

doi: 10.12029/gc20220901001

刘义, 史佩东, 刘淼, 许凯然, 张宁, 姜鹏, 王玮迦, 姜禹戈. 2024. 1990—2020 年黄河流域沁河上游汇水区水源涵养功能空间格局与生态治理建议[J]. 中国地质, 51(6): 1917–1929.

Liu Yi, Shi Peidong, Liu Miao, Xu Kairan, Zhang Ning, Jiang Peng, Wang Weijia, Jiang Yuge. 2024. Spatial pattern of water conservation function and ecological management suggestions in the catchment area of the upper reaches of Qinhe River in the Yellow River Basin from 1990 to 2020[J]. Geology in China, 51(6): 1917–1929(in Chinese with English abstract).

# 1990—2020 年黄河流域沁河上游汇水区水源涵养功能空间格局与生态治理建议

刘义<sup>1,2,3,4</sup>, 史佩东<sup>1</sup>, 刘淼<sup>1</sup>, 许凯然<sup>1</sup>, 张宁<sup>1</sup>, 姜鹏<sup>5</sup>, 王玮迦<sup>1</sup>, 姜禹戈<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065099; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031; 5. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

**摘要:**【研究目的】沁河流域作为黄河中游重要的来水区与水土功能保持区, 流域上游汇水区主要涵括沁源与安泽两县, 科学分析其水源涵养能力的时空变化特征与影响因素可为沁河中下游地区乃至流域范围的生态环境修复与黄河流域生态保护和高质量发展规划提供技术依据。【研究方法】本文采用水量平衡方法, 对 1990—2020 年 30 年间区域内生态系统水源涵养功能时空动态变化特征与不同因素对水源涵养能力的影响进行分析讨论, 根据区域水源涵养能力并结合其内自然保护地分布划分出区域水源涵养重要性等级。【研究结果】(1) 研究区内水源涵养能力空间上表现出南高北低, 中间高, 四周低, 地域差异显著, 多年水源涵养量均值为  $366.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; 近 30 年水源涵养功能变化趋势呈现先减少后增加的特征。(2) 气候因子与水源涵养量相关性较强, 植被类型也影响着水源涵养的空间特性。植被类型中, 森林是区域内生态系统水源涵养的主体, 但从水源涵养能力来看灌丛要高于森林和草原。(3) 研究区内水源涵养重要和极重要区域总面积为  $733.38 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的 35%, 两者水源涵养总量占全区的 53.63%, 主要分布在河流两岸与大起伏山地过渡的中小起伏山地之中以及安泽县的南部区域, 是整个研究区的水源涵养集中地区。【结论】针对沁河流域上游水源涵养能力的建设, 提出了一些生态治理措施, 包括将灵空山、花坡一带确定为水源涵养功能极重要区域; 因地制宜增加水源涵养能力较强的树种, 加大亚高山草甸和温带草原的治理与恢复。

**关键词:** 水源涵养; 生态修复工程; 水量平衡; 重要性分区; 生态环境地质调查工程; 沁河流域; 黄河流域; 山西省  
**创新点:** 分析研究区 30 年生态系统水源涵养功能时空动态变化特征; 根据区域水源涵养能力并结合其内自然保护地分布划分出区域水源涵养重要性等级。

中图分类号: X171.4; TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)06-1917-13

## Spatial pattern of water conservation function and ecological management suggestions in the catchment area of the upper reaches of Qinhe River in the Yellow River Basin from 1990 to 2020

收稿日期: 2022-09-01; 改回日期: 2023-11-16

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211573、DD20220203)和河北省生态环境地质研究中心项目(JXYF-202206)联合资助。

作者简介: 刘义, 男, 1988 年生, 高级工程师, 主要从事水文环境地质、生态环境地质的调查研究; E-mail: [lyi@mail.cgs.gov.cn](mailto:lyi@mail.cgs.gov.cn)。

通讯作者: 史佩东, 男, 1996 年生, 工程师, 主要从事生态环境调查与评价工作; E-mail: [shipeidong111@163.com](mailto:shipeidong111@163.com)。

LIU Yi<sup>1,2,3,4</sup>, SHI Peidong<sup>1</sup>, LIU Miao<sup>1</sup>, XU Kairan<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>, JIANG Peng<sup>5</sup>, WANG Weijia<sup>1</sup>,  
JIANG Yuge<sup>1</sup>

(1. Langfang Center for General Survey of Natural Resources, CGS, Langfang 065099, Hebei, China; 2. Hydrogeological and Environmental Geological Survey Center of China Geological Survey, Baoding 071051, Hebei, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 5. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center of China Geological Survey, Beijing 100055, China)

**Abstract:** This paper is the result of ecological environment geological survey engineering.

**[Objective]** The Qinhe River Basin serves as an important water-receiving area and soil-water conservation functional area in the middle reaches of the Yellow River. The main water catchment area in the upper reaches of the basin mainly covers two counties, Qinyuan and Anze. Scientific analysis of the temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of its water conservation capacity can provide technical basis for the ecological environment restoration in the middle and lower reaches of the Qinhe River and even the entire basin, as well as for the ecological protection and high-quality development planning of the Yellow River Basin. **[Methods]** This paper uses the water balance method to analyze and discuss the spatiotemporal dynamic change characteristics of the water conservation function of the ecosystem in the region during the 30 years from 1990 to 2020 and the influence of different factors on the water conservation capacity. According to the regional water conservation capacity and combined with the distribution of natural protected areas within it, the importance level of regional water conservation is divided. **[Results]** (1) In terms of space, the water conservation capacity in the study area shows a pattern of being high in the south and low in the north, high in the middle and low around, with significant regional differences. The average value of multi-year water conservation volume is  $366.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ . The change trend of water conservation function in nearly 30 years shows a characteristic of first decreasing and then increasing. (2) Climate factors have a strong correlation with water conservation volume, and vegetation types also affect the spatial characteristics of water conservation. Among vegetation types, forests are the main body of water conservation in the ecosystem within the region. However, in terms of water conservation capacity, shrublands are higher than forests and grasslands. (3) The total area of important and important-highly water conservation areas in the study area is  $733.38 \text{ km}^2$ , accounting for 35% of the total area of the study area. The total amount of water conservation of the two accounts for 53.63% of the whole area. They are mainly distributed in the small and medium-sized undulating mountains in the transition between the two sides of the river and the large undulating mountains and the southern area of Anze County. It is the concentrated area of water conservation in the entire study area. **[Conclusions]** For the construction of water conservation capacity in the upper reaches of the Qinhe River Basin, some ecological governance measures are proposed, including identifying the Lingkong Mountain and Huapo areas as extremely important areas for water conservation function. According to local conditions, tree species with strong water conservation capacity can be increased, and the governance and restoration of subalpine meadows and temperate grasslands can be strengthened.

**Key words:** water conservation; ecological restoration; water balance; importance zoning; ecological environment geological survey engineering; Qinhe River basin; Yellow River Basin; Shanxi Province

**Highlights:** The spatio-temporal dynamic change characteristics of the water conservation function of the ecosystem in the study area over the past 30 years was analyzed; The regional water conservation importance levels were divided based on the regional water conservation capacity and in combination with the distribution of natural protected areas within it.

**About the first author:** LIU Yi, male, born in 1988, senior engineer, mainly engaged in the investigation and research of hydraulic environmental geology and ecological environment geology; E-mail: [lyi@mail.cgs.gov.cn](mailto:lyi@mail.cgs.gov.cn).

**About the corresponding author:** SHI Peidong, male, born in 1996, engineer, mainly engaged in ecological environment investigation and evaluation; E-mail: [shipeidong111@163.com](mailto:shipeidong111@163.com).

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20211573, No.DD20220203) and Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research (No.JXYF-202206).

