

基于InVEST模型的张承地区水源涵养功能时空变化特征

马靖宣, 金晓媚, 张绪财, 殷秀兰, 金爱芳

Spatio-temporal change characteristics of water conservation function in the Zhang-Cheng district based on the InVEST model

MA Jingxuan, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, YIN Xiulan, and JIN Aifang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自组织神经网络的污染场地多监测指标相关性分析

Correlation analysis of multiple monitoring indicators of contaminated site based on self-organizing map

马春龙, 施小清, 许伟伟, 任静华, 王佩, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 191-202

基于主成分分析法的Q2黄土湿陷特性研究

A study of the collapsibility of Q2 loess based on principal component analysis

王玉涛, 刘小平, 曹晓毅 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 141-148

高寒阴湿区边坡浅层土体湿响应规律研究

The response regularity of temperature and humidity of surface soil on slopes in high-cold and humid areas

孙巍锋, 常洲, 兰恒星, 晏长根, 杨万里, 徐伟 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 204-213

承德地区天然含锶矿泉水空间分布及特征分析

Distribution and characterization analyses of strontium-bearing mineral spring water in the Chengde region

朱雪芹, 刘文波, 李志明, 陈坦, 任玉祥, 邵海, 王龙凤 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 65-73

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208084

马靖宣, 金晓媚, 张绪财, 等. 基于 InVEST 模型的张承地区水源涵养功能时空变化特征 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 54-64.

MA Jingxuan, JIN Xiaomei, ZHANG Xucui, *et al.* Spatio-temporal change characteristics of water conservation function in the Zhang-Cheng district based on the InVEST model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 54-64.

基于 InVEST 模型的张承地区水源 涵养功能时空变化特征

马靖宣¹, 金晓媚¹, 张绪财¹, 殷秀兰², 金爱芳²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 水源涵养作为重要的生态系统服务功能之一, 对张家口和承德地区的生态系统及用水安全有着重要的意义。为了改进以往研究中地形及土壤渗透性等考虑不足、对数据空间异质性分析不充分等问题, 文章基于生态系统服务和权衡的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs, InVEST), 使用多种高精度的遥感、再分析数据等产品, 对 2001—2020 年张承地区的水源涵养功能进行量化评价及驱动因素分析。研究发现, 2001—2020 年张承地区水源涵养功能空间分布上呈现坝下高坝上低的特点, 各年水源涵养功能的空间分布存在差异性的同时也具有一定的相似性。时间变化上, 20 年间水源涵养深度以 -0.08 mm/a 的平均速率呈下降波动趋势。结合 Sen+Mann-Kendall 分析发现区内水源涵养功能变化趋势以“基本不变”、“轻微增长”、“轻微降低”三者为主, 总占比近 98%。区内降水量对水源涵养功能具有很强的显著正相关关系, 气温对水源涵养功能在部分地区具有显著负相关关系, 植被与水源涵养功能的关系相对复杂。张承地区 2020 年林地的水源涵养功能最强, 水源涵养深度达 28.64 mm, 总量而言, 草地水源涵养功能的贡献最大, 水源涵养量达 $1.12\times 10^9\text{ m}^3$ 。20 年间变化中, 耕地水源涵养量的降低最为明显, 变化速率达 $-6.49\times 10^6\text{ m}^3/\text{a}$ 。上述结果说明张承地区 20 年间水源涵养功能的时空特征主要受到降水量与植被型土地利用的控制。研究为张承地区生态建设及水资源管理提供重要的决策依据。

关键词: 水源涵养功能; InVEST 模型; Sen+Mann-Kendall; 相关性分析; 张承地区

中图分类号: P641.8;P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0054-11

Spatio-temporal change characteristics of water conservation function in the Zhang-Cheng district based on the InVEST model

MA Jingxuan¹, JIN Xiaomei¹, ZHANG Xucui¹, YIN Xiulan², JIN Aifang²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083,

China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: As one of the important ecosystem service functions, water conservation function is of great significance to the ecosystem and water safety in the Zhangjiakou and Chengde districts. Based on the integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs (InVEST) model, this study quantitatively evaluates the water

收稿日期: 2022-08-17; 修订日期: 2022-09-16

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372250); 行政事业类专项项目(121201014000150003)

第一作者: 马靖宣(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文地质与水环境遥感等研究。E-mail: mjx_1998@163.com

通讯作者: 金晓媚(1968-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文地质与水环境遥感等研究。E-mail: jinxm@cugb.edu.cn

conservation function and analyses its driving factors of the Zhang-Cheng district from 2001 to 2020 using high-quality remote sensing data and other reanalysis products, in order to improve the problems of insufficient consideration of topography and soil permeability, as well as the inadequate analyses of data spatial heterogeneity in previous studies. The results show that the spatial distribution of the water conservation function in the Zhang-Cheng district from 2001 to 2020 was characterized by high values in the Baxia areas and low values in the Bashang areas. Despite some differences, the spatial distribution of the water conservation function in each year had some similarities to some extent. In terms of the trend, the water conservation depth in these 20 years showed a fluctuating downward trend with an average rate of -0.08 mm/a. Combined with the Sen+Mann-Kendall analysis, the trend of the water conservation function in this area was mainly classified as "No trend", "Slight increase" and "Slight decrease", accounting for nearly 98% of the total area. The results of correlation analysis show that precipitation had a strongly significantly positive correlation with water conservation function, temperature had a significantly negative correlation with water conservation function in some areas, and the correlation between vegetation and water conservation function was complex. In the Zhang-Cheng district in 2020, the woodland had the strongest water conservation function, and the water conservation depth reached 28.64 mm. On the other hand, the grassland water conservation function had the greatest contribution in the total amount, and the water conservation reached 1.12×10^9 m³. During these 20 years, the water conservation of the farmland had the most obvious decrease, with a rate of -6.49×10^6 m³/a. The spatio-temporal change characteristics of water conservation function in the Zhang-Cheng district in these 20 years were mainly controlled by precipitation and vegetated land use. This study provides an important decision-making basis for ecological construction and water resources management in the Zhangcheng district.

