 为所有属性的平均值; n 为总斑块数。根据研究区的自然与社会经济条件, 参考相关文献, 确定冷热点区域的划分规则为: 若 $Z(G_i^*) > 2.58$, 则定为极显著热点区域, 在 $1.65 < Z(G_i^*) \leq 2.58$, 则定为显著热点区, 在 $1 < Z(G_i^*) \leq 1.65$, 则定为热点区域。 $Z(G_i^*) < -2.58$, 则定为极显著冷点区域, 在 $-2.58 \leq Z(G_i^*) < -1.65$, 则定为显著冷点区域, 在 $-1.65 \leq Z(G_i^*) < 1$, 则定为冷点区域, 在 $-1 \leq Z(G_i^*) \leq 1$, 则定为不显著区域。

2.3 模型输入参数确定

土地利用/覆被数据选取的成像时间为 2017 年 9 月 29 日, 影像数据从 Landsat-8 下载自地理空间数据云, 通过遥感影像目视解译的办法获; 降水数据是 2017 年定西市安定区 14 个气象站点多年降水数据应用 ANUSPLIN 软件插值获得; 土壤与水分数据由 33 个试验监测点获得; DEM 图均由 ArcGIS 10.5 软件的水文分析工具 (Hydrology) 操作获得; 地形指数 (TI) 是通过计算流域单元集水区的栅格数量、土壤深度和百分比坡度数据, 集水区的栅格数量数据由 ArcGIS 的水文分析模块中操作获得; 百分比坡度数据由 ArcGIS 的坡度计算器工具计算得出; 壤饱和导水率 (K_{sat}) 由 Cosby 模型计算得出; Z 系数是根据研究区产水量情况以及查阅相关参考文献^[11,24-25], 确定 Z 系数为 5; 土壤有效含水量根据 Zhou 等^[26] 的计算结果; 参考作物蒸散由 FAO56 修正的 Penman-Monteith 公式计算得到^[20]; 流域汇流面积、坡度、坡长通过 DEM 提取; 流速系数以 USDA-NRCS 提供的国家工程手册上的流速—坡度—景观表格为基准, 乘以 1000 得到; 植物蒸散系数是根据相关文献结合试验数据确定^[2,9,27]。

3 结果分析

3.1 产水量空间分布特征

定西市安定区位于黄河中上游, 分属祖厉河流域和渭河流域, 其中祖厉河流域占全区总面积的 99.5%。在该区的北部为关川河, 西部为称钩河, 西南部为西河, 东南部为东河, 东部为西巩河。其中, 关川河为境内最大河流, 干流全长 180 km, 水资源短缺和水土流失严重是该区主要的生态问题。

利用公式(1)—(4)计算出定西市安定区 2017 年的总产水量为 $3.41 \times 10^8 \text{ m}^3$, 基于栅格单元的产水量介于 0—460.825 mm 之间; 流域单位面积产水量为 $292.67 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。在各流域中, 西河流域的单位面积产水量最高 ($162.26 \text{ m}^3/\text{hm}^2$), 西巩河流域的单位面积产水量最低 ($50.54 \text{ m}^3/\text{hm}^2$); 但关川河流域面积最大, 虽然单位面积的年平均产水量仅为 $74.03 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 年产水量占区域总产水量的 28.2%。称钩河流域面积最小, 单位面积的年平均产水量为 $134.42 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 年产水量也最小, 仅占区域总产水量的 8.8%。; 西河子流域的面积仅占总流域面积的 18.1%, 但年总产水量在 5 个流域中最大, 年产水量占该区域总产水量的 31.1% (表 1)。由图 2 中可知, 定西市安定区产水量的空间分布差异较大, 西南部地区产水量较高, 中部和东部地区的产水量较低, 单位面积产水量最高的流域, 由于面积较小, 产水量占区域总产水量的比例并不高, 流域单位面积产水量与总产水量不具正相关性。水源涵养量较高的区域植被以草地、灌草地和林地为主, 此外, 地形地貌和人类活动对产水量也有影响, 西南部属低山浅山区, 温度较低, 年降雨量相对高于北部地区, 受人类活动干扰相对较少, 对产水和土壤水源涵养过程的影响较小, 而中部和东部地区是丘陵沟壑区, 多属耕地、荒草地、盐碱地和裸地, 年

