

黄河水源涵养区生态系统服务要素时空演变及 权衡与协同分析

鞠 琴^{1,2}, 卜媛媛^{1,2}, 申同庆^{1,2}, 蔡辉艺³, 王乐扬^{1,2}, 金君良^{1,2}, 于 磊⁴, 格桑卓嘎^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;
3. 福州市可持续发展城市研究院有限公司, 福建 福州 350108; 4. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要:为探究黄河水源涵养区生态系统服务的时空演变规律,采用 InVEST 模型对 2000—2020 年黄河水源涵养区碳储量、土壤保持、生境质量、产水能力和水源涵养 5 个生态系统服务要素进行计算,并分析了各要素的时空演变特征和相互间的权衡与协同关系。结果表明:2000—2020 年黄河水源涵养区产水能力、水源涵养量、土壤保持量呈现一致波动时间变化趋势,生境质量、碳储量整体呈下降趋势;各生态系统服务要素之间存在不同程度的协同相关性,其中,土壤保持与产水能力和土壤保持与碳储量间协同关系最强,其他要素之间呈现中等或弱协同关系;5 个生态系统服务要素与土地利用类型密切相关,不同土地利用类型下的各项生态系统服务要素差异较大;各项生态系统服务要素间以协同为主,整体协同关系在时间上呈波动轻微增强趋势,空间分布上中南部草地以高-高协同为主,低-低协同主要分布在北部地区草地和林地,高-低和低-高权衡主要分散在东西部地区的耕地和建设用地。

关键词:生态系统服务要素;权衡与协同;InVEST 模型;黄河水源涵养区

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0038-09

Spatiotemporal evolution and trade-off and synergy analysis of ecosystem service factors in the Yellow River water conservation area//JU Qin^{1,2}, BU Yuanyuan^{1,2}, SHEN Tongqin^{1,2}, CAI Huiyi³, WANG Yueyang^{1,2}, JING Junliang^{1,2}, YU Lei⁴, GESANG Zhuoga^{1,2}(1. *National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Fuzhou Research Institute of Sustainable Development in Cities Ltd., Fuzhou 350108, China*; 4. *Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China*)

Abstract: To explore the spatiotemporal evolution patterns of ecosystem services in the water conservation area of the Yellow River, the InVEST model was employed to calculate five ecosystem service factors from 2000 to 2020, including carbon storage, soil retention, habitat quality, water yield capacity, and water conservation. The spatiotemporal evolution characteristics of these factors and their trade-offs and synergies were analyzed. The results indicate that from 2000 to 2020, the water yield capacity, water conservation, and soil retention in the Yellow River water conservation area exhibited consistent fluctuations, while habitat quality and carbon storage showed an overall declining trend. There were varying degrees of synergistic correlations between the ecosystem service factors, with the strongest synergies observed between soil retention and water yield capacity, as well as between soil retention and carbon storage. Other factors exhibited moderate or weak synergistic relationships. The five ecosystem service factors were closely related to land use types, and there are significant differences in each factor under different land use types. Synergies dominated between the various ecosystem service factors, with the overall synergistic relationship showing a slight fluctuating upward trend over time. In terms of spatial distribution, the grasslands in the central and southern regions were dominated by high-high synergies, while low-low synergies were primarily found in the grasslands and forests of the northern region. High-low and low-high trade-offs were mainly scattered in cultivated lands and construction lands in the eastern and western regions.

Key words: ecosystem service factor; trade-off and synergy; InVEST model; the Yellow River water conservation region

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3201104);江苏省大学生创新创业项目(2024102941103,202410294243Y)

作者简介:鞠琴(1980—),女,副教授,博士,主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail:juqin@hhu.edu.cn

生态系统服务是“人类从自然生态系统中获得的多种利益”或“生态系统对人类福祉及效益产生的直接或间接正面效益”^[1-2],其多样性、空间分布的非均衡性以及人类活动的选择性使用,导致各项生态系统服务要素之间关系的动态调整,具体表现为一种服务要素增强时可能伴随另一种服务要素的减弱(权衡),以及服务要素之间可能存在的相互促进(协同)的形式。探究生态系统服务的动态及其权衡与协同机制,对于确保流域水资源安全、推动生态环境修复、支撑经济高质量发展以及应对全球气候变化等均有重要意义。