Keywords: water conservation function; InVEST model; Sen+Mann-Kendall; correlation analysis; Zhang-Cheng district

水源涵养是指在一定时空范围内,生态系统通过林冠层、枯落物层、土壤层及地表水体等对大气降水进行截留、下渗及贮存等过程,将水分充分保持在系统中并能够满足系统内外水资源需求的过程与能力^[1]。水源涵养功能与气候因素、下垫面条件、人类活动等有着密切的联系^[2],并在生态系统与流域水循环中发挥着水源供给、调节径流、水土保持等重要作用。随着遥感技术(RS)、地理信息系统技术(GIS)及计算机技术在生态水文研究过程中的广泛应用,水源涵养功能的评价方法逐渐转向以生态系统服务和权衡的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs, InVEST)^[3-5]、水土评价工具(soil and water assessment tool, SWAT)^[6-7]、元胞自动机^[8]、Terrain Lab^[9]等为代表的综合模型评估阶段。其中,由斯坦福大学及世界自然基金会(World Wide Fund For Nature, WWF)等联合开发的 InVEST 模型具有模拟准确度较高、参数率定灵活、空间表达性强等优势,已被国内外诸多学者广泛应用于欧洲^[10]、美洲^[11],以及国内的黄河流域^[12]、丹江流域^[4]、黄土高原^[13]等多个地区的水源涵养功能评估中。

张家口—承德地区(以下简称“张承地区”)位于北京以北地区,是京津冀的生态屏障和重要水源涵养区,对区域性水土保持与生态环境的改善起重要作用。由于其经济发展相对较为缓慢,生态贫困问题较为突出,诸如水源涵养等生态系统的服务功能正发生改变,引发了新的生态环境问题^[14]。因此,研究张承地区水源涵养功能对保障京津冀生态和用水安全具有重要意义。目前虽已有一些研究基于 InVEST 模型分析了张承地区的水源涵养功能^[14-17],但其中一些研究未考虑地形、土壤渗透性等因素的作用^[14, 16],所得的结果可能会存在较大的偏差;一些研究所选择的模型输入数据精度较低^[15, 17],对研究区的空间异质性考虑不够充分;有的研究仅在子流域级别上进行水源涵养功能的评价^[16],难以体现出其在像元尺度上的空间分布特征。前人对张承地区水源涵养功能的研究相对薄弱,对其时空动态变化的精确评估及其多种驱动因素的分析仍存在不足。为此,本研究运用 RS、GIS 等技术,使用遥感、再分析数据等多种高精度数据产品,基于 InVEST 模型,同时考虑地形、土壤渗透性等因素对结果的修正,对张承地区 2001—2020 年水源涵

养功能进行定量化评价,并分析气象、植被及土地利用方式对水源涵养功能的影响。研究结果为张承地区水源涵养功能进一步的研究奠定了基础,同时为张承地区生态建设及水资源管理等决策提供了重要依据。

1 研究区概况

张承地区位于河北省北部,总面积约 76 276.8 km²,包含张家口市的 6 个区与 10 个县及承德市的 3 个区与 8 个县,见图 1(a)。区内阴山山脉横贯而过,坝上与坝下的自然地理特征存在很大差异。坝上高原年均气温-1~2℃,年均降水量 300~400 mm;坝下地区

由于受地形和纬度的控制,气温由南向北逐渐降低,年均气温 5~9℃,年均降水量 400~600 mm^[18]。区内水资源分布不均。张家口市气候干旱,地表水资源匮乏,且地下水超采严重;而承德市水资源相对丰富,是京津冀地区的重要水源地。区内植被种类繁多,其中张家口市以农用地为主,包括农田、林地、草地等;而承德市林地分布广泛,植被覆盖相较于张家口市更高,见图 1(b)。由于研究区地处森林—草原过渡带,毗邻农牧交错区,是京津冀的生态屏障和重要水源涵养区,其对周边地区的生态环境改善、水资源保护、用水安全等均发挥着不可替代的作用。

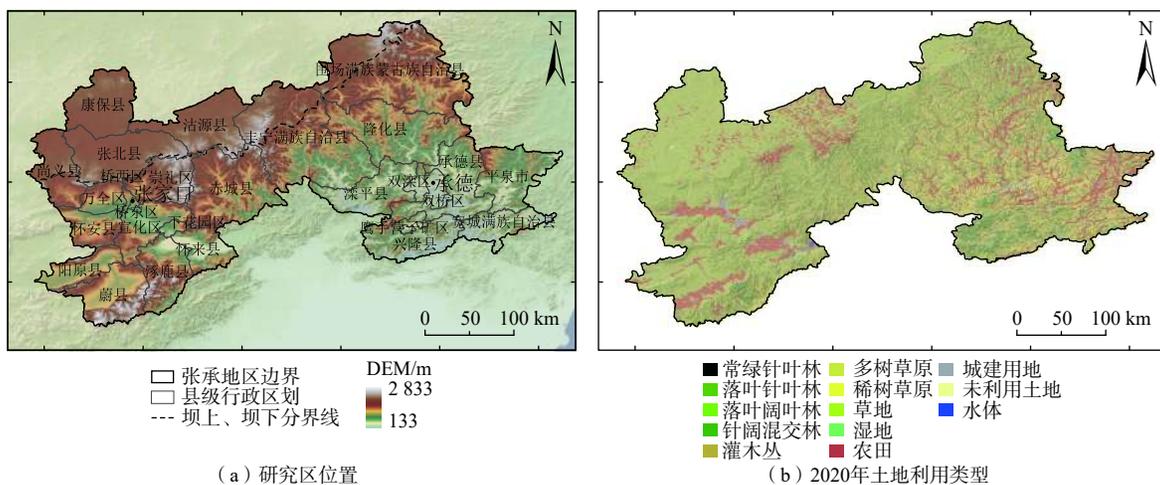


图 1 张承地区位置及 2020 年土地利用类型

Fig. 1 Administrative division and land use in 2020 of the Zhang-Cheng district

2 数据与方法

2.1 研究方法

2.1.1 产水量模型

本研究产水量的计算基于 InVEST 的年产水量模型。该模型主要基于 Budyko 理论与水量平衡原理,针对像元 x 确定其产水量 Y_x 为:

$$Y_x = P_x - E_{a,x} = \left(1 - \frac{E_{a,x}}{P_x}\right) \cdot P_x \quad (1)$$