## 1 引言

河流上游汇水区作为流域重要的生态系统功能区,其生态效益和水源涵养服务功能尤为重要,可为流域中下游提供生态功能服务与屏障。水源涵养功能作为生态服务功能中极其重要的部分,可直接反映区域内人类活动与自然水文条件供需情况,在水量充足期可以减少水分滞留,在水源紧缺时,可以涵养水分保持水土,维持生态系统对水源基本的需求(李浩洋, 2021; 左其亭等, 2022)。沁河作为黄河一级支流,流域上游的植被覆盖率达 60% 以上,丰富良好的生态系统对于维护生物多样性和栖息环境、防治流域的水土流失、提高径流能力、实现自然资源可持续利用具有重要的意义(郭新亚等, 2018; 韩双宝等, 2021)。自水源涵养服务功能量化成为可能,有关水源涵养功能的研究呈指数型增长,水源涵养的社会经济价值和影响机制也受到了更多关注。

关于水源涵养能力的评估方法可分为 3 种:生态系统蓄存降水的能力(侯晓臣等, 2018)、水量平衡原理对区域水量动态的影响(聂忆黄, 2010; 卓静等, 2017)以及相关模型的定量研究(范亚宁等, 2017),主要包括:降水储存量法、林冠截留剩余量法、综合蓄水能力法、水量平衡法、多因子回归法及多模型集成法。综合蓄水能力法主要从森林植被的不同层次以及疏松土壤层的截留来计算植被蓄水能力(孙清琳等, 2015; 孙艺杰等, 2016; 陈文华等, 2021)。多因子回归法使用河流流量与流域土地覆被、地形属性占比等因子,利用回归模型分析流域下垫面属性与产水量的关系(Cingolani et al., 2015)。在基于水平衡的模型方法中,径流或产水的估算通常是核心问题(李晶和任志远, 2008)。在国内领域,肖建设等(2020)研究了黄河源区玛多县 2005—2015 年的生态服务价值演变特征,研究中统计了研究区域的土地利用类型以及土地利用变化动态,对区域水源涵养动态变化特征进行了评价;巩飞等(2020)采用 InVEST 模型针对张家口坝上地区水源涵养功能的重要性进行评估,曹叶琳等(2020)利用水量平衡法对陕西省生态系统水源涵养功能进行了评估分析。在国外研究中, Hoyer and Chang(2014)对俄勒冈州西北部的 Tualatin 和 Yam

Hill 盆地提供的淡水生态系统服务进行预测分析,并以 2050 年为预测年份,模拟 2050 年的一系列生态环境变化;Pessacg et al.(2015)对阿根廷巴塔哥尼亚最干旱地区之一的丘布特河流域的水量进行了模拟,对研究区降水量的空间和数值进行了分析。

区域水源涵养功能同时也是生态系统保护评价的重要指标之一,2020 年生态环境部印发的《生态保护红线监管技术规范生态功能评价(试行)》与自然资源部办公厅印发《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》中均将水量平衡方程列为评价水源涵养的推荐方法。水量平衡法是将自然生态系统看作为一个循环整体,以水量的进入和输出为两端点,从水量平衡的角度,降水量与蒸散量以及其他消耗的差即为此循环中所持有的水资源总量,该方法被广泛应用于各种水源涵养功能重要性评估中,具有适用范围广、原理清晰明了、准确度高等特点(龚诗涵等, 2017; 张彪等, 2021),尤其是它直接服务于生态保护红线工作(李萌等, 2019),显示了服务社会的实践功能和实用性(侯光良等, 2021)。

目前关于沁河流域开展的有关生态服务功能的研究较少,作为黄河中游重要的来水区及水土保持功能区,对沁河上游水源涵养能力的时空格局研究具有极高的社会价值(王尧等, 2021; 孙张涛等, 2023)。此外沁河流域作为山西省内第二大流域,流经长治、临汾、晋城三市,是山西省重要能源重化工基地(贾慧敏等, 2024),在《山西省沁(丹)河流域生态修复和保护规划》中也指出要科学配置水土资源,增强水源涵养,使山水林田湖各要素相互促进,形成良性循环,因此水资源的合理开发和科学利用关乎国家战略和地方区域规划的有效实施,水源涵养功能重要性评估是其重要一环,对沁河流域上游水源涵养能力建设意义重大,也具有较强的实际指导作用和现实需求(侯光良等, 2021)。本文基于中国地质调查局组织实施的“黄河中游沁河流域生态修复支撑调查”项目,在沁河上游汇水区通过水量平衡法对区域的水源涵养功能的时空格局进行分析以及综合确定区域水源涵养功能保护地的重要性等级,为沁河及黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。

## 2 研究区概况

本文研究的沁河上游汇水区,为沁河源头至张峰水库之上,行政区域上涵括沁源、安泽两县,属黄土高原区,地理单元属沁水盆地西部隆起区的太岳山系主脉,整体地势西北隆起,东南倾低,海拔介于 750~2500 m,平均海拔 1400 m,最高处 2523 m (图 1)。研究区总面积 4516 km<sup>2</sup>,区内属暖温带大陆性季风气候,四季分明,全年平均日照为 2246.1 h,日照率为 51%,年平均气温为 9.4℃,年平均降水量为 589.6 mm(王一豪和李红梅, 2019),沁河干流自北向南贯穿全境,大部分区间属于山区型峡谷,坡陡流急,水多沙少,区内沁河河道平均纵坡为 3.8‰,水能资源丰富,以石质山区为主,干流河道大部分为砂页岩地层,水量渗透较少。森林覆盖率达 53.3%,树种 130 余种,以油松、杨树、桦树、栎树、落叶松为主(吕爱丽等, 2020)。研究区内目前已发现的有 18 种矿产资源,储量较大的有煤、铁、铝矾

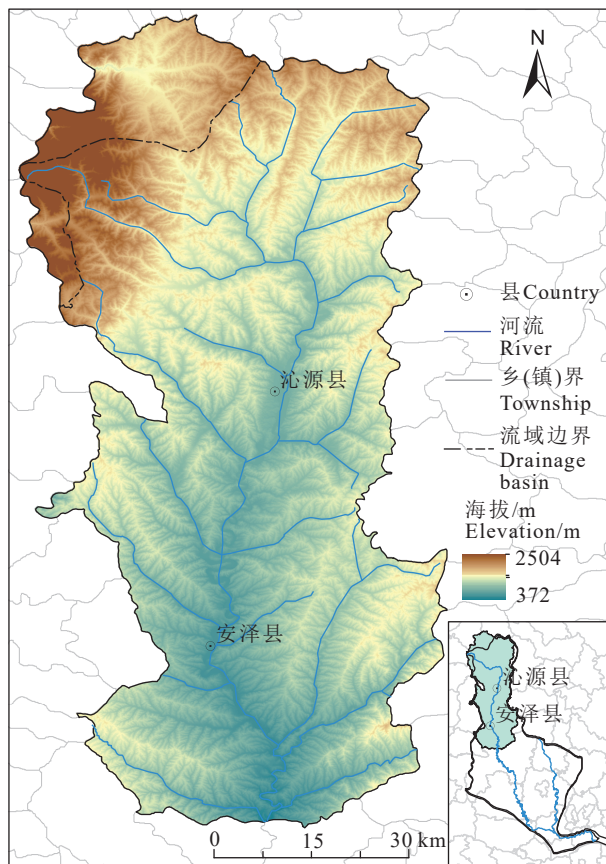


图 1 研究区位置及地形地貌  
Fig.1 Location and landform of the study area

土、石灰岩及煤层气 5 种。煤炭总储量 368 亿 t,含煤面积占总面积的 80%,是山西省重要的焦煤生产地区(李艳丽, 2014)。

## 3 数据与方法

### 3.1 数据

2021 年中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心在沁河流域开展了生态环境地质调查,系统采集了工作区水文调查数据。本文研究所用数据及来源主要为:研究区 DEM 数据来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn/>);降水量数据及温度数据(1990—2021 年)通过中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)以及河北省高校生态环境地质应用技术研发中心开放研究基金资助项目(JSYF-202206)中的研究成果收集了流域周边 12 个气象站日气象资料;各地太阳顶层辐射数据来自美国太空总署气象数据库([https://www.nasa.gov](https://www.nasa.gov/));植被类型数据为中国科学院空天信息创新研究院的中国 30 m 精细地表覆盖产品(GLC\_FCS30 1990—2020)中提取;自然保护区数据来自于中华人民共和国生态环境部全国自然保护区名录(<http://www.forestry.gov.cn/>);国家森林公园数据来自国家林业和草原局以及国家公园管理局网站(<http://www.mee.gov.cn/>)。