降雨量相对较低,人类活动干扰较大,对产水和土壤水源涵养过程的影响较大。整体上产水量呈现为南高北低的分布格局。表明产水量的变化主要受植被、地貌和人类活动的影响较大。

表 1 定西市安定区 2017 年各流域产水量

Table 1 Water yield of each basin of Anding district of Dingxi city in 2017

| 流域 Basin | 面积/km ² Area | 单位面积平均 产水量/(m ³ /hm ²) Per unit area annual mean water yield | 年总产水量/(×10 ⁴ m ³) Total annual water yield | 占总产水量比例/% Percentage of total annual water yield |
|--------------------|----------------------------|--|--|--|
| 西巩河 Xigong Rive | 732.09 | 50.54 | 3700 | 10.9 |
| 西河 Xi Rive | 658.89 | 162.26 | 10600 | 31.1 |
| 东河 Dong Rive | 715.89 | 100.6 | 6900 | 20.2 |
| 称钩河 Chenggou Rive | 235.07 | 134.42 | 3000 | 8.8 |
| 关川河 Guanchuan Rive | 1296.77 | 74.03 | 9600 | 28.2 |
| 总计 Total | 3638.71 | — | 34100 | — |

3.2 水源涵养功能空间分布特征

(1) 水源涵养量评估

利用公式(5)—(6)计算出定西市安定区 2017 年基于栅格单元的水源涵养量介于 0—364.541 mm 之间,流域单位面积平均年水源涵养量 36.37 m³/hm²,水源涵养总量为 11900×10⁴ m³。

西河流域单位面积平均年水源涵养量最高,达 54.64 m³/hm²,西巩河流域最低,只有 17.58 mm,仅为西河流域的 32.2%。西河流域水源涵养总量最高,达 3500×10⁴ m³,占区域总水源涵养量的 29.41%;称钩河流域虽然单位面积平均年水源涵养量较高,但由于面积较小,故水源涵养总量最低,只有 1100×10⁴ m³,仅占区域总水源涵养量的 9.24%(图 3)。由于地理位置、气候条件、植被结构在空间上存在差异,水源涵养也表现出明显的差别。由图 4 可知,定西市安定区水源涵养功能在空间上呈由西南向东北逐渐减少的特征,水源涵养量与产水量在空间分布态势上基本一致。从图 2 与图 3 的对比分析,水源涵养量减少最大的是关川河流域,与产水量相比下降了 37%,减少最小的是西河流域,下降了 33%。表明在干旱半干旱地区植被覆盖率低的区域,土壤水分蒸发大,水源涵养能力低,而植被覆盖率高的区域,水源涵养能力高。但这些区域主要以草地、灌草地和林地为主,地上地下生物量大,对水分的消耗也大。因此,该地区水源涵养的分布格局与地形地貌、气候条件、植被覆盖度、植被结构和人类活动密切相关。

3.3 水源涵养功能冷热点空间分布特征

3.3 水源涵养功能冷热点空间分布特征

利用公式(7)—(8)计算定西市安定区水源涵养功能的 $Z(G_i^*)$ 值,并根据划分规则,识别出该区水源涵养功能的冷热点在空间上的聚集情况。统计分析表明,定西市安定区水源涵养功能冷热点区域占该区总面积的比例分别为:极显著热点 10.53%、显著热点 5.51%、热点 4.08%、极显著冷点 8.14%、显著冷点 13.7%、冷点 5.62%、非显著点 52.42%。非显著点占总面积的一半以上,冷点区面积高于热点区面积。由图 5 可知,水源涵养的热点区主要集中分布于西河、东河和关川河流域,所占面积占总面积的比例达 20.12%。该区域植被类型

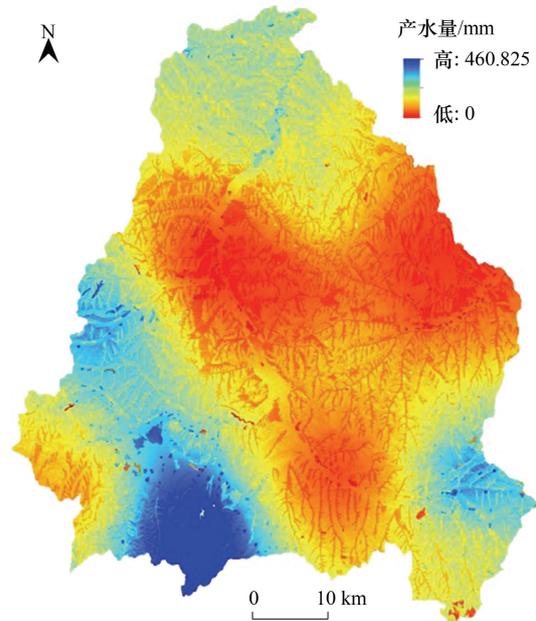


图 2 定西市安定区 2017 年产水量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of water yield of Anding district of Dingxi city in 2017