式中: $E_{a,x}$ ——年实际蒸散量/mm;

P_x ——年降水量/mm。

对于植被类型的像元,根据 Budyko 曲线与傅抱璞

公式^[19-20],式(1)中的 $\frac{E_{a,x}}{P_x}$ 可表示为:

$$\frac{E_{a,x}}{P_x} = 1 + \frac{E_{p,x}}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{E_{p,x}}{P_x}\right)^{\omega_x}\right]^{\frac{1}{\omega_x}} \quad (2)$$

$$E_{p,x} = K_{c,l_x} \cdot E_{r,x} \quad (3)$$

$$\omega_x = Z_c \frac{\theta_x}{P_x} + 1.25 \quad (4)$$

$$\theta_x = \min(d_{root,x}, d_{layer,x}) \cdot \theta_{plant,x} \quad (5)$$

式中: $E_{p,x}$ ——潜在蒸散量/mm;

$E_{r,x}$ ——参考蒸散量/mm;

K_{c,l_x} ——土地利用 l_x 的蒸散系数;

ω_x ——表征自然气候—土壤特性的非物理参数;

Z_c ——Zhang 系数^[21],也称季节常数;

θ_x ——植物单位体积可利用水分含量/mm;

$d_{root,x}$ ——植物根系深度/mm;

$d_{layer,x}$ ——植物根系层限制深度/mm;

$\theta_{plant,x}$ ——植物可利用水分容量。

对于非植被类型的像元,式(1)中的实际蒸散量 $E_{a,x}$ 认为受限于其水量与蒸散能力^[22],可表示为:

$$E_{a,x} = \min(K_{c,l_x} \cdot E_{r,x}, P_x) \quad (6)$$

式中: K_{c,l_x} ——土地利用 l_x 的蒸散系数;

$E_{r,x}$ ——参考蒸散量/mm;

P_x ——年降水量/mm。

2.1.2 水源涵养量计算

由于下垫面的影响, 诸多研究表明^[4, 15, 23-26], 需要结合地形指数、土壤饱和导水率、流速系数对 InVEST 模型计算的产水量进行修正以得到水源涵养量。其修正方法为:

$$C_x = \min\left(1, \frac{249}{V_{L_x}}\right) \times \min(1, 0.3 \times T_x) \times \min\left(1, \frac{K_{\text{sat},x}}{300}\right) \times Y_x \quad (7)$$

$$T_x = \lg\left(\frac{A_{\text{drainage},x}}{d_{\text{soil},x} \cdot S_{\text{percent},x}}\right) \quad (8)$$

式中: C_x ——水源涵养量/mm;

Y_x ——InVEST 模型计算得到的产水量/mm;

V_{L_x} ——土地利用 L_x 的流速系数;

$K_{\text{sat},x}$ ——土壤饱和导水率/(mm·d⁻¹);

T_x ——地形指数;

$A_{\text{drainage},x}$ ——区域汇水量;

$d_{\text{soil},x}$ ——土壤厚度/mm;

$S_{\text{percent},x}$ ——百分比坡度。

2.1.3 Sen+Mann-Kendall 趋势分析法

Sen+Mann-Kendall 趋势分析法为 Sen's slope 估计与 Mann-Kendall 趋势检验相结合的一种统计学方法, 目前已被用于生态、水文、遥感等多个领域的研究^[27-31]。其算法如下:

对于时间序列 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$, Sen's slope 估计值 β 为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \quad 1 < i < j < n \quad (9)$$

当 β 为正时, 表示该序列呈上升趋势; 当 β 为负时, 表示该序列呈下降趋势。 β 的绝对值大小能够表征序列变化的剧烈程度。

对其显著性检验的 Mann-Kendall 检验方法如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (11)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (12)$$

式中: m ——序列中重复出现的数据组个数;

t_i ——第 i 个重复数据组中重复数据的个数。

当 $n < 10$ 时, 直接使用统计量 S 进行双边趋势检验; 当 $n \geq 10$ 时, 统计量 S 近似服从标准正态分布, 使用统计量 Z 进行趋势检验。在给定的显著性水平 α 下, 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时, 认为序列中存在显著的变化趋势, 反之则不具有显著变化趋势。

2.1.4 相关性分析

在探究变量与变量之间的相互关系时, 常对 2 个变量进行相关性分析, 并以相关系数衡量 2 个变量之间的相关关系的密切程度。本研究采用 Pearson 相关系数表征相关性强弱。Pearson 相关系数又称 Pearson 积矩相关系数, 其定义为 2 个变量之间的协方差与其标准差之积的商:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

式中: x_i, y_i ——2 个变量总体中的样本;

\bar{x}, \bar{y} ——2 个变量总体的均值;

n ——变量的样本总数;

r ——Pearson 相关系数。

r 值介于 -1 与 1 之间。 r 为正值反映 2 个变量呈正相关关系; r 为负值反映 2 个变量呈负相关关系。 r 的绝对值大小表征 2 个变量间相关性的强弱。

2.2 数据来源与预处理

研究使用的年均降水量数据、年均气温数据均来自欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的 ERA5-Land 再分析产品^[32]; 植物根系层限制深度数据可近似由土壤厚度数据代替^[22], 其与植物可利用水分容量数据均由国际土壤参考和信息中心 (International Soil Reference and Information Centre, ISRIC) 提供^[33], 其中植物可利用水分容量数据依据各层土壤水分容量进行加权平均获得; 土壤饱和导水率数据使用 Zhang 等^[34] 研发的高分辨率全球土壤水力性质产品; 年均参考蒸散量数据、土地利用类型数据与归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据分别来自中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 的 MOD16A2、MCD12Q1 与 MOD13A1 产品, 其中 NDVI 选择各年生长季 (6—9 月) 的数据; 地表高程数据来自美国航天飞机雷达地形测绘任务 (shuttle radar topography mission, SRTM) 的数字高程