遥感等空间信息数据以及空间化方法的出现和进步,促进了生态系统服务价值评估的发展^[3]。目前常用的生态系统服务价值评估方法有物质转换法和能值转换法。物质转换法又可分为最终物质转换法和中间物质转换法^[4],InVEST模型是基于最终物质转换法开展生态系统服务价值评估的生态模型,具有量化、空间可视化的特点,多用于流域等大尺度研究,也是国内外应用研究最多且发展最为成熟的生态系统服务价值评估模型^[5]。Nelson等^[6]应用InVEST模型探讨了生态系统服务的空间变化及土地利用在俄勒冈州威拉米特盆地的演变;Fisher等^[7]采用InVEST模型对坦桑尼亚森林不同情景下的生态系统决策方案进行评估;巩杰等^[8]基于InVEST模型对甘肃白龙江流域食物供给等生态系统服务要素之间多尺度均衡及成因进行了分析;杨洁等^[9]探究了黄河流域各项生态系统服务要素的权衡与协同时空差异,并未分析空间聚集关系;庞彩艳等^[10]分析了黄河上游生态系统服务随时间和空间变化的特征及服务要素之间权衡与协同相互作用。然而,目前有关生态系统服务方面的研究,大多数聚焦于研究区域或者部分评价单元,较少考虑不同子流域下垫面的差异性,对土地利用变化下生态系统服务的分析有待进一步深入。

近年来,随着全球气候变化和人类活动的不断加剧,生态系统服务面临前所未有的挑战。2021年10月8日发布的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中明确指出黄河水源涵养区为黄河流域重点生态功能区^[11],是黄河流域的主要产流区,其天然径流量占黄河流域的84%^[12]。黄河水源涵养区作为重要的生态屏障,其生态系统服务功能已受到严重损害,直接影响到流域内及下游地区的可持续发展。而作为黄河水资源的重要来源,黄河水源涵养区对于保障黄河流域水资源供需具有决定性意义。本文聚焦黄河水源涵养区,运用InVEST模型并结合双变量局部空间自相关等方法,分析2000—

2020年黄河水源涵养区碳储存、产水能力、生境质量、水源涵养和土壤保持5个生态系统服务关键要素的时空演变特征,探究不同土地利用类型下生态系统服务要素差异性及各要素间的权衡与协同关系,以期为黄河流域生态环境可持续发展提供有价值的参考信息。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河水源涵养区(32°N~39°N、96°E~114°E)横跨6个省区,面积为30.44万km²^[13],地势西高东低。该区域位于青藏高原和黄土高原过渡带,东北邻祁连山脉、南邻秦岭,大部分地区属于干旱半干旱地区。黄河水源涵养区流域面积占黄河流域的38.3%^[14],包括黄河源区、唐乃亥—兰州地区以及渭河—伊洛河流域(图1),多年平均降水量494mm^[15-17],降水量由东南向西北递减。黄河水源涵养区作为黄河流域最重要的生态功能区,生态环境较为脆弱。

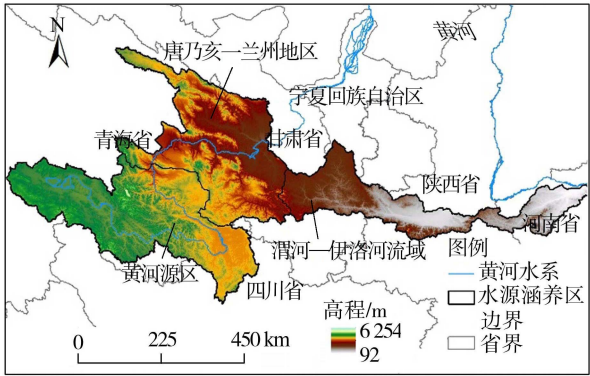


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

研究数据包括土地利用数据、降水数据、潜在蒸散发数据、数字高程数据、土壤数据^[18]和根系深度数据等,具体数据类型及来源如表1所示。

2 研究方法

2.1 InVEST模型

InVEST模型由世界自然基金会、大自然保护协会和其他相关机构共同开发^[19]。该模型在国内外得到广泛应用且具有较高的可靠性,能够综合评估区域的生态系统服务状况^[20]。其涵盖了淡水、海洋、陆地三大生态系统评估模块,能评估产水能力、水源涵养、碳储量、生境质量和土壤保持的生态系统服务时空演变。这些关键要素在生态系统服务中扮演着至关重要的角色,能够全面反映生态系统的整

表 1 数据类型及来源
Table 1 Data type and source

数据类型	数据来源	数据精度/m	数据预处理
土地利用数据	资源环境科学数据平台 (https://www.resdc.cn/)	1 000×1 000	使用 ArcGIS 重分类工具将土地利用二级分类划分为一级分类
降水、潜在蒸散发数据	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)	1 000×1 000	使用 ArcGIS 打开网络通用格式文件,将逐月数据处理为逐年数据,并进行单位转化
数字高程数据	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)	90×90	使用 ArcGIS 裁剪出流域边界
土壤数据	北京大学地理数据平台世界土壤数据库 (https://geodata.pku.edu.cn/)	1 000×1 000	使用土壤数据并利用周文佐 ^[18] 提出的公式计算土壤有效含水量
根系深度数据	中山大学陆气相互作用研究组 (http://globalchange.bnu.edu.cn/research/cdtb.jsp)	1 000×1 000	使用 ArcGIS 裁剪功能提取研究区域