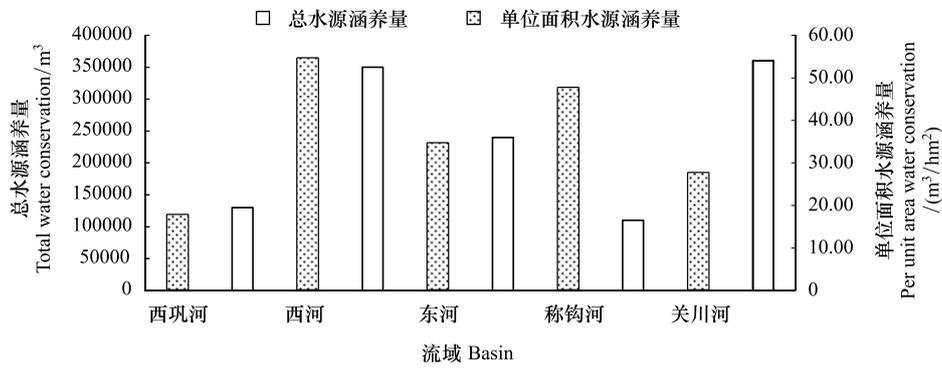


图 3 定西市安定区 2017 年各流域水源涵养功能变化

Fig.3 Changes of water conservation function of each basin of Anding district of Dingxi city in 2017

以草地和灌草地为主,植被覆盖良好,有利于抑制径流,具有较好的水源涵养功能。冷点区主要集中分布于西巩河流域,所占面积占总面积的比例达 27.46%。该区域植被类型以耕地和未利用土地为主。总体上,定西市安定区水源涵养的热点区主要集中在南部地区,冷点区主要集中在中部地区,冷热点分布格局呈现与降水和植被覆盖度一致性的分布特征。

3.4 水源涵养功能的重要性等级划分

为了揭示水源涵养重要性特征,运用 ArcGIS 将水源涵养功能进行空间叠置分析,运用 Geometrical interval(几何间隔)的原理,将定西市安定区的水源涵养功能划分为一般重要、较重要、中等重要、高度重要和极重要五个等级。分级结果为:一般重要区、较重要区、中等重要区、高度重要和极重要区面积分别为 116007 hm²、31674 hm²、91054 hm²、119309 hm²和 5 825 hm²,分别占总面积的 31.88%、8.71%、25.02%、32.79%和 1.60%。

由图 6 可知,定西市安定区水源涵养高度重要区的面积最大,主要分布在关川河流域沿岸的周围地区,土地利用类型以耕地为主,属水源涵养的冷点区,植被结构单一,植被覆盖度较低,水土流失严重,受人类活动影响较大,是退耕还林重点治理区域,水源涵养功能较弱,作为该地区水源涵养的重要生态区,需要优化现有的植被结构,提高植被覆盖度,提升水源涵养功能。一般重要区和较重要区属水源涵养的热点区,主要分布在海拔较低的西河和称钩河流域,是天然草地和人工灌草地的主要分布区,但草地退化较为严重,需要加强退化草地恢复力度,进一步提升草地水源涵养能力。

4 结论与讨论

本研究基于 InVEST 模型评估了定西市安定区 2017 年的水源涵养功能,分析了其空间格局及冷热点和重要性分布特征,得出以下主要结论:

- (1)定西市安定区单位面积平均年水源涵养量为 36.37 m³ hm⁻²,水源涵养总量为 11900×10⁴ m³,西河流

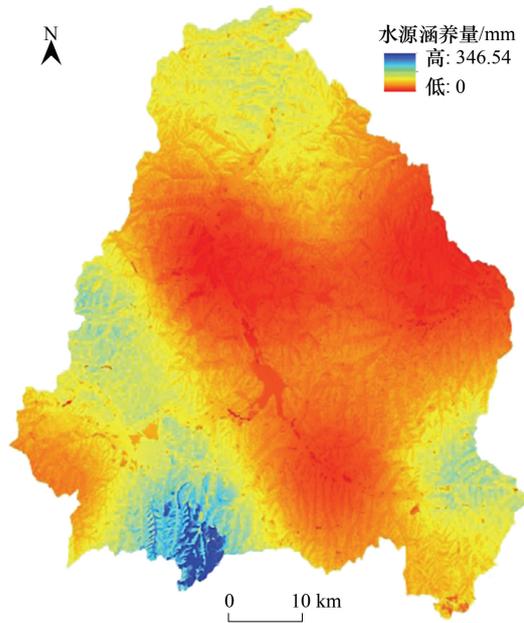


图 4 定西市安定区 2017 年安定区水源涵养功能空间分布

Fig.4 Spatial distribution of water conservation function of Anding district of Dingxi city in 2017

域水源涵养量最高,达 $3500 \times 10^4 \text{ m}^3$,占该区总水源涵养量的 29.41%。该区水源涵养功能在空间分布上呈由西南向东北逐渐减少的特征,其分布格局与地形地貌、气候条件、植被覆盖度、植被结构和人类活动密切相关。

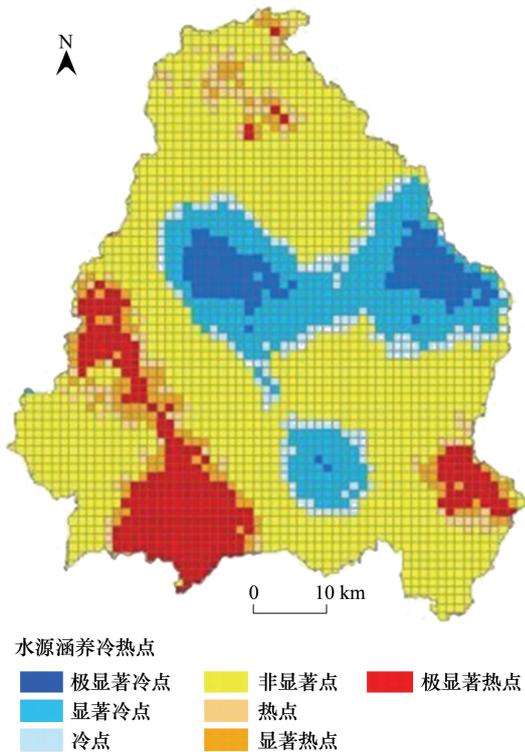


图 5 定西市安定区 2017 年水源涵养冷热点空间分布
Fig.5 Spatial distribution of cold hot spots of water conservation of An Ding district of Dingxi city in 2017

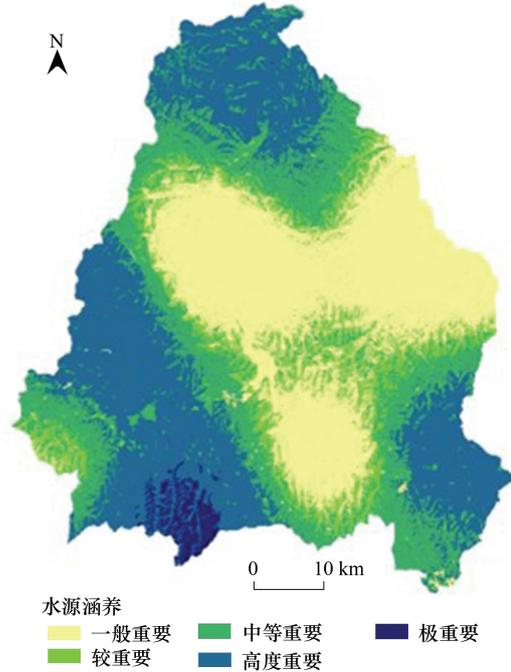


图 6 定西市安定区 2017 年水源涵养重要性分布
Fig.6 Spatial distribution of importance of water conservation of An Ding district of Dingxi city in 2017

(2)定西市安定区水源涵养功能的热点区域主要集中分布在南部地区,所占面积占该区总面积的 20.12%;冷点区主要集中在中部地区,所占面积占该区总面积的 27.46%;非显著点面积占该区总面积的 50% 以上。冷热点分布格局呈现与降水和植被覆盖度一致性的分布特征。