模型(digital elevation model, DEM)数据。数据的分辨率等信息见表 1。

表 1 参数栅格数据信息
Table 1 Raster data information

参数栅格数据	数据来源	原始空间分辨率/m	原始时间分辨率
降水量	ERA5-Land再分析产品 ^[32]	11 132	月
气温	ERA5-Land再分析产品 ^[32]	11 132	月
土壤厚度	ISRIC数据产品 ^[33]	250	静态数据
植物可利用水分容量	ISRIC数据产品 ^[33]	250	静态数据
土壤饱和导水率	Zhang等 ^[34]	1 000	静态数据
参考蒸散量	MOD16A2产品	500	8 d
土地利用类型	MCD12Q1产品	500	年
NDVI	MOD13A1产品	500	16 d
地表高程	SRTM DEM产品	90	静态数据

所有数据经重采样、空缺值填补及必要的计算等,通过 Python 编程完成预处理过程。对于所有栅格数据均使用双线性插值算法重采样至 500 m 并裁剪至研究区范围;对于时序栅格数据进行平均值合成至年尺度;针对存在空缺值的栅格数据,采用 K 近邻(K-nearest neighbor, KNN)插值等算法,基于时空邻近像元值进行填补。其中,ERA5-Land、MODIS 及 DEM 数据的部分预处理与下载基于 Google Earth Engine(GEE)云平台的 Python 应用程序接口(API)实现。

2.3 模型参数确定

InVEST 模型及水源涵养计算过程中所需的根系深度、蒸散系数、流速系数根据相关文献[12, 23, 25, 35-36]确定(表 2)。季节常数 Z 是通过构建模型产水深度与相应年水资源公报中单位面积水资源总量的残差平方和 RSS 为目标函数的最优化模型,以偶数年为率定期所得。经 Python 迭代试算后得到 0.01 精度范围内的 Z 最优值为 2.83。

3 结果

3.1 水源涵养功能空间分布特征

基于 InVEST 模型计算得到的张承地区 2001—2020 年水源涵养功能的空间分布以水源涵养深度的形式呈现于图 2 中。作为水源涵养功能的量化指标,图 2 水源涵养深度能够很好表征单位面积上水源涵养量的大小,进而反映不同地区水源涵养功能的强弱^[1]。可以发现,张承地区水源涵养量大的区域主要集中于承德市,并于承德南部的兴隆县及鹰手营子矿区尤为集中。各年中水源涵养深度的空间分布虽有一定的差异,但总体上仍具有如下的分布规律:以阴山山脉

表 2 各土地利用类型参数

Table 2 Parameters for each land use

土地利用一级分类	土地利用类型	最大根系深度/mm	蒸散系数	流速系数
林地	常绿针叶林	7 000	1.00	200
	落叶针叶林	3 100	1.00	200
	落叶阔叶林	3 100	1.00	180
	针阔混交林	4 800	1.00	200
	灌木丛	2 000	0.90	249
草地	多树草原	2 600	0.85	300
	稀树草原	2 300	0.75	400
	草地	2 000	0.75	500
耕地	农田	1 500	0.80	400
	湿地	1 000	1.20	2 012
水域	水体	1	1.00	2 012
	城建用地	1	0.25	2 012
未利用土地	未利用土地	200	0.30	1 500

为界,在阴山山脉以南的坝下地区水源涵养量相对较高,而阴山山脉以北的坝上地区水源涵养量相对较低;张承地区的水源涵养量在承德南部、中部及西部的中低山地区、张家口东部及南部中高山地区常年出现高值,在张家口中部宣化—怀来一带的平原地区及西南部的平原地区常年出现低值。

3.2 水源涵养功能时间变化趋势

由于目前有关水源涵养的研究中对其空间分布讨论较多^[13, 23],对其年尺度的动态趋势变化讨论相对较少。因此,将基于计算结果进一步讨论其时间变化趋势。如图 3(a)所示,在 20 年尺度的变化上,研究区水源涵养深度呈现降低趋势,平均变化幅度为 -0.08 mm/a。20 年中水源涵养深度波动明显,在 2003 年,水源涵养深度达到 20 年中的最大值 45.12 mm,而在 2009 年降低至最低值 4.35 mm,是研究区水源涵养深度在此 20 年间下降明显的一次,平均下降幅度为 4.51 mm/a。

为进一步讨论研究区内不同地区水源涵养功能的变化趋势,使用 Sen+Mann-Kendall 方法对其进行分析。按显著性水平 α 为 0.05、变化斜率阈值为 0.1 mm/a 进行的 Mann-Kendall 检验及分级统计结果呈现于图 3(b)及表 3 中。水源涵养功能在研究区内以“基本不变”、“轻微增长”、“轻微降低”三者为主,其总面积占比近 98%,而呈“显著增长”与“显著降低”的区域分布面积很少,几乎仅在张家口的蔚县—涿鹿—怀来一带的零星地区呈现“显著增长”,在承德的平泉、滦平、宽城的零星地区呈现“显著降低”。结合不同变化趋势分级上的 Sen's slope 统计结果发现,研究区内“显著降低”与“轻微降低”地区水源涵养功能的平均降低幅度均分别超过区内“显著增长”与“轻微增长”地区水源涵