### 3.2 研究方法

水平衡和能量循环过程中重要的方面是区域实际蒸散发量,其与潜在蒸发量的区别为,后者是指地表的实际水分损失量,而前者是在气候、土壤和植被综合作用下的实际水汽通量,即非理想水面条件下,从地表回到大气的水汽通量。Budyko 水热耦合模型(Budyko, 1974)作为蒸散发计算的有效方法之一,综合考量了潜在的蒸散发能力和降水对实际蒸散发量的影响(Zhang et al., 2008; 张丹等, 2016)。Zhang et al. (2001)在 Budyko 水热耦合模型的基础上,提出基于降水季节性和植被类型的实际蒸散发估算公式:

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + w \frac{E_0}{P}}{1 + w \frac{E_0}{P} + \left(\frac{P}{E_0}\right)} \quad (1)$$

式中:  $ET$  为实际蒸散发量, mm;  $P$  为降水量, mm;  $E_0$  为潜在蒸散发量, mm;  $w$  为植被可用水系数, 与不同植物的根区深度有关, 根据 Zhang et al.(2008)的经验取值: 森林为 2.0, 灌草丛为 1.0, 耕地为 0.5, 建设用地为 0.1。

$E_0$  使用前人基于黄土高原地区修正后 Hargreaves 模型估算(白一茹等, 2011; 张本兴等, 2012; 王幼奇等, 2013; 邱微等, 2014), 该方法以太阳辐射、温度数据为基础, 适用于旬、月以上尺度的  $E_0$  估算。计算公式为:

$$ET_0 = a + b(0.000939 \times (T_{\text{mean}} + 17.8))(T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}})^{0.5} R_a \quad (2)$$

$$ET_{\text{mh}} = k(ET_0) \quad (3)$$

式中:  $ET_{\text{mh}}$  为修正后的  $ET_0$ , mm/d;  $T_{\text{mean}}$  为日平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{MAX}}$  为日最高气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{MIN}}$  为日最低气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_a$  为天顶辐射,  $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ;  $a, b$  为校正系数, 根据研究区所处的空间位置(张本兴等, 2012), 其中  $a$  取 1.045,  $b$  取 0.48;  $k$  为适用于黄土地区的修正系数(王幼奇等, 2013), 取 1.011。

生态系统水源涵养功能的评估指标之一水源涵养量, 与降水量、蒸散发、地表径流以及土地覆被类型等密切相关。以整个沁河上游为研究区域, 各类型生态系统为基本单元, 基于水量平衡原理计算水源涵养量。水量平衡法将生态系统视为一个整体, 着眼于水量的进出过程, 输入量为大气降水, 输出量为蒸发、蒸腾及各种径流, 其差值即为水源涵养量(王保盛等, 2020)。计算公式为:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_{ij} - R_{ij} - E_i - M) \times A_i \times 10^3 \quad (4)$$

式中:  $TQ$  为总水源涵养量,  $\text{m}^3$ ;  $P_{ij}$  为年均降水量, mm;  $R_{ij}$  为年均地表径流量, mm;  $A_i$  为  $i$  类生态系统面积,  $\text{km}^2$ ;  $i$  为研究区第  $i$  类生态系统类型;  $j$  为研究区生态系统类型数;  $E_i$  为年均实际蒸散发, mm;  $M$  为冰川融水量, mm(区内忽略不计)。

地表径流量  $R$  可由降雨量与地表径流系数的乘积得到(曹叶琳等, 2020; 侯光良等, 2021)。地表径流系数说明了降雨量转化为径流量的程度, 能够说明生态系统对降雨和径流的影响。计算公式如下:

$$R = P \times a \quad (5)$$

式中:  $R$  为地表径流量, mm;  $P$  为多年平均降雨量, mm;  $a$  为地表径流系数, %, 见表 1(赵焕胤等, 1994; 龚诗涵等, 2017; 曹叶琳等, 2020)。

以  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  大小的空间单元为计算精度, 对 1990—2020 年期间沁河上游汇水区的降水量( $P$ )、蒸散发( $ET$ )以及水源涵养量( $TQ$ )进行计算分析, 了解区域水源涵养能力的变化趋势及其影响因素。

## 4 研究结果

### 4.1 降雨和蒸散特征

研究区位于黄土高原东缘的内陆地区, 由图 2 可见, 多年降水均值由东南到西北逐渐减少, 区域整体蒸散量较高, 因研究区内属山地区域, 植被覆盖度较高, 植物蒸腾作用显著, 因而成为蒸散发高值区, 在降水充沛区域, 加上气候温暖湿润, 蒸散量也相对较高。由图 3 折线图可知, 1990—2020 年期间, 年均降水量在 2010 年前后出现一个较明显的低值, 其间先逐年减少后整体呈缓慢增长趋势; 区域实际蒸散量在 2000 年和 2015 年出现低值, 总体看来较稳定, 变化趋势不明显。降水量和区域实际蒸散量的均值分别为 516.8 mm 与 442.4 mm。

### 4.2 水源涵养时空特征

1990—2020 年研究区水源涵养量多年空间均值在  $-22.1 \sim 199.6 \text{ mm}$ , 高值区出现在研究区中央沟谷地区, 低值主要分布在山区地带, 整体上呈现出南高北低, 四周低, 中部高的特征(图 2)。这是因为研究区地处山地丘陵区, 中央河谷贯穿, 两侧山体土层较薄, 实地调查时研究区北部植被覆盖下的山

表 1 平均地表径流系数

Table 1 Mean surface runoff coefficients		
生态系统类型	植被类型	平均地表径流系数/%
森林	常绿阔叶林	4.7
	常绿针叶林	4.5
	落叶阔叶林	2.7
	落叶针叶林	0.9
灌丛	常绿阔叶灌丛	4.3
	落叶阔叶灌丛	4.2
草原	温带草原	3.9
	高山草甸	4.2
耕地	旱地	16.3
	灌溉农田	18.3
湿地	沼泽和水库	0.00

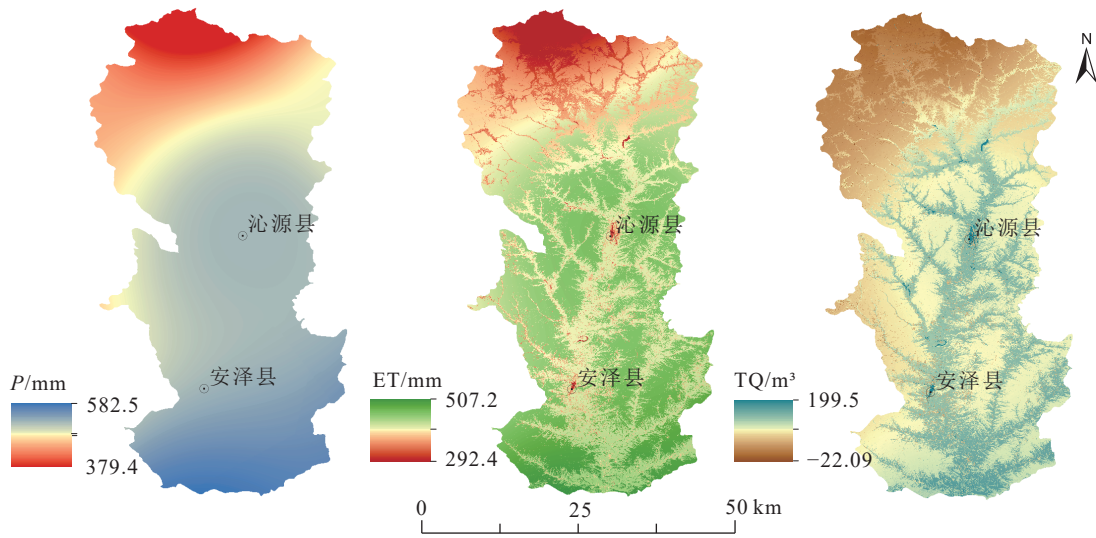


图2 研究区 1990—2020 年平均降水量  $P$ 、蒸散量  $ET$  和水源涵养  $TQ$  空间特征  
 Fig.2 Spatio-temporal characteristics of average precipitation  $P$ , evapotranspiration  $ET$  and water conservation  $TQ$  in the study area from 1990 to 2020