(3)定西市安定区水源涵养高度重要和极重要区面积占该区总面积的 34.39%,主要分布在关川河流域,属水源涵养的冷点区;一般重要区和较重要区面积占该区总面积的 40.59%,主要分布在海拔较低的西河和称钩河流域,属水源涵养的热点区,这些区域是该地区重要的水源涵养区,需要纳入政策重点和优先保护的区域,优化现有的植被结构,提高植被覆盖度,以提升水源涵养功能。

本研究结果表明 2017 年定西市安定区单位面积平均年水源涵养量达 $36.37 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$,与黄土高原其他地区采用相同方法研究的结果有较大的差异。如包玉斌等对 2010 年延安市和榆林市水源涵养量的评估值在 $150\text{--}200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间^[9],其主要原因,一方面是评估数据来源的差异造成的,包玉斌等的研究数据来源于面上数据,而本研究数据主要来源于研究区的定点采样数据,且时序上存在差异,植被状况发生了一定的变化。另一方面是不同区域的气候、植被结构、植被恢复年限、和土壤状况有一定的差异。本研究区植被以草地和灌草地为主,占总土地面积的 64%,耕地占 33%。由于近些年来该区域大面积种植高耗水的苜蓿,加之以柠条为主的灌木处于生命周期的成熟期,植物耗水量较大,导致水源涵养量减少^[28]。一些研究也表明在黄土高原地区随着植被覆盖度提高和林、灌、草成分的增加,植被的生态需水量增加,土壤含水量出现下降的趋势,涵养水量的损耗加大^[5,9-10]。表明植被结构和人为干扰对水源涵养具有较大的影响,这些研究也佐证了本研究的结果。因此,优化植被结构,减少耕地,选择低耗水的牧草和灌木品种是黄土高原丘陵区恢复生态和提高水源

涵养能力的重要研究内容。

本研究通过水源涵养量评估,利用空间统计方法识别该区域水源涵养功能的冷热点空间分布格局,明确水源涵养功能的强弱分布,客观认识不同植被类型水源涵养量的差异具有重要价值。热点区要求水源涵养量具有高值,在该地区水源涵养的热点区主要分布在以草地、灌草地和林地为主的畜牧业生产区域,是退耕还林还草工程实施的主要区域,海拔相对较高、气温低、耕地少,人为活动影响较小,其空间分布具有随沿河流分布的特征和地形和植被效应^[8,29]。而冷点区是水源涵养量的低区域,主要分布在海拔相对较低、地势较为平坦、以农业生产为主和人为干扰较大的地区。通过冷热点分析,对水源涵养功能进行重要性分级和空间分区,确定水源涵养优先和重点保护的区域,为区域生态保护和水源涵养管理提供科学指导。水源涵养高度重要区和极重要区围绕着热点区进行分布,是该区域水源涵养的重要生态区和主要产水区,降水较为丰富、地表水系较发达、植被覆盖较好,具有较好的导水性能、拦蓄降水和调节径流的能力,涵养水分能力较强^[30]。因此,维护草地、灌草地和林地的稳定与健康,加强对水源涵养高度重要区和极重要区的保护,同时,加强冷点区植被恢复力度,提升发挥水源涵养功能,将有利于整体提高区域生态服务水平^[31]。由于定西市安定区属典型的黄土高原丘陵区沟壑区,地势起伏较大,水源涵养功能的空间分布呈现异常性,需要进一步开展水源涵养功能空间异常点的深入分析与研究,以揭示其空间变化的特殊规律^[2]。本项研究对客观认识该地区水源涵养功能,优化土地利用结构,确定水源涵养的重要保护区域,综合考虑生态系统水分利用效率,提升水源涵养功能,实现可持续发展具有重要意义。

InVEST 模型在国内外被应用于各类政府和机构的区域规划和区域多种服务功能的综合性评价与空间格局测度分析中^[15]。本研究基于 InVEST 模型对黄土高原丘陵区水源涵养功能的空间化评估,并对其冷热点和重要性分级,其结果具有一定的科学性与合理性,研究结果验证了 InVEST 模型在黄土高原丘陵区的适应性^[1]。但由于流域生态系统结构的复杂性和多样性,在利用 InVEST 模型对水源涵养功能进行评估时,模型中一些生物物理参数是以土地利用类型为基本单元确定的,评估结果的精度不高,在未来的研究中要考虑流域上下游的水资源关系、地表水与地下水进行区分及人类直接消耗的水分,对模型的本地化和参数验证方面进一步加强研究。