体状况和健康状况。通过对上述要素的研究和监测,可以深入了解生态系统的功能和稳定性,为生态保护和管理提供科学依据。

2.1.1 产水能力

InVEST 模型产水能力模块计算公式^[21]为

$$Y = (1 - ET/P)P \quad (1)$$

$$Z = (w - 1.25)P/W_A \quad (2)$$

式中: Y 为年产水能力; ET 为实际年蒸散发量; P 为年降水量; Z 为季节常数; w 为 Budyko 水热耦合平衡方程的参数; W_A 为研究区植物可利用水量,根据土壤质地和土壤有效深度计算。

2.1.2 水源涵养

模型得到的产水能力需利用地形指数等修正为水源涵养量,修正公式^[22-24]为

$$W = \min(1, 249/e) \min(1, K_{\text{sat}}/300) \min(1, 0.9T/3) Y \quad (3)$$

式中: W 为水源涵养量; e 为流速系数; K_{sat} 为土壤饱和和导水率; T 为地形指数。

2.1.3 碳储量

InVEST 模型固碳模块依据不同土地利用碳库的平均碳密度,结合评估面积计算碳储量。该模块生物物理表参考杨洁^[25]研究中的参数,计算公式^[26]为

$$C_{\text{tot}} = (C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}})A \quad (4)$$

式中: C_{tot} 为总碳储量; A 为土地利用类型的面积; C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别为土地利用类型的地上和地下生物炭、土壤碳和死亡有机碳。

2.1.4 生境质量

InVEST 模型的生境质量模块基于土地利用数据地图,评估不同威胁源(如城市扩张、农业活动、道路建设等)对生境质量的相对影响程度,计算公式^[27]为

$$Q_j = H_j [1 - D_j^\alpha / (D_j^\alpha + k^\alpha)] \quad (5)$$

式中: Q_j 为土地利用类型 j 的生境质量; H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜性,通常为介于 0 和 1 之间的

值; D_j 为土地利用类型 j 的生境退化度; α 为归一化常量,通常取值为 2.5; k 为半饱和常数。

2.1.5 土壤保持

InVEST 模型的土壤保持模块基于像元尺度的土壤水土流失方程计算土壤保持量,该模块生物物理表参考任会源^[28]研究中的参数。计算公式为

$$c = L_S - L_E \quad (6)$$

其中

$$L_S = RKS \quad L_E = RKSME$$

式中: c 为土壤保持量; L_S 、 L_E 分别为潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力; K 是土壤可蚀性; S 为坡度坡长因子; M 为作物/植被覆盖和管理因子; E 为工程措施因子。

2.2 权衡与协同关系分析

2.2.1 相关性分析

采用 Pearson 相关性分析测算不同生态系统服务要素间的权衡与协同关系。若相关系数(r)未通过显著性检验,则两者关系不显著;若相关系数通过显著性检验后为正,则两者为协同关系;若相关系数通过显著性检验后为负,则两者为权衡关系^[10]。当 $0.5 \leq r \leq 1$ 时,表示协同关系较强;当 $0.3 \leq r < 0.5$ 时,表示协同关系为中等强度;当 $0 < r < 0.3$ 时表示弱协同关系。

2.2.2 双变量空间自相关分析

为探究黄河水源涵养区不同生态系统服务要素两两之间的权衡与协同关系的空间情况,用局部莫兰指数评估空间自相关^[29],该指数揭示某空间单元上的特征值与邻接空间单元上对应特征值的相关状况和空间集聚特征。莫兰指数大于 0 表示生态系统服务要素两两之间呈协同关系的高-高协同或低-低协同;莫兰指数小于 0 表示生态系统服务要素两两之间呈权衡关系的高-低权衡或低-高权衡。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务要素的时空分布特征

3.1.1 产水能力

InVEST 模型产水能力模块中的季节常数 Z 是

一个非常重要的经验参数,反映了当地降水和水文地质特征,一般在1~30之间,参考杨洁等^[28]的研究,本文取 $Z=3.6$ 。模型模拟得到的产水能力随时间的变化如表2所示。2000—2020年黄河水源涵养区平均年产水能力为382.03 mm,平均年产水量为1121.3亿 m^3 ,年产水能力呈波动轻微上升趋势。总体上,2020年产水能力较2000年提升了55.68 mm,增幅为15.77%。2000—2005年产水能力提升了71.04 mm,增幅为20.13%;2005—2015年产水能力持续下降了86.06 mm,降幅为20.30%;2015—2020年产水能力回升,提升了70.7 mm,增幅为20.92%。

表2 5个生态系统服务要素变化

Table 2 Changes of five ecosystem service factors

年份	产水能力/mm	水源涵养量/mm	碳储存/(t/km ²)	生境质量	土壤保持量/(万t/km ²)
2000	352.97	22.88	6441.41	0.8489	0.902360
2005	424.01	28.18	6423.54	0.8490	1.123326
2010	386.59	24.94	6419.73	0.8487	1.003534
2015	337.95	20.82	6408.24	0.8480	0.850991
2020	408.65	25.18	6399.00	0.8472	1.115267