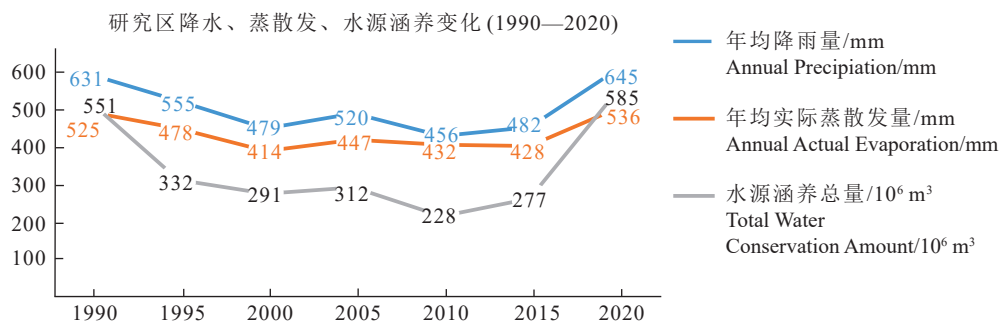
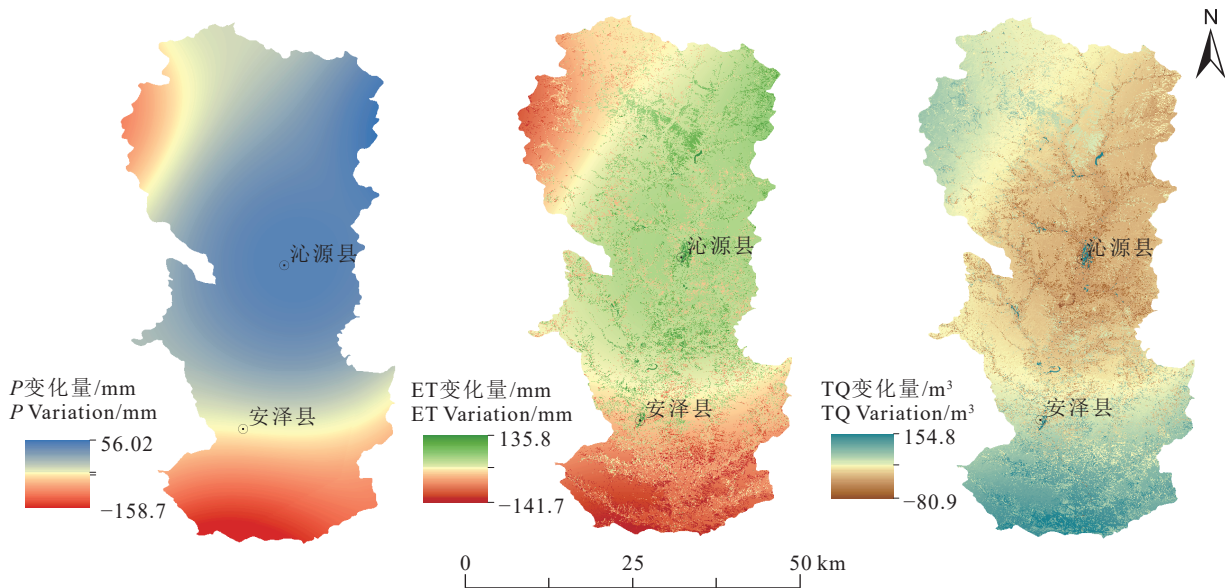


图3 研究区 1990—2020 年降水量  $P$ 、蒸散量  $ET$  和水源涵养  $TQ$  变化特征  
 Fig.3 Variation characteristics of precipitation  $P$ , evapotranspiration  $ET$  and water conservation  $TQ$  in the study area from 1990 to 2020

体土层厚度大多不足 10 cm, 加之山高坡陡, 来水后极易形成地表径流, 向山下沟谷汇流, 保水能力较差, 因此造成了研究区内山区虽然植被覆盖度高, 但水源涵养总量低的状态。安泽县南部海拔相对较低, 地形起伏小, 土层较厚, 天然植被面积众多, 即使区域实际蒸散量很大, 但其降水量也较大, 并且植被对降雨的缓冲与拦蓄作用使得地表径流产生量减少, 从而蓄积较多水分。

因此, 在综合作用下安泽县南部区域水源涵养能力较大, 北部中高山区, 以草地生态系统为主, 植被蒸腾作用不显著, 区域实际蒸散量较少, 且降水量较小, 水源涵养能力相对较弱。此外, 根据水量平衡法计算得出的研究区水源涵养总量最小值出现在 2010 年, 为  $228.31 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 最大值出现在 2020 年, 为  $585.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 与该年较高的降水量有关; 而区域多年平均水源涵养总量为  $366.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 自 1990 年至今水源涵养量呈先下降后增加的趋势。

关于水源涵养的气候影响因子主要体现在降雨量和蒸散量。由图 3 折线图可知, 水源涵养量与降水量起伏大体相一致, 高峰出现年份相同, 说明水源涵养量与降水量呈正相关; 同时可以看出, 水源涵养量与蒸散发呈负相关, 比如 2015 年与 2000 年降雨量相近, 但较高的蒸散值使得 2015 年水源涵养量最低; 同时, 2015 年—2020 年降雨量突然增加也是造成水源涵养量急剧回升的主要原因。

由于气候、植被和地质地貌等因素存在明显的

空间差异, 水源涵养也有所区别。以 2020 年为例分析, 从生态系统类型来看, 研究区内存在的主要生态系统类型有四种, 分别为森林、草原、灌丛、农田生态系统, 在所有生态系统中以森林和草原水源涵养量最高, 这与两种生态系统类型所占面积比较大有关, 其水源涵养总量分别为  $3.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 约占研究区水源涵养总量的 55.2%、23.5%; 灌丛和农田的水源涵养总量分别为  $5.27 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $1.51 \times 10^7 \text{ m}^3$  (图 4)。在自然植被中通过计算当年各类型植被水源涵养总量除以其对应面积得出各自水源涵养能力, 由高到低依次为灌丛、落叶阔叶林和草地分别为  $1.25 \times 10^5 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $1.12 \times 10^5 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  及  $1.07 \times 10^5 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 这主要是因为森林和灌丛群落密闭性较好, 有利于截留降水, 涵养水源, 但森林群落层次丰富, 截留的降水大部分都被蒸发, 蒸腾作用远大于灌丛, 加之生长位置较高, 山高坡陡, 土层较薄, 来水后迅速向下汇流, 因此灌丛的水源涵养能力略高于森林, 而草地对降雨的截留较弱, 容易形成径流, 从而减少水源涵养。但整体来看, 在森林生态系统中, 落叶林水源涵养能力要强于非落叶林、阔叶林的能力要强于针叶林。由此可见, 不同生态系统类型以及其中生长的不同类型植被对水源涵养差异性的影响也有很大不同。