参考文献 (References):

- [1] 孙文义,邵全琴,刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. 自然资源学报, 2014,29(3):365-376.
- [2] 龚诗涵,肖洋,郑华,肖燧,欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报,2017,37(7):2455-2462.
- [3] 张瑜,赵晓丽,左丽君,张增祥,汪潇. 黄土高原生态系统服务价值动态评估与分析. 水土保持研究,2018,25(3):170-176.
- [4] 刘国彬,上官周平,姚文艺,杨勤科,赵敏娟,党小虎,郭明航,王国梁,王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [5] 王雅舒,李小雁,石芳忠,张树磊,吴秀臣. 退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发. 科学通报,2019,64(5/6):588-599.
- [6] 李双双,延军平,万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. 地理学报,2012,67(7):960-970.
- [7] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, 2013,101: 119-128.
- [8] 李晶,任志远. 陕北黄土高原生态系统涵养水源价值的时空变化. 生态学杂志,2008,27(2):240-244.
- [9] 包玉斌,李婷,柳辉,马涛,王怀香,刘康,沈茜,刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. 地理研究,2016,35(4):664-676.
- [10] 王超,甄霖. 宁夏固原市森林水源涵养功能时空动态研究. 湖南生态科学学报,2016,3(4):1-9.
- [11] 冯磊,王治国,孙保平,张超,赵岩,钟晓娟. 黄土高原水土保持功能的重要性评价与分区. 中国水土保持科学,2012,10(4):16-21.
- [12] 马琳,刘浩,彭建,吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报,2017,72(7):1277-1289.
- [13] Bai Y, Zheng H, Ouyang Z Y, Zhuang C W, Jiang B. Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: a case study in Baiyangdian watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013,70(2):709-718.
- [14] 李婷,吕一河. 生态系统服务建模技术研究进展. 生态学报,2018,38(15):5287-5296.
- [15] 唐尧,祝炜平,张慧,宋瑜. InVEST 模型原理及其应用研究进展. 生态科学, 2015, 34(3): 204-208.

- [16] 王蓓,赵军,胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. 生态学杂志,2016,35(10):2783-2792.
- [17] 莫保儒,蔡国军,赵廷宁,王俊杰,柴春山,王子婷. 甘肃半干旱黄土丘陵沟壑区人工植被土壤水分研究. 水土保持研究,2009,16(6):125-128.
- [18] 魏静. 定西市生态文明建设现状及对策研究. 甘肃农业,2014,(17):52-54.
- [19] 刘彬彬,邸利,马晓燕,王乐,邢铁兰. 定西市安定区不同水土保持措施结构下综合效益评价. 水土保持研究,2014,21(3):152-156.
- [20] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Sharp R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Griffin R, Hamel P, Chaplin-Kramer R. InVEST 2.6.0 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project,2013: 24-49,233-250.
- [21] 张宏锋,袁素芬. 东江流域森林水源涵养功能空间格局评价. 生态学报,2016,36(24):8120-8127.
- [22] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver T H, Bullock J M. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. Science of the Total Environment,2016,569-570: 1418-1426.
- [23] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis,1992,24(3):189-206.
- [24] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resources Research,2001,37(3):701-708.
- [25] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,孔凌霄,周巧稚,张渲东. 黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价. 水土保持学报,2019,33(2):251-257.
- [26] Zhou W Z, Liu G H, Pan J J, Feng X F. Distribution of available soil water capacity in China. Journal of Geographical Sciences, 2005,15(1):3-12.
- [27] 党虹,葛丽娟,赵传燕,戚继阳,赵宇豪. 基于 InVEST 模型的称钩河流域土壤保持功能研究. 兰州大学学报:自然科学版,2018,54(5):633-639.
- [28] 杨磊,卫伟,莫保儒,陈利顶. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺. 生态学报,2011,31(11):3060-3068.
- [29] 兰志龙,潘小莲,赵英,司炳成,汪有科,焦瑞,张建国. 黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响. 应用生态学报,2017,28(3):847-855.
- [30] 赵宏飞,何洪鸣,白春昱,张闯娟. 黄土高原土地利用变化特征及其环境效应. 中国土地科学,2018,32(7):49-57.
- [31] 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.