黄河水源涵养区产水能力空间分布如图2所示。从空间分布看,2000—2020年产水能力表现为北低南高,西北低、东南高的空间格局,其中,2005年和2020年黄河源区南部地区产水能力提升显著,高值区域显著向北扩张。

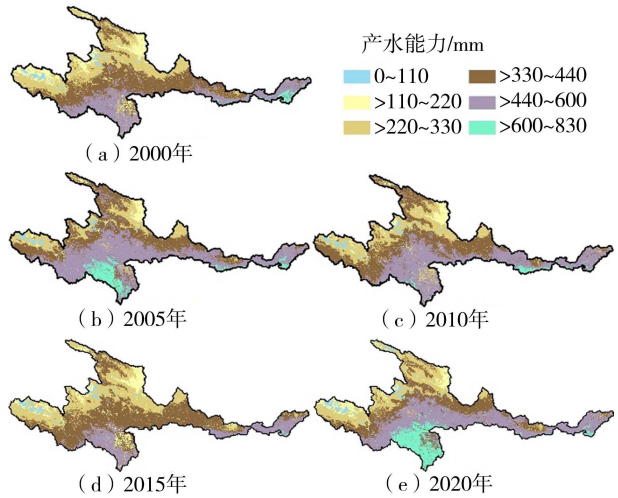


图2 产水能力空间分布

Fig.2 Spatial distribution of water yield capacity

3.1.2 水源涵养

2000—2020年黄河水源涵养区年平均水源涵养量为24.4 mm,变化趋势与产水能力相似,但呈波动轻微下降趋势,与岁姚炳等^[15]研究结果的空间分布相似。从表2可以看出,2020年水源涵养量较2000年增加了2.3 mm,增幅为10.05%。2000—2005年水源涵养量增加了5.3 mm,增幅为

23.16%;2005—2015年水源涵养量持续减少了7.36 mm,降幅为26.12%;2015—2020年水源涵养量回升,增加了4.36 mm,增幅为20.94%。

黄河水源涵养区水源涵养量空间分布如图3所示。从空间分布看,2000—2020年水源涵养量呈现西南高、东北低的格局。水源涵养量较高的区域主要集中在黄河源区,同时渭河—伊洛河流域的东部也呈现出高值分布的特征。水源涵养量低值区则主要分布在唐乃亥—兰州地区的东北部以及渭河—伊洛河流域的西部。岁姚炳等^[15]基于InVEST模型对黄河水源涵养区的水源涵养量进行了分析,与本文研究结果基本一致。

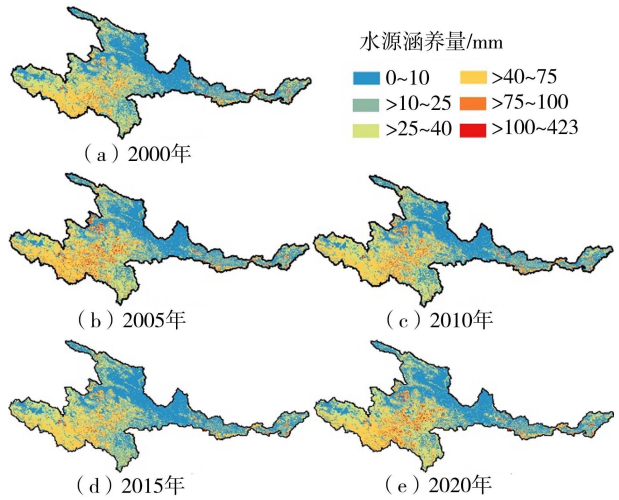


图3 水源涵养量的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of water conservation

3.1.3 碳储量

2000—2020年黄河水源涵养区年平均碳储量为6418.38 t/km²,碳储量呈持续显著下降的趋势,从6441.41 t/km²下降到6399.00 t/km²,降幅为0.66%。从表2可以看出,2000—2005年,碳储量下降幅度最大,由6441.41 t/km²降至6423.54 t/km²,降幅为0.28%。

黄河水源涵养区碳储量空间分布如图4所示。2000—2020年碳储量空间分布中,高值区(>6750~9622 t/km²)和较低值区(>840~6340 t/km²)广泛分布在渭河—伊洛河流域地区;较高值区(>6340~6750 t/km²)主要分布在黄河源区和唐乃亥—兰州地区;低值区(>650~840 t/km²)离散分布在黄河源区与唐乃亥—兰州地区。碳储量主要受到土地利用类型的影响,林地、草地碳储量最高,少部分低值区出现在水域和未利用地的地区。