### 4.3 水源涵养变化规律

对区域每年水源涵养能力进行统计, 1990—2020 年期间区域空间水源涵养量整体波动较大

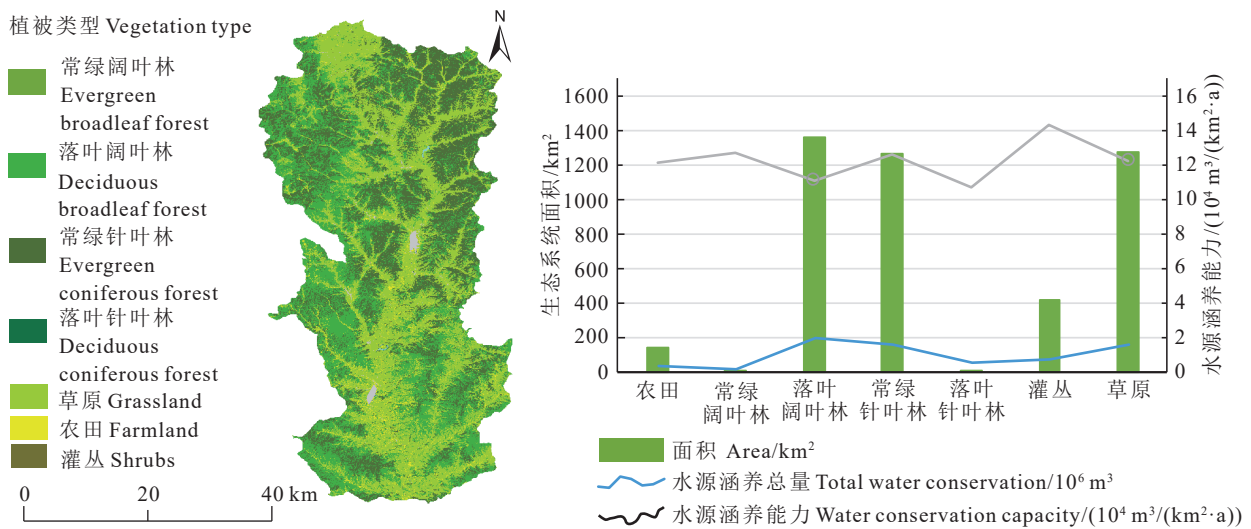


图 4 研究区 2020 年自然生态系统水源涵养空间特性  
Fig.4 Spatial characteristics of water conservation in natural ecosystems in the study area in 2020

(图 5)。波动最明显的当属研究区的南北两侧区域,空间上表现出 1990—2000 年呈下降趋势,至 2010 年,安泽县南部区域水源涵养能力回升明显,2010—2020 年,沁源县北部山区水源涵养值也开始增大。总体来看 1990—2020 年沁河上游水源涵养总量整体表现出先减少后增加的一个回归趋势,1990—2010 年呈逐年递减模式,2010—2020 年呈现逐年增加的状态,研究区内 30 年间的变化趋势增加的区域分布广泛,主要位于研究区的北部与南部区域,面积占研究区总面积的 66.2%;减少区域主要位于研究区中部的山谷平原之间,面积占比为 33.8%,这也侧面体现了 1990—2000 年,研究区内的大规模开发导致生态环境恶化,水源涵养能力急剧减少,自 2010 年以来,山西省内实施的一系列重点生态建设工程取得成效,使生态环境有了明显好转,譬如沁源、安泽县内的“天然林资源保护工程”建设,2000 年在全省全面启动,到 2010 年完成了一期工程,2011—2020 年实施完成了二期工程建设任务,研究区的大量天然林得到全面保护,加之降水量增多,也导致了这一时期的水源涵养能力急剧回升;区域内太岳国家森林公园以及安泽国家森林公园的设立,对研究区内水源涵养能力的快速恢复也有至关重要的影响。研究区水源涵养量的变化主要受土地覆被和降水的影响,由前文知,水源涵养量增加趋势较大区域与降雨量变化空间分布较为

相似,这说明降水量的增减关系着水源涵养量的变化,位于西北地区的太岳山区和安泽县南部地区降水增加趋势最为明显,与该范围内水源涵养增加趋势一致。此外,在研究区中部区域蒸散量增加趋势较大,与该区域水源涵养减弱趋势一致。

#### 4.4 水源涵养重要性评价

水源涵养重要性指的是区域内不同地带的水源涵养量对维持生态系统平衡的重要程度,基于 1990—2020 年沁河上游水源涵养空间均值分布及其现状的变化特征,本文通过计算不同区域的水源涵养能力结合生态保护红线中关于生态系统服务值的概念,即在地理信息系统软件中,运用栅格计算器,取得归一化后的生态系统服务值栅格图。导出栅格数据属性表,属性表记录了每一个栅格像元的生态系统服务值,将服务值按从高到低的顺序排列,计算累加服务值。将累加服务值占生态系统服务总值的比例,作为生态系统服务功能评估分级的分界点,本文的生态系统服务值即为水源涵养量,生态系统服务功能即为水源涵养重要性,利用地理信息系统软件的重分类工具,可将水源涵养功能重要性分为 4 级,即极重要、重要、中等和一般(图 6)。

利用水源涵养量来对沁河流域上游汇水区的水源涵养能力进行分级评估,将区域内不同地带的水源涵养量进行定量分析,结合区域内已经确立的河流源地、重点自然保护区及水源保护的关键地带

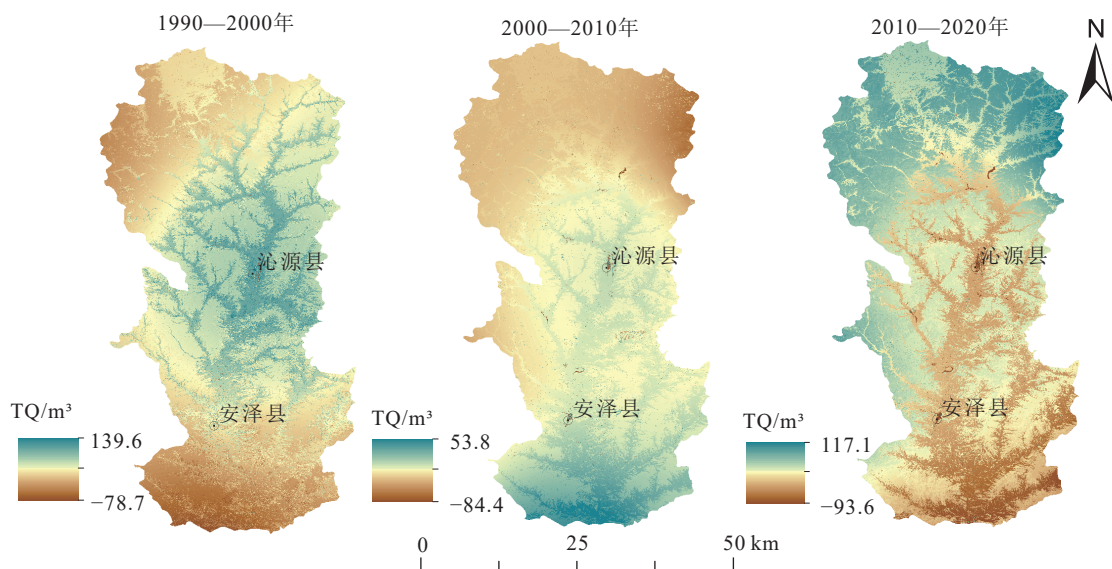


图 5 不同时间段研究区水源涵养 TQ 空间变化特征

Fig.5 Spatial variation characteristics of water conservation TQ in different time periods



等, 综合判定区域水源涵养能力重要性等级与水源涵养保护重要性的区域划分(侯光良等, 2021)。

考虑到研究区地处流域上游, 是沁河及多条重要支流的发源地, 所以全区均属水源涵养重要区, 根据本区水源涵养能力变化数值分布特征, 将水源涵养能力分级如下。由表 2 知: 水源涵养能力一般重要和中等重要的区域面积为 605.97 km<sup>2</sup> 和 2693.15 km<sup>2</sup>, 约占本区面积的 13.2% 和 59.5%, 重要和极重要区域分别占本区面积的 20.8% 和 6.3%, 二者水源涵养总量占全区的 46.2%, 结果显示: 水源涵养能力重要与极重要区域是研究区内水源涵养量的集中区域, 该区域对于本区水源保障与供给显得极为重要(表 2)。