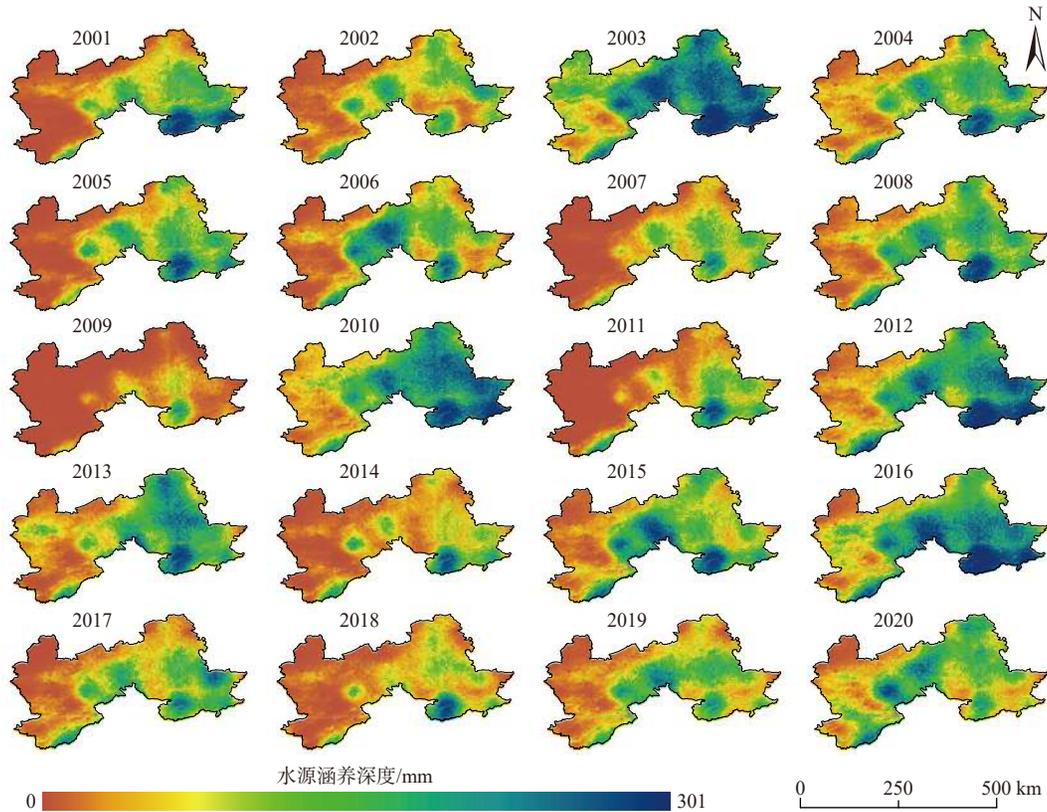


图 2 2001—2020 年张承地区水源涵养功能空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water conservation function in the Zhang-Cheng district from 2001 to 2020

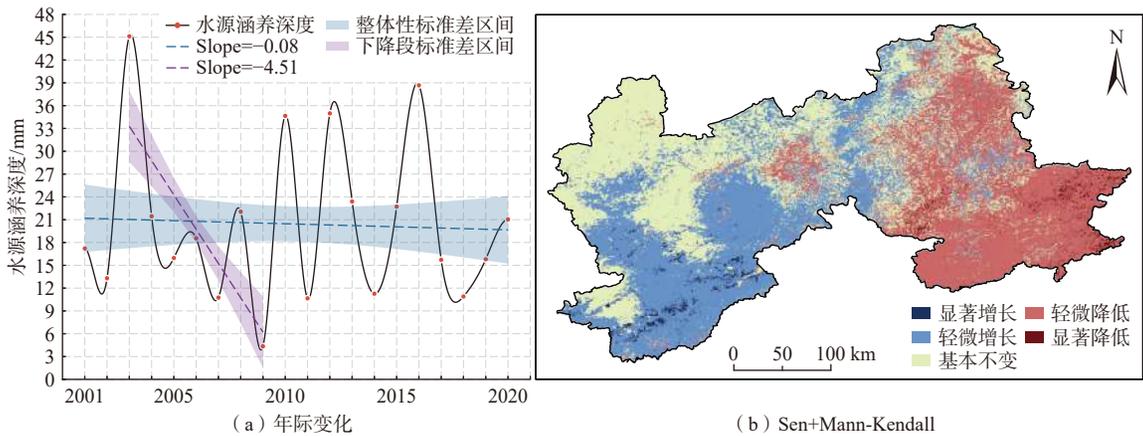


图 3 张承地区水源涵养功能年际变化趋势及 Sen+Mann-Kendall 变化分级

Fig. 3 Interannual trends of water conservation function and Sen+Mann-Kendall classification of change in the Zhang-Cheng district

养功能的平均增长幅度。

3.3 降水量、气温及植被对水源涵养功能的驱动作用
作为生态环境的重要因子, 降水量、气温与植被对区域水循环及流域生态水文过程有着重要的影响^[2, 37-39]。为探讨降水量、气温与植被对研究区水源涵养功能的驱动作用, 分别对其与研究得到的水源涵养深度进行像元尺度的 Pearson 相关分析, 其中使用

生长季的 *NDIT* 数据作为表征植被长势的指标。分析结果以相关系数的分布及相关性分级统计分别呈现于图 4 及表 4 中。

由结果可看出, 研究区降水量对水源涵养功能的驱动作用极为明显, 两者在全区 99.76% 的地区均呈现极显著的正相关关系, 并在张家口的赤城、承德的兴隆、丰宁等地的相关性极强。气温对水源涵养的驱

表 3 张承地区水源涵养功能变化趋势分级统计
Table 3 Classification statistics on the trends of water conservation function in the Zhang-Cheng district

Sen's slope	Z	变化趋势分级	面积占比/%	平均变化趋势/(mm·a ⁻¹)
$\beta > 0.1$	$ Z > 1.96$	显著增长	1.11	0.70
$\beta > 0.1$	$ Z \leq 1.96$	轻微增长	32.88	0.30
$ \beta \leq 0.1$	-	基本不变	35.10	0.01
$\beta < -0.1$	$ Z \leq 1.96$	轻微降低	29.87	-0.54
$\beta < -0.1$	$ Z > 1.96$	显著降低	1.04	-1.25

动作用在张家口西北部及阳原县部分地区、承德大部分地区呈现显著的负相关关系;在其余 42.95% 的地区相关性不显著。植被与水源涵养功能的相关性在区内以正相关居多,但两者的相关性仅在区内张家口的张北、怀安及蔚县—涿鹿—怀来一带等地的零星地区达到显著水平,其余 95.47% 的地区不显著。