3.1.4 生境质量

2000—2020年黄河水源涵养区生境质量年平均值为0.8484,生境质量呈显著下降的趋势,从

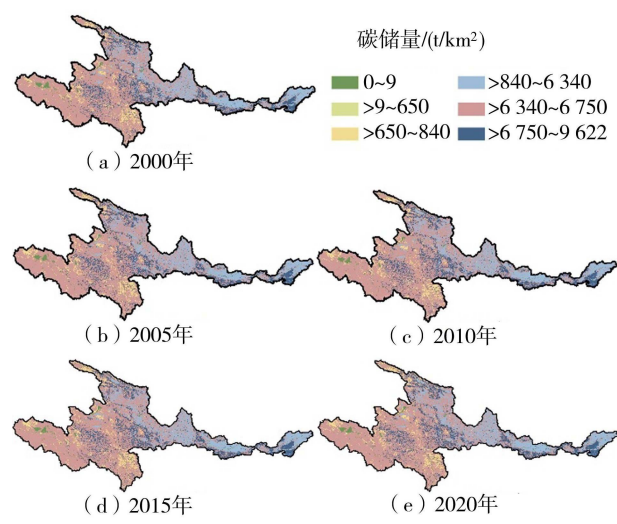


图4 碳储量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage

0.8489 下降到 0.8472, 降幅为 0.20%。从表 2 可以看出, 2000—2005 年生境质量轻微上升, 增幅仅为 0.012%。2005—2020 年生境质量持续下降, 从 0.8490 降至 0.8472, 降幅为 0.212%。

黄河水源涵养区生境质量空间分布如图 5 所示。从空间分布看, 2000—2020 年生境质量高值区分布广泛, 主要在黄河源区, 少部分低值区则分布在渭河—伊洛河流域, 呈现西高东低的趋势。

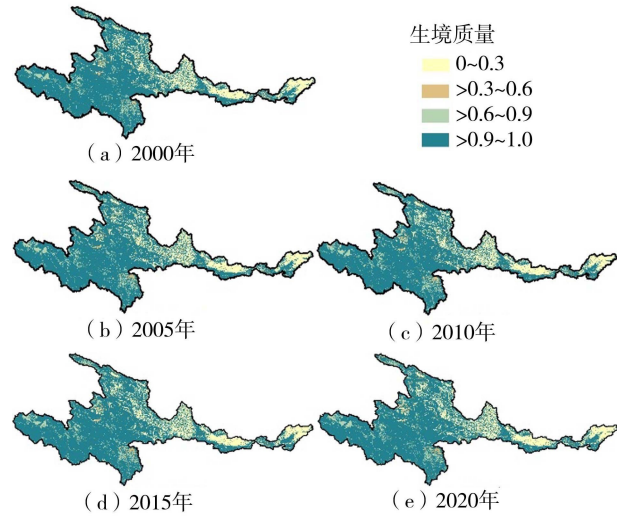


图5 生境质量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of habitat quality

3.1.5 土壤保持

2000—2020 年黄河水源涵养区土壤保持量年平均值为 9990.96 t/km², 土壤保持量呈波动轻微上升趋势, 从 9023.6 t/km² 上升至 11152.67 t/km², 土壤保持量增幅为 23.60%。从表 2 可以看出, 2000—2005 年增加量为 2209.66 t/km², 增幅为 24.49%; 2005—2015 年持续下降, 减少量为 2723.35 t/km², 降幅为 24.24%; 2015—2020 年土壤保持量有所回

升, 增加量为 2642.76 t/km², 增幅为 31.06%。

黄河水源涵养区土壤保持量空间分布如图 6 所示。从空间分布来看, 2000—2020 年土壤保持量高值区广泛分布于 3 个分区, 而低值区主要集中在黄河源区西部和东南部、唐乃亥—兰州地区的西北地区以及渭河—伊洛河流域的中部。此外, 空间分布的年际变化差异较小。

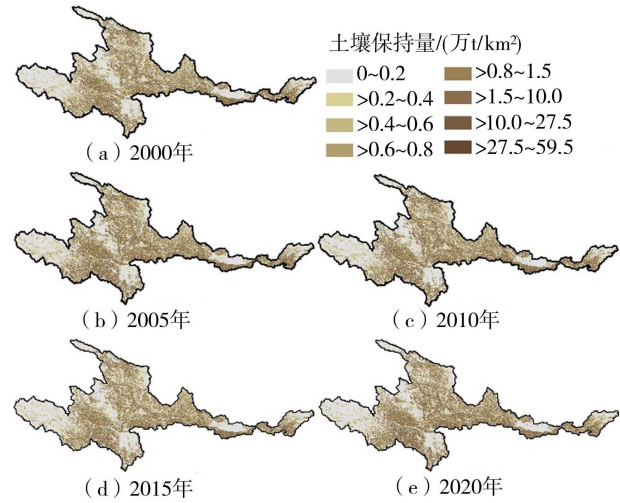


图6 土壤保持量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of soil retention

3.2 生态系统服务要素间权衡与协同关系

3.2.1 关联特征

黄河水源涵养区产水能力、水源涵养、碳储量、生境质量和土壤保持 5 个生态系统服务要素间相关性分析结果如图 7 所示。总体上, 2000—2020 年 5 个生态系统服务要素间存在不同程度的协同相关性, 要素间相关系数均通过 0.01 水平上的显著性检验且为正, 反映出要素间相互促进的特征。其中土壤保持与产水能力、土壤保持与碳储量呈较强协同关系 ($r \geq 0.5$); 产水能力与水源涵养、碳储量与产水能力、生境质量与水源涵养、生境质量与碳储量呈中等协同关系 ($0.3 \leq r < 0.5$); 其他生态系统服务要素间以低协同关系为主 ($r < 0.3$), 其中, 生境质量与产水能力、土壤保持与水源涵养相关系数 $r \leq 0.15$ 。2000—2020 年整体上黄河水源涵养区不同生态系统服务要素间相关系数随着时间推移呈现出不同程度的轻微上升, 其中生境质量与产水能力协同关系波动较为明显。