考虑到研究区内的自然保护地均为极重要的水源涵养区(王国庆, 2022), 本区涉及到水源涵养的

自然保护地包括 4 个森林公园、2 个自然保护区、1 个国家草原公园及 1 个国家个湿地公园(表 3), 类型包含森林、草原、湿地生态系统; 其中太岳山国家级森林公园与灵空山自然保护区面积较大, 在研究区内仅包含其东侧小部分区域, 安泽国家森林公园由麻衣寺、黄花岭、青松岭、安泰山、赵圪堆 5 部分组成, 均分布有丰富的地表与地下水资源。

考虑自然保护地后, 水源涵养极重要区域面积比之前增加, 达到 733.38 km<sup>2</sup>(图 7), 即沁源、安泽两县的建设规划相一致, 也符合本区生态文明建设为重中之重的战略需求。水源涵养功能极重要与重要区域面积约占研究区面积的 35.1%, 水源涵养总量约为 19.5×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>, 占全区总量的 53.6%, 而中等重要与一般重要区域面积约占全区面积的 65.1%。总体来看, 水源涵养功能极重要和重要区域主要分布在安泽县南部区域和河流两岸与大起伏山地过渡地带之间的中小起伏山地中, 此外研究区域北部的灵空山地区也有小部分分布; 中等重要地区主要集中分布于研究区的山区, 也是研究区内的主要油松种植区; 一般重要区域水源涵养总量仅为 2.84×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>, 水源涵养价值相对较低, 多分布在流域外的沁源县北部王和镇、王陶镇境内。

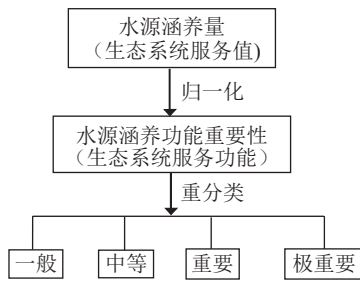


图 6 水源涵养重要性评价流程图

Fig.6 Flow chart for evaluating the importance of water source conservation

表 2 研究区水源涵养功能评价分级

Table 2 Evaluation and grading of water conservation function in the study area

水源涵养能力	一般	中等	重要	极重要
累积服务值占服务总值比例/%	<15	15~35	35~50	>50
水源涵养量/(10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> )	2.84	16.71	12.58	4.23
面积/km <sup>2</sup>	605.97	2693.15	941.81	283.52
面积占比/%	13.24	59.52	20.81	6.27

## 5 生态治理建议

为强化和建设本区生态环境的水源涵养功能, 将近年来随着生态保护工程建设, 新设立的各类自然保护地也一并纳入水源涵养极重要区加以保护。研究区北部灵空山、花坡一带, 目前虽然水源涵养能力较南侧降水丰富区弱, 但 2010 年以来, 随着区域内的自然保护地相继设立, 水源涵养能力增强趋势明显, 因此建议将以上区域也纳入水源涵养极重要区中, 实行有效管理, 提升其水源涵养能

表 3 研究区自然保护区与国家公园

Table 3 Nature reserves and national parks in study areas

名称	县城	面积/km <sup>2</sup>	保护对象	类型	
国家级自然保护区	灵空山	沁源	88.65	以油松为主的典型暖温带针阔叶森林生态系统体系和珍稀动物	森林生态系统
省级自然保护区	红泥寺	安泽	81.79	落叶阔叶林和针阔混交林为主的森林生态系统, 野生物物种	森林生态系统
国家级森林公园	太岳山	沁源	86.65	暖温带针阔叶森林生态系统及丰富的珍稀生物物种	森林生态系统
国家级森林公园	安泽	安泽	198.24	暖温带针阔叶森林生态系统体系和丰富珍稀动物	森林生态系统
国家级森林公园	菩提山	沁源	32.08	沁河流域的水源涵养区, 油松集中分布地, 珍稀动物栖息地	森林生态系统
省级森林公园	红叶岭	安泽	112.43	暖温带针阔叶森林生态系统, 黄庐景观区	森林生态系统
国家级草原公园	花坡	沁源	26.67	亚高山草甸, 高原气候特征、生长矮草类高山植物, 天然的优良牧场	草原生态系统
国家级湿地公园	沁河源	沁源	0.94	沁河源头, 涵盖了河流湿地、沼泽湿地、库塘湿地三大类型	湿地生态系统

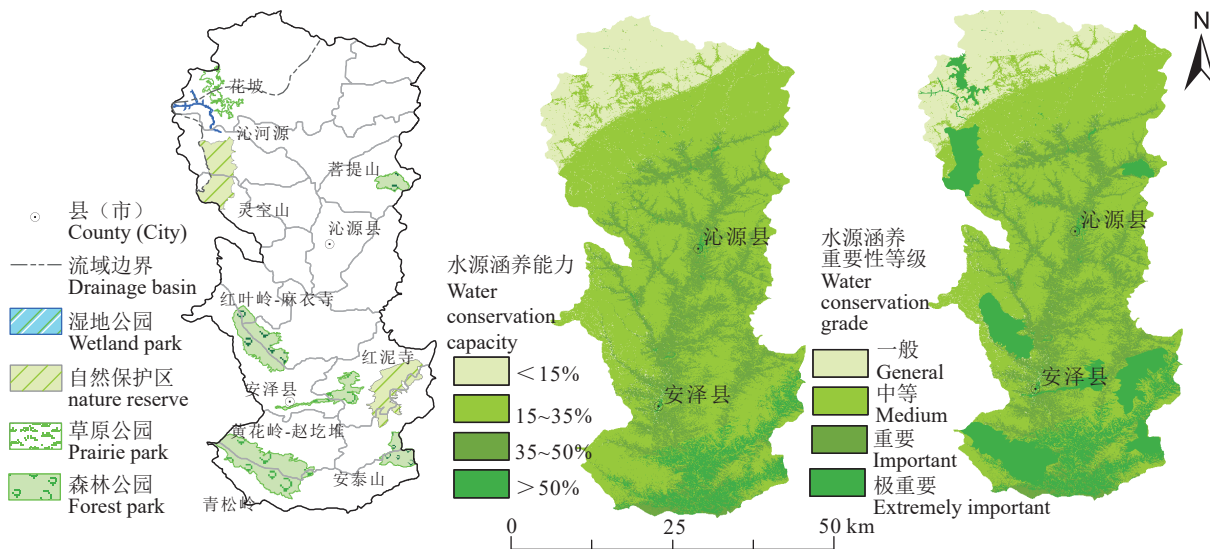


图7 沁河上游汇水区水源涵养功能重要性分布

Fig.7 Distribution of water conservation function importance in the catchment area of the upper reaches of the Qinhe River

力。尤其是研究区域北部高山区的花坡一带,与沁河源区湿地公园毗邻,该区域也是沁河河源的重要部分,其水源涵养功能直接关系到整个流域的生态文明建设及沁河下游的水源供给,具有重要的生态与生产价值。

为加强区域生态治理与修复。区域内的森林系统也具有较高的水源涵养能力,由前文可知:落叶林水源涵养能力要强于非落叶林、阔叶林的能力要强于针叶林,因此要因地制宜,根据区域内的环境差异,应大力种植水源涵养能力强的优势树种,有研究也支持这种说法,提出了持水能力较强的树种,如杨树、刺槐、元宝枫等(张君玉等, 2012; 杨良辰等, 2019)。除此之外,温带草原和草甸也占有一定面积,在生态系统服务方面发挥着重要作用(胡婵娟等, 2012)。区域北部花坡一带的亚高山草甸为山西省境内唯一的亚高山草原景观,但目前存在一定程度的旅游无序管理、风电工程开发、放牧等问题,因此加强亚高山草甸和温带草原的生态修复和治理,本地区生态服务能力将得到改善。

## 6 结论

沁河流域在黄河流域生态保护和高质量发展、生态文明战略实施、晋东南城市建设发展中具有重要地位,而水源涵养能力也是区域资源开发的关键

环节,本文对沁河流域上游汇水区水源涵养能力时空格局变化与现状的重要性分布进行了研究,并针对研究区实际提出了对策和建议。本文取得的结论如下:

(1)沁河上游生态系统水源涵养能力受降水空间分布不均影响,整体上呈现出南高北低,中间高,四周低的特征。1990—2020年研究区生态系统水源涵养量累年平均值为  $366.74 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,水源涵养量呈先减少后增加的一个“回归”趋势特征,下降时间段主要为1990—2010年,2010年后至今,因区内实行了一系列生态保护措施促使区域水源涵养能力得到快速恢复。

(2)研究区内目前存在的生态系统主要有四种,分别为森林、草原、灌丛、农田生态系统,其中水源涵养总量以森林生态系统水源涵养作用最为显著,同时也以森林生态系统面积占比最大,占总水源涵养量的55.21%,其中各植被类型水源涵养总量大小为落叶阔叶林>常绿针叶林>常绿阔叶林>落叶针叶林,水源涵养能力从高到低依次为常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林,但由于研究区山高坡陡,土层覆盖较薄的特殊地理条件导致灌丛生态系统的实际水源涵养能力要高于森林生态系统。

(3)考虑到多年平均水源涵养量变化与水源涵养能力现状,结合区内自然保护地,将本区水源涵

养功能重要性依据生态系统服务功能评估中常用的价值核算理论分为 4 级, 按照分级结果来看, 研究区水源涵养极重要区和重要区面积累年平均占总面积的 35%, 水源涵养总量占全区的 53.63%, 主要分布在安泽县南部区域和沿沁河及其支流两岸与大起伏山地过渡地带间的小起伏山地之中; 而一般重要区水源涵养总量仅为  $2.84 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 水源涵养价值相对较低。

## References

- Bai Yiru, Wang Youke, Wang Yong. 2011. Comparative study on calculation methods for reference crop evapotranspiration in hill and gully area of the loess plateau[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 30(4): 31–34 (in Chinese with English abstract).
- Budyko M. 1974. *Cimate and Life* [M]. London: Academic Press.
- Cao Yelin, Song Jinxi, Li Mingyue, Wang Huiyuan. 2020. Evaluation of ecosystem water conservation function of Shaanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34(4): 217–223 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wenhua, Xu Juan, Li Shuangcheng. 2021. Water conservation function of mountainous city in western Yunnan: A case study of Baoshan City[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57(6): 1153–1160 (in Chinese with English abstract).
- Cingolani A M, Poca M, Giorgis M A, Vaieretti M, Gurvich D, Whitworth–Hulse J, Renison D. 2015. Water provisioning services in a seasonally dry subtropical mountain: Identifying priority landscapes for conservation[J]. *Journal of Hydrology*, 525: 178–187.
- Fan Yaning, Liu Kang, Chen Shanshan, Yuan Jiagen. 2017. Spatial pattern analysis on water conservative functionality of land ecosystem in northern slope of Qinling Mountains[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 37(2): 50–56 (in Chinese with English abstract).
- Gong Fei, Luo Yong, Tian Xi, Yu Hui. 2020. Evaluating the importance of water conservation function in Bashang area, Zhangjiakou[J]. *Pratacultural Science*, 37(7): 1337–1344 (in Chinese with English abstract).
- Gong Shihan, Xiao Yang, Zheng Hua, Xiao Yi, Ouyang Zhiyun. 2017. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(7): 2455–2462 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xinya, Du Shixun, Ning Ting, Li Xia, Sang Manjie, Zhang Mengying. 2018. Study on radiation benefit of water conservation function in the headstream area of the Qinhe Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(6): 365–376 (in Chinese with English abstract).
- Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, Li Haixue, Yuan Lei, Liu Jingtao, Shen Haoyong, Zhang Xueqing, Li Changqing, Wu Xi, Ma Tao, Wei Shibo, Zhao Minmin. 2021. Groundwater resource and eco–environmental problem of the Yellow River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1001–1019 (in Chinese with English abstract).
- Hou Xiaochen, Sun Wei, Li Jianguai, Li Quansheng. 2018. The progress of research and forecast on the quantification of the forest water conservation capacity[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 32(1): 121–127 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guangliang, Xu Changjun, Li Xiaoqin, Qi Baozheng. 2021. Spatial pattern of water conservation function in Hehuang Valley[J]. *Ecological Science*, 40(4): 169–176 (in Chinese with English abstract).
- Hoyer R, Chang H. 2014. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization[J]. *Applied Geography*, 53: 402–416.
- Hu Chanjuan, Liu Guohua, Chen Liding, Wu Yaqiong. 2012. Vegetation and soil properties under different vegetation patterns along the slope in the hilly area of the Loess Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 35(5): 787–794 (in Chinese with English abstract).
- Jia Huimin, Hu Qiuqia, Zhang Cong, Zhang Jianguo, Zhang Wensheng, Wu Dingquan, Liu Chunchun, Ma Hui, Zhang Wuchang. 2024. Industrial gas flow obtained from the trial production of No.4 thin coal seam in southern QinshuiBasin, Shanxi Province[J]. *Geology in China*, 51(4): 1447–1448 (in Chinese).
- Lü Aili, Huo Zhiguo, Yang Jianying. 2020. Phenological characteristics of representative woody plants at different altitude sites in Jinnan Region and their response to climate change[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 41(2): 65–75 (in Chinese with English abstract).
- Li Haoyang. 2021. Research on water conservation function of Xiaoxing'an Mountains based on GIS[J]. *Territory & Natural Resources Study*, (2): 50–54 (in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Ren Zhiyuan. 2018. Spatiotemporal change of water conservation value of Loess Plateau ecosystem in northern Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 27(2): 240–244 (in Chinese with English abstract).
- Li Meng, Wang Chuansheng, Zhang Xuefei. 2019. Identification of the candidate areas of ecological protection red lines based on water conservation function in territory spatial planning[J]. *Geographical Research*, 38(10): 2447–2457 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanli. 2014. A brief discussion on the burial and development of coal resources in coal mining enterprises in Qinyuan County[J]. *Huabei Land and Resources*, (4): 103–105 (in Chinese).
- Nie Yihuang, Gong Bing, Li Zhong. 2010. The spatial–temporal variations of water conservation capacity in Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Library and Information Service*, 17(1): 373–377 (in Chinese with English abstract).
- Pessacg N, Flaherty S, Brandizi L, Solman S, Pascual M. 2015. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data[J]. *Science of the Total Environment*, 537: 225–234.
- Qiu Wei, Fan Qingxin, Wang Mingxuan, Han Wentao, Peng Xuexuan.