3.4 土地利用对水源涵养功能的影响

为探究不同土地利用方式对张承地区水源涵养

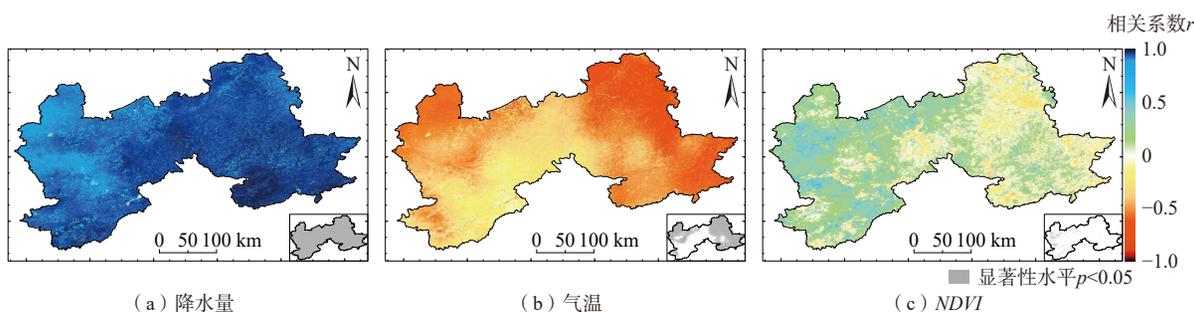


图 4 张承地区水源涵养功能与降水量、气温及 NDVI 的相关性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of correlations between water conservation function and precipitation, temperature and NDVI in the Zhang-Cheng district

表 4 张承地区水源涵养功能驱动因素相关性分级面积占比

Table 4 Classification area proportion of correlations between water conservation function and driving factors in the Zhang-Cheng district

驱动因素	正相关($r > 0$)		相关性不显著($p \geq 0.05$) 或不相关($r = 0$)	负相关($r < 0$)	
	极显著正相关($p \leq 0.01$)	显著正相关($0.01 < p < 0.05$)		显著负相关($0.01 < p < 0.05$)	极显著负相关($p \leq 0.01$)
降水	99.76	0.08	0.16	0.00	0.00
气温	0.00	0.00	42.95	31.12	25.92
NDVI	0.59	3.82	95.47	0.11	0.01

功能的影响,将区内 13 种土地利用类型按表 2 中的一级分类合并为林地、草地、耕地、水域、城建用地及未利用土地 6 大类,对 2020 年区内不同土地利用的水源涵养深度及 2001—2020 年不同土地利用的水源涵养量变化等进行统计,结果如图 5 及表 5 所示。从单位面积的水源涵养深度而言,研究区 2020 年水源涵养深度呈现林地>耕地>草地>城建用地>未利用土地>水域的规律,表明研究区林地的水源涵养功能最强,其水源涵养深度达 28.64 mm,水域的水源涵养功能最弱。同时也说明了研究区植被类型土地利用的水源涵养功能较非植被类型的更强。由于不同土地利用的面积差异,水源涵养总量上呈现草地>耕地>林地>城建用地>未利用土地>水域的规律,说明研究区草地的水源涵养功能对区内总水源涵养功能的贡献最大,其水源涵养量达 $1.12 \times 10^9 \text{ m}^3$,而水域的贡献最小,区内非植被类型的水源涵养功能的贡献远不及植被类型的

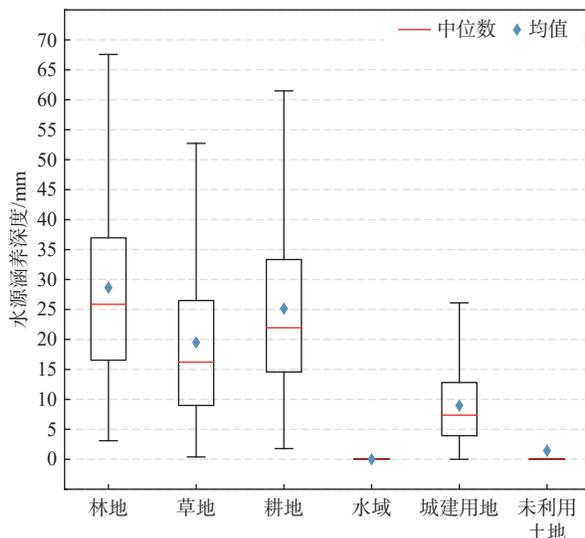


图 5 张承地区 2020 年不同土地利用的水源涵养深度
Fig. 5 Water conservation depth for different land uses in the Zhang-Cheng district in 2020

贡献。2020年的草地水源涵养量相较于2001年增长最为明显,增量达 $4.17 \times 10^8 \text{ m}^3$,但回归分析发现其在20年中整体呈现减少的变化趋势。回归结果同时表明,20年中耕地水源涵养量的减少趋势最为明显,变

化速率达 $-6.49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,而林地水源涵养整体呈增加趋势,其余非植被土地利用类型水源涵养量的整体变化均较小。

表5 张承地区不同土地利用的水源涵养功能及其变化

Table 5 Water conservation functions and changes in different land uses in the Zhang-Cheng district

土地利用	2020年水源涵养功能		2001—2020年变化		
	平均水源涵养深度/mm	水源涵养量/ (10^6 m^3)	面积/ km^2	水源涵养量/ (10^6 m^3)	水源涵养量回归趋势/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$
林地	28.64	199.09	2 266.68	-43.11	1.80
草地	19.49	1 119.97	-1 296.32	416.76	-1.53
耕地	25.16	280.20	-1 056.87	-85.42	-6.49
水域	0.00	0.00	18.21	0.00	0.00
城建用地	8.97	5.34	85.37	3.23	0.08
未利用土地	1.45	0.05	-17.07	0.03	0.00

4 讨论

相较于一些已有研究^[15, 17],本研究一方面在数据上选用多为成熟的遥感产品、再分析产品及一些学者研发的高精度数据产品(如降水量、气温、参考蒸散发、土壤饱和导水率、植物可利用水分容量数据产品),避免了使用气象站点数据插值或使用经验公式计算所带来的误差及不确定性。本研究在参数的赋值上针对13种土地利用类型,参考了多个研究、考虑了野外实际调研情况并使用水资源总量数据进行更严格准确的参数率定过程,从而体现了不同土地利用子类型中的参数差异,很大程度上增加了分析结果的空间表达与精度,是本研究的创新点所在。在水源涵养功能驱动因素的分析上,本研究对像元尺度的数据进行了分析,考虑了研究区地理空间上的差异性,能够阐明不同地区的驱动因素对水源涵养功能的影响。因此,本研究对张承地区水源涵养功能的评价分析与驱动因素的探究更具精确性与可靠性,能够更好地为张承地区生态建设提供决策性依据,为后续研究奠定更好的基础。