3.2.2 空间分布

为探讨空间层面上生态系统服务要素间的权衡与协同关系, 采用双变量空间自相关分析 2000—2020 年黄河水源涵养区不同生态系统服务要素间的空间聚集关系, 空间分辨率取 5 km×5 km。在权衡与协同关系空间分布中 (图 8), 局部莫兰指数值大

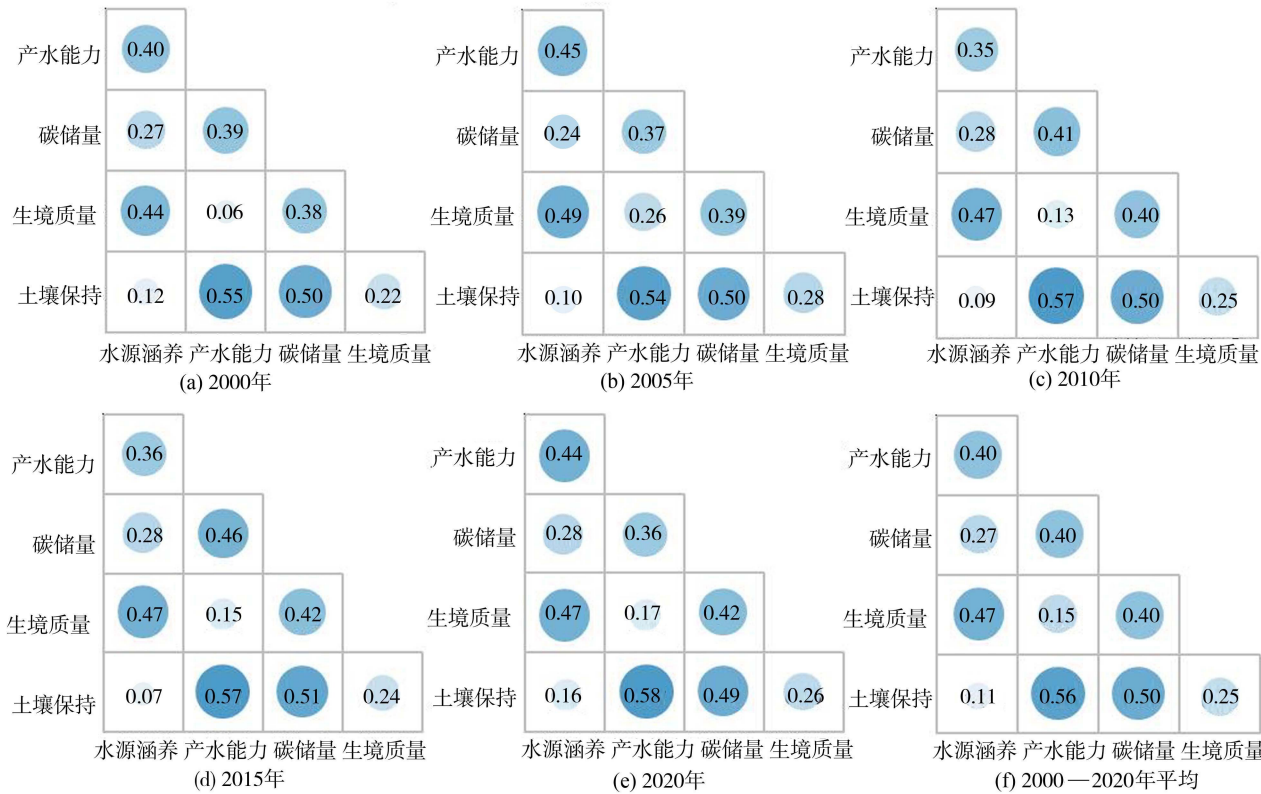
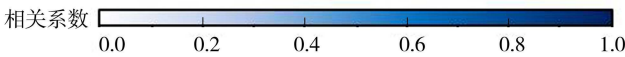


图 7 不同生态系统服务要素间相关性分析结果

Fig. 7 Results of correlation analysis between different ecosystem service factors

于 0 表示不同生态系统服务要素两两之间为高-高协同与低-低协同,指数值小于 0 表示两两之间为高-低权衡与低-高权衡。

从图 8 可以看出,产水能力与水源涵养协同区域较多,权衡区域零散分布在研究区东西部;产水能力与土壤保持协同区域稍多,分布在研究区西北和东南部;产水能力与生境质量协同与权衡区域都较