2014. Amending the hargreaves model based on ecological water[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 46(2): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qinglin, Li Yansen, Guo Jikai, Wu Xiuqin. 2015. Assessment of water conservation function of forest ecosystem in Yunhe County, Zhejiang Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 51(5): 888–896.
- Sun Yijie, Ren Zhiyuan, Zhao Shengnan. 2016. Spatial-temporal difference analysis of ecosystem service trade-off and synergy in the Guanzhong Basin of China[J]. *Resources Science*, 38(11): 2127–2136 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhangtao, Yu Zhengwei, Shu Siqi, Xu Chuangsheng, Shu Yang. 2023. Evaluation of ecosystem services of Chinese provincial land and suggestions for ecological geological survey[J]. *Geology in China*, 50(2): 479–494 (in Chinese with English abstract).
- Wang Baosheng, Chen Huaxiang, Dong Zheng, Zhu Wei, Qiu Quanyi. 2020. Impact of land use change on the water conservation service of ecosystems in the urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian, China, in 2030[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2): 484–498 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoqing. 2022. Definition of water conservation areas in the Yellow River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 42(2): 65 (in Chinese).
- Wang Yao, Chen Ruishan, Guo Chihui, Xia Zilong. 2021. Changes of resource and environmental pattern of the Yellow River Basin in the past 40 years and suggestions on geological work[J]. *Geology in China*, 48(1): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yihao, Li Hongmei. 2019. Climate analysis of Qinyuan County and its impact on agricultural production[J]. *Nongcun Shiyong Jishu*, (8): 116 (in Chinese).
- Wang Youqi, Bai Yiru, Zhan Xiuli. 2013. Application and modification of hargreaves models on the loess plateau[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 32(1): 36–38 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jianshe, Qiao Bin, Chen Guoqian, Shi Feifei, Cao Xiaoyun, Zhu Cunxiong. 2020. Land use change and evolution of ecosystem service value in Maduo County of source region of the Yellow River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2): 510–521 (in Chinese with English abstract).
- Yang Liangchen, Zhang Jianqiang, Yang Xinbing, Ding Jie. 2019. Water consumption analysis on seven dominant arbor tree species in earth and rock mountains in northern China[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 39(3): 69–75 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Potter N, Hickel K, Yongqiang Z, Quanxi S. 2008. Water balance modeling over variable time scales based on the Budykoframework-Model development and testing[J]. *Journal of Hydrology*, 360(1–4): 117–131.
- Zhang L, Dawes W R, Walke G R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 37(3): 701–708.
- Zhang Junyu, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, Zhou Zefu, Zhang Youyan, Lu Xiaoyu, Ma Xijun, Li Guohui. 2012. Reserves and water capacity characteristics of three kinds of litter in loess hilly region of West Shanxi Province[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 40(10): 69–74, 81 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Benxing, PanYun, Li Xiaojuan. 2012. Revision coefficient of hargreaves model and its values in different climatic regions of China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 28(1): 51–54, 113 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Biao, Wang Shuang, Li Qingxu, Xie Gaudi. 2021. Spatio-temporal changes of water conservation service in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(19): 7530–7541 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dan, Liang Kang, Nie Rong, Gu Renying. 2016. Estimation of evapotranspiration and sensitivity to climate and the underlying surface based on the Budyko Framework[J]. *Resources Science*, 38(6): 1140–1148 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Huanyin, Zhu Jinwei, Wang Weihua. 1994. Study of runoff in forest belts and pastures[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 8(2): 56–61 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo Jing, He Huijuan, Zou Jiye. 2017. Characteristics of water conservation in Qinling forest area in recent 15 a[J]. *Library and Information Service*, 34(3): 604–612 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Qiting, Wang Jiaoyang, Yang Feng, Song Quanxiang. 2022. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 42(2): 13–19 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 白一茹, 汪有科, 汪勇. 2011. 黄土高原丘陵沟壑区多种参考作物需水量模型对比分析[J]. *灌溉排水学报*, 30(4): 31–34.
- 曹叶琳, 宋进喜, 李明月, 王辉源. 2020. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J]. *水土保持学报*, 34(4): 217–223.
- 陈文华, 徐娟, 李双成. 2021. 滇西山地城市水源涵养功能研究-以保山市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 57(6): 1153–1160.
- 范亚宁, 刘康, 陈姗姗, 袁家根. 2017. 秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的空间格局[J]. *水土保持通报*, 37(2): 50–56.
- 巩飞, 罗勇, 田犀, 于慧. 2020. 张家口坝上地区水源涵养功能的重要性评估[J]. *草业科学*, 37(7): 1337–1344.
- 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 2017. 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*, 37(7): 2455–2462.
- 郭新亚, 杜世勋, 宁婷, 李霞, 桑满杰, 张梦莹. 2018. 沁河源区水源涵养功能辐射效益研究[J]. *水土保持研究*, 25(6): 365–376.
- 韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 2021. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. *中国地质*, 48(4): 1001–1019.

- 侯晓臣, 孙伟, 李建贵, 李全胜. 2018. 森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 32(1): 121-127.
- 侯光良, 许长军, 李晓勤, 戚宝正. 2021. 河湟谷地水源涵养功能空间格局研究[J]. 生态科学, 40(4): 169-176.
- 胡婵娟, 刘国华, 陈利顶, 吴雅琼. 2012. 黄土丘陵区坡面尺度上不同植被格局下植物群落和土壤性质研究[J]. 干旱区地理, 35(5): 787-794.
- 贾慧敏, 胡秋嘉, 张聪, 张建国, 张文胜, 吴定泉, 刘春春, 马辉, 张武昌. 2024. 山西省沁水盆地南部 4# 煤薄煤层试采获得煤层气工业气流[J]. 中国地质, 51(4): 1447-1448.
- 吕爱丽, 霍治国, 杨建莹. 2020. 晋南地区不同海拔高度典型木本植物物候特征及其对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 41(2): 65-75.
- 李浩洋. 2021. 基于 GIS 的小兴安岭地区水源涵养功能研究[J]. 国土与自然资源研究, (2): 50-54.
- 李晶, 任志远. 2008. 陕北黄土高原生态系统涵养水源价值的时空变化[J]. 生态学杂志, 27(2): 240-244.
- 李萌, 王传胜, 张雪飞. 2019. 国土空间规划中水源涵养功能生态保护红线备选区的识别[J]. 地理研究, 38(10): 2447-2457.
- 李艳丽. 2014. 浅谈沁源县煤矿企业煤炭资源的埋藏与开发[J]. 华北国土资源, (4): 103-105.
- 聂忆黄, 龚斌, 李忠. 2010. 青藏高原水源涵养能力时空变化规律[J]. 地学前缘, 17(1): 373-377.
- 邱微, 樊庆铤, 王明轩, 韩文滔, 彭雪璇. 2014. 基于生态用水的 HARGREAVES 模型修正[J]. 哈尔滨工业大学学报, 46(2): 21-25.
- 孙清琳, 李延森, 郭继凯, 吴秀芹. 2015. 云和县森林生态系统水源涵养功能评估. 北京大学学报(自然科学版), 51(5): 888-896.
- 孙艺杰, 任志远, 赵胜男. 2016. 关中盆地生态服务权衡与协同时空差异[J]. 资源科学, 38(11): 2127-2136.
- 孙张涛, 余正伟, 舒思齐, 许闯胜, 舒阳. 2023. 中国省域生态系统服务价值评价与生态地质调查工作建议[J]. 中国地质, 50(2): 479-494.
- 王保盛, 陈华香, 董政, 祝薇, 邱全毅, 唐立娜. 2020. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响[J]. 生态学报, 40(2): 484-498.
- 王国庆. 2022. 黄河流域水源涵养区界定[J]. 水文, 42(2): 65.
- 王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 夏子龙. 2021. 近 40 年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议[J]. 中国地质, 48(1): 1-20.
- 王一豪, 李红梅. 2019. 沁源县气候分析及对农业生产的影响[J]. 农村实用技术, (8): 116.
- 王幼奇, 白一茹, 展秀丽. 2013. Hargreaves 模型在黄土高原地区的应用与改进[J]. 灌溉排水学报, 32(1): 36-38.
- 肖建设, 乔斌, 陈国茜, 史飞飞, 曹晓云, 祝存兄. 2020. 黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J]. 生态学报, 40(2): 510-521.
- 杨良辰, 张健强, 杨新兵, 丁杰. 2019. 华北土石山区 7 种优势乔木树种耗水分析[J]. 中南林业科技大学学报, 39(3): 69-75.
- 张君玉, 程金花, 张洪江, 周泽福, 张友焱, 陆晓宇, 马西军, 李国会. 2012. 晋西黄土丘陵区 3 个树种人工林枯落物的持水特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 40(10): 69-74, 81.
- 张本兴, 潘云, 李小娟. 2012. 中国不同气候区域 Hargreaves 模型的修正[J]. 地理与地理信息科学, 28(1): 51-54, 113.
- 张彪, 王爽, 李庆旭, 谢高地. 2021. 京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空变化分析[J]. 生态学报, 41(19): 7530-7541.
- 张丹, 梁康, 聂茸, 顾人颖. 2016. 基于 Budyko 假设的流域蒸散发估算及其对气候与下垫面的敏感性分析[J]. 资源科学, 38(6): 1140-1148.
- 赵焕胤, 朱劲伟, 王维华. 1994. 林带和牧草地径流的研究[J]. 水土保持学报, 8(2): 56-61.
- 卓静, 何慧娟, 邹继业. 2017. 近 15 a 秦岭林区水源涵养量变化特征[J]. 干旱区研究, 34(3): 604-612.
- 左其亭, 王娇阳, 杨峰, 宋全香. 2022. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. 水利水电科技进展, 42(2): 13-19.