本研究基于InVEST模型计算产水量的结果与水资源公报结果存在一定差异,主要是因为两者对产水量的定义不同。InVEST模型定义的产水量包含了年际降水量扣除年际实际蒸散发之后的全部水量,其中包括地表产流量、降水入渗产生的土壤水及地下水增量等各种产水量,而率定所使用水资源公报中的水资源总量是指当地地表产流量与降水入渗补给饱和含水层地下水水量之和,其不包含降水入渗产生的土壤水增量等部分,因此InVEST模型计算的产水量与水资源

公报的水资源总量在概念上具有一定差异。本研究使用水资源公报中水资源总量数据仅用于对InVEST模型中的季节常数(Z_c)进行率定优化,使模型计算结果更为合理。

本研究通过降水量、气温、NDVI分别与水源涵养量进行相关性分析,发现区内降水量对水源涵养功能有极强的正驱动作用,说明了降水量是水源涵养功能的主导驱动因素,这一结论与李怡颖等^[15]、王盛等^[17]的研究结论一致。而目前对于张承地区气温与NDVI对水源涵养功能驱动作用的研究成果较少。基于本研究的气温与水源涵养量相关性分析的结果,可以发现区内气温对水源涵养功能的作用以负驱动作用为主,并且该驱动作用存在地理上的差异性,即在区内西北部、东部等地表现出显著的负相关关系,而中部等其余地区相关性均不显著。这种驱动作用地理差异性同样说明本研究在像元尺度上进行相关性分析十分必要。基于本研究NDVI与水源涵养量相关性分析的结果,NDVI与水源涵养量仅在区内零星地区表现出显著的相关关系,说明植被对水源涵养功能的驱动作用是综合而复杂的,其根本原因在于植被对水源涵养功能的作用同时具有对土壤水分的消耗及对降水的截留等多种作用。植被对土壤水分的消耗主要通过根系对土壤水的吸收并通过蒸腾作用将水分传输至大气,在InVEST模型中反映于最大根系深度与蒸散系数中,因此对于NDVI较大的林地等土地类型,其最大根系深度与蒸散系数通常较大,进而减弱水源涵养功能;而植被对降水的截留主要体现在植物林冠层对降水的截留、枯落物及土壤层对水分的保持等作

用中,反映于水源涵养量计算模型的流速系数中,因此对于 *NDVI* 较大的林地等类型,其林冠层相对更为发育,枯落物层与土壤层对水分的保持能力也更强,其流速系数更小,进而增强水源涵养功能。因此植被对水源涵养功能的驱动作用是综合性的,其驱动机理更为复杂,在进一步的研究中有必要开展张承地区不同林分结构因子与水源涵养功能关系的研究,以更好阐明植被对水源涵养功能的驱动作用。

5 结论

本研究使用成熟的遥感数据、再分析数据等高质量数据产品,基于 InVEST 模型探究了张承地区水源涵养功能的时空分布,并分析了降水量、气温、植被及土地利用对水源涵养功能的影响。主要结论如下:

(1)2001—2020 年张承地区的水源涵养功能空间分布上呈现出坝下高而坝上低的分界特点,部分地区水源涵养功能常年呈现高值或低值区,各年水源涵养功能的空间分布在存在差异性的同时也存在一定的相似性。

(2)张承地区 20 年间水源涵养深度以 -0.08 mm/a 的平均速率呈波动下降趋势。20 年间水源涵养深度最高值于 2003 年出现,达 45.12 mm ,最低值于 2009 年出现,为 4.51 mm 。区内水源涵养功能变化趋势以“基本不变”“轻微增长”“轻微降低”三者为主。

(3)张承地区降水量对水源涵养功能具有很强的正驱动作用,气温在部分地区对水源涵养功能具有负驱动作用,植被对水源涵养功能的驱动作用是综合而复杂的。张承地区 2020 年中林地的水源涵养功能最强,水源涵养深度达 28.64 mm ;从总量而言,草地水源涵养功能的贡献最大,水源涵养量达 $1.12 \times 10^9 \text{ m}^3$;在 20 年间的变化中,耕地水源涵养量的降低最为明显,变化速率达 $-6.49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。说明了张承地区 20 年间水源涵养功能的时空变化特征主要受到降水量与植被型土地利用的控制。

参考文献 (References):

- [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. [WANG Yunfei, YE Aizhong, QIAO Fei, et al. Review on connotation and estimation method of water conservation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1041 - 1071. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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):2455 - 2462. [GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2455 - 2462. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 吕乐婷,任甜甜,孙才志,等.1980—2016年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究[J].生态学报,2020,40(3):993 - 1003. [LÜ Leting, REN Tiantian, SUN Caizhi, et al. Spatial and temporal changes of water supply and water conservation function in Sanjiangyuan National Park from 1980 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 993 - 1003. (in Chinese with English abstract)]
- [4] LI Mingyue, LIANG Dong, XIA Jun, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112212.
- [5] BENRA F, FRUTOS A D, GAGLIO M, et al. Mapping water ecosystem services: Evaluating InVEST model predictions in data scarce regions[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 138: 104982.
- [6] ABOUABDILLAH A, WHITE M, ARNOLD J G, et al. Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(4): 539 - 549.
- [7] 刘景红,郑晓,樊俊美,等.基于SWAT模型的浑河上游水源涵养服务价值评估[J].应用生态学报,2021,32(11):3905 - 3912. [LIU Jinghong, ZHENG Xiao, FAN Junmei, et al. Evaluation of the value of water retention service in the middle and upper reaches of Hunhe River based on SWAT Model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3905 - 3912. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王晓学,李叙勇,莫菲,等.基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法——概念与理论框架[J].生态学报,2010,30(20):5491 - 5500. [WANG Xiaoxue, LI Xuyong, MO Fei, et al. Exploration of a new modeling method for forest water conservation based on cellular automata: Concept and theoretical framework[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5491 - 5500. (in Chinese with English abstract)]
- [9] CHEN J M, CHEN Xiaoyong, JU Weimin, et al. Distributed hydrological model for mapping