多,协同区域主要分布在黄河源区且以高-高协同为主;产水能力与碳储量权衡与协同区域较少且分散,协同区域主要分布在研究区中部和东部;水源涵养与土壤保持、水源涵养与碳储量权衡与协同区域较少且分散;水源涵养与生境质量协同区域较多;土壤保持与生境质量协同区域为中部和南部的高-高协同,权衡区域分布在研究区东西部;土壤保持与碳储

■ 高-高协同 ■ 低-低协同 ■ 低-高权衡 ■ 高-低权衡

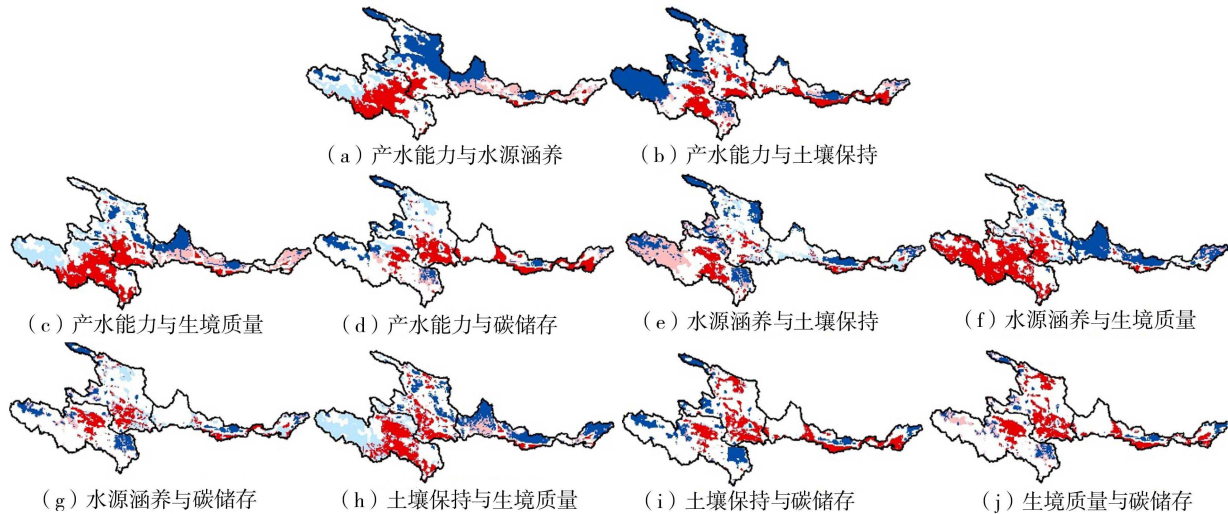


图 8 生态系统服务要素间权衡与协同关系空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of ecosystem service factor trade-off and synergistic relationships

量、生境质量与碳储量大部分为协同区域,且分布较为分散。

从区域整体分析,各生态系统服务要素间以协同关系为主,高-高协同主要分布在中南部地区,低-低协同主要分布在北部地区;权衡区域主要分散在东西部地区。产水能力与土壤保持、水源涵养与生境质量、土壤保持与碳储量生态系统服务要素间主要以协同区域为主,很少有权衡区域;产水能力与生境质量、水源涵养与土壤保持生态系统服务要素间权衡与协同区域所覆盖的面积大致持平。

3.3 土地利用对生态系统服务要素的影响

土地利用变化会直接影响生态系统的内在规律和功能,从而进一步影响生态系统服务的供给和分布。为进一步探究不同土地利用类型下各生态系统服务要素的空间变化特征,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地(图9),计算了黄河水源涵养区2000年和2020年土地利用类型的面积占比及变化率(表3)。从图9可以看出,研究区土地利用类型分布存在地区性特点,黄河源区和唐乃亥—兰州地区土地利用类型主要以林地和草地为主,且处于高寒地区,受人类活动的影响程度较低,土地利用类型变化相对较平缓;渭河中上游流域东部主要分布为耕地和建设用地,伊洛河流域西部以草地和林地为主,东部则以耕地和建设用地为主。

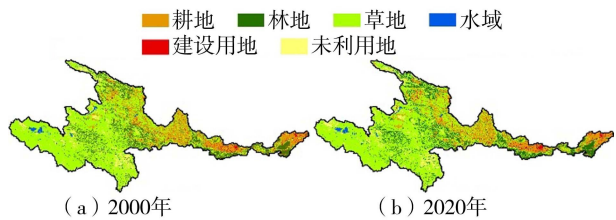


图9 土地利用类型空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of land use types

表3 土地利用类型面积占比及变化率

Table 3 Area proportion and change rate of land use types

土地利用类型	面积/km ²		面积占比/%		面积变化率/%
	2000年	2020年	2000年	2020年	
耕地	44 940.97	43 235.08	15.31	14.73	-3.80
林地	42 910.48	43 025.85	14.62	14.66	0.27
草地	177 545.31	176 741.48	60.50	60.22	-0.45
水域	4 977.97	5 208.18	1.70	1.77	4.62
建设用地	4 279.44	5 741.26	1.46	1.96	34.16
未利用地	18 832.67	19 534.98	6.42	6.66	3.73