- evapotranspiration using remote sensing inputs[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1): 15 – 39.
- [10] JORDA-CAPDEVILA D, GAMPE D, GARCÍA V H, et al. Impact and mitigation of global change on freshwater-related ecosystem services in Southern Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 895 – 908.
- [11] SCORDO F, LAVENDER T M, SEITZ C, et al. Modeling water yield: Assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the invest seasonal water yield model[J]. *Water*, 2018, 10(11): 1496.
- [12] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731 – 2739. [YANG Jie, XIE Baopeng, ZHANG Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2731 – 2739. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 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[J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6161 – 6170. [LIU Youyan, LIU Xingyuan, ZHANG Bo, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 6161 – 6170. (in Chinese with English abstract)]
- [14] LIU Run, NIU Xiang, WANG Bing, et al. InVEST model-based spatiotemporal analysis of water supply services in the zhangcheng district[J]. *Forests*, 2021, 12(8): 1082.
- [15] 李怡颖, 范继辉, 廖莹. 基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J]. *草业科学*, 2020, 37(7): 1313 – 1324. [LI Yiyang, FAN Jihui, LIAO Ying. Analysis of spatial and temporal differences in water conservation function in Zhangjiakou based on the InVEST model[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(7): 1313 – 1324. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张薇, 王凤春, 贾悦, 等. 张承水源涵养区土地利用演变及产水量的响应[J]. *中国农村水利水电*, 2022(5): 138 – 146. [ZHANG Wei, WANG Fengchun, JIA Yue, et al. Land use evolution and water yield response in zhangcheng water source conservation area[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(5): 138 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王盛, 李亚文, 李庆, 等. 变化环境影响下张承地区水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5391 – 5403. [WANG Sheng, LI Yawen, LI Qing, et al. Water and soil conservation and their trade-off and synergistic relationship under changing environment in Zhangjiakou-Chengde area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13): 5391 – 5403. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 邵雅琪, 姜群鸥, 胡中民, 等. 张承地区植被指数时空演变特征及其与气候因子的关系[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(7): 96 – 106. [SHAO Yaqi, JIANG Qun'ou, HU Zhongmin, et al. Spatio-temporal evolution of the vegetation index and its relationship with climatic factors in the Zhangjiakou-Chengde Region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(7): 96 – 106. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23 – 31. [FU Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1): 23 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [20] ZHANG L, HICKEL K, DAWES W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): W02502.
- [21] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701 – 708.
- [22] SHARP R, DOUGLASS J, WOLNY S, et al. InVEST 3.10.2.post17+ug.g0e9e2ef user's guide[R]. The Natural Capital Project, Standford University, University of Minnesota, the Nature Conservancy, World Wildlife Fund: Standford, CA, USA, 2020.
- [23] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘娇, 郎学东, 苏建荣, 等. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8099 – 8111. [LIU Jiao, LANG Xuedong, SU Jianrong, et al. Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River Basin based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8099 – 8111. (in Chinese with

- English abstract)]
- [25] CHEN Junhe, WANG Dongchuan, LI Guodong, et al. Spatial and temporal heterogeneity analysis of water conservation in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on the geodetector and spatial elastic coefficient trajectory models[J]. *Geohealth*, 2020, 4(8): e2020GH000248.
- [26] 白杨. 武汉城市圈城市化进程对水源涵养功能影响变化研究[D]. 海口: 海南大学, 2014. [BAI Yang. The research on the influence of urbanization on water conservation function in wuhan city circle[D]. Haikou: Hainan University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张绪财. 格尔木河流域植被动态变化及影响因素分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [ZHANG Xucai. Analysis of vegetation dynamics and its impact factors in the Golmud River Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [28] ZHANG Xucai, JIN Xiaomei. Vegetation dynamics and responses to climate change and anthropogenic activities in the Three-River Headwaters Region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108223.
- [29] 蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170 – 1186. [CAI Bofeng, YU Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1170 – 1186. (in Chinese with English abstract)]
- [30] DA SILVA R M, SANTOS C A G, MOREIRA M, et al. Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in the Cobres River basin[J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(2): 1205 – 1221.
- [31] 甘海洪, 金晓媚, 张绪财, 等. 三江源区蒸散量的时空分布特征[J]. *现代地质*, 2021, 35(3): 665 – 674. [GAN Haihong, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Temporal and spatial distribution of evapotranspiration in the Sanjiangyuan Region[J]. *Geoscience*, 2021, 35(3): 665 – 674. (in Chinese with English abstract)]
- [32] SABATER J M. ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present[DB]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019, 146: 1999-2049.
- [33] HENGL T, MENDES DE JESUS J, HEUVELINK G B M, et al. Soil grids 250 m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0169748.
- [34] ZHANG Yonggen, SCHAAP M G, ZHA Yuanyuan. A high-resolution global map of soil hydraulic properties produced by a hierarchical parameterization of a physically based water retention model[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(12): 9774 – 9790.
- [35] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 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. [BAO Yubin, LI Ting, LIU Hui, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664 – 676. (in Chinese with English abstract)]
- [36] MO Wenbo, ZHAO Yunlin, YANG Nan, et al. Effects of climate and land use/land cover changes on water yield services in the dongjiang lake basin[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(7): 466.
- [37] 金晓媚, 王松涛, 夏薇. 柴达木盆地植被对气候与地下水变化的响应研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 31 – 36. [JIN Xiaomei, WANG Songtao, XIA Wei. Response of vegetation to variation in climate and groundwater in the Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 31 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 党学亚, 卢娜, 顾小凡, 等. 柴达木盆地生态植被的地下水阈值[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 1 – 8. [DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 金晓媚, 万力, 张幼宽, 等. 银川平原植被生长与地下水关系研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(3): 197 – 203. [JIN Xiaomei, WAN Li, ZHANG Youkuan, et al. A study of the relationship between vegetation growth and groundwater in the Yinchuan Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 197 – 203. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