2000—2020年黄河水源涵养区的产水能力、水源涵养量、土壤保持量呈现一致波动时间变化趋势,该结果与朱春霞等^[30]的研究结果基本一致。产水能力高值区出现在南部,呈现出由南向北递减趋势,

与降水量从南向北递减趋势相近,而西北部即祁连山地区的潜在蒸散量较少,可能是导致该地区产水能力出现高值回升的原因。人类活动较多的建筑用地和耕地区域是土壤保持量的低值区,从时间尺度分析,土壤保持量与产水能力变化趋势呈现出较高的一致性,因此,气候变化间接影响土壤保持,而地形条件和气候变化是影响土壤保持的重要因素。水源涵养量高值区出现在西南地区,该地区降水多,潜在蒸散量较少,且多为高原草地和少部分林地,人类活动较少,水土保持丰茂,因此,下垫面条件与气候因素是水源涵养的主控因素,这与杨洁等^[31]研究结果一致。2000—2020年黄河流域大面积耕地、草地转化为建设用地、未利用地,导致研究区土壤植被地上、地下碳储量显著减少。从空间上看,碳储量高值区主要在草地林地区域,低值区在水域和未利用地。2000—2020年黄河水源涵养区生境质量呈现先增加后持续减少且整体下降的趋势,其原因为期间该地区经济发展迅速,城市化扩张,受人类活动的影响,建筑用地和未利用地快速增加,造成威胁因子增加、栖息地适应性下降^[32]。从空间上分析生境质量的演变趋势可以发现,大部分区域呈现高值,主要是因为黄河源区的青藏高原和秦岭山区植被茂盛,草地林地覆盖广袤,而少部分低值区主要为耕地、水域、未利用地、建筑用地等人类活动活跃的区域。因此,人类活动和下垫面类型是导致生境质量变化的重要因素。

4 结 论

a. 2000—2020年黄河水源涵养区产水能力、水源涵养量、土壤保持量呈现一致波动时间变化趋势,生境质量、碳储量整体呈下降趋势;空间上产水能力、水源涵养大致呈现南高北低的分布,碳储量、生境质量大致呈现西高东低的分布。

b. 2000—2020年,不同生态系统服务要素间相关系数均通过0.01水平上的显著性检验,各生态系统服务要素两两之间存在不同程度的协同相关性,生态系统服务要素间相互促进,其中,土壤保持与产水能力、土壤保持与碳储量多年平均协同关系最强($r \geq 0.5$),生境质量与产水能力、土壤保持与水源涵养多年平均协同关系最弱($r \leq 0.15$),其他要素间的相关关系为中等或弱协同关系。

c. 生态系统服务的5个要素与土地利用类型密切相关,不同土地利用类型下的生态系统服务要素差异较大。各生态系统服务要素间以协同关系为主,高-高协同主要分布在中南部地区,该地区土地利用类型以草地为主,低-低协同主要分布在北部地

区,以草地和林地为主。以权衡关系为主的区域主要分散在东西部地区,以耕地和建设用地为主。

参考文献:

[1] REIDWV,MOONEYHA, CROOPER A,et al. Ecosystems and human well-being:synthesis[M]. Washington, D. C. : Island Press,2005.

[2] BOCKSTAEL N E, MICHAELHANEMANN W, KLING C L. Estimating the value of water quality improvements in a recreational demand framework [J]. Water Resources Research,1987,23(5):951-960.

[3] SUTTON P C, COSTANZA R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery,land cover,and ecosystem service valuation[J]. Ecological Economics,2002,41(3):509-527.

[4] 李丽,王心源,骆磊,等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. 生态学杂志,2018,37(4):1233-1245. (LI Li, WANG Xinyuan, LUO Lei, et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment[J]. Chinese Journal of Ecology 2018,37(4):1233-1245. (in Chinese))

[5] 李情,刘艳,莫明浩,等. 流域生态服务价值量化研究综述[J]. 水土保持应用技术,2021(2):54-57. (LI Qing, LIU Yan, MO Minghao, et al. Review on quantification of ecological service value in river basin[J]. Technology of Soil and Water Conservation,2021(2):54-57)

[6] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at land scape scales [J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2009,7(1):4-11.

[7] FISHER B, KERRYTURNER R, BURGESS N D, et al. Measuring,modeling and mapping ecosystem services in the Eastern Arc Mountains of Tanzania [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2011, 35(5):595-611.

[8] 巩杰,柳冬青,高秉丽,等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系:以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报,2020,31(4):1278-1288. (GONG Jie, LIU Dongqing, GAO Bingli, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China;a case study of the Bailongjiang watershed in Gansu,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(4):1278-1288. (in Chinese))

[9] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性[J]. 中国沙漠,2021,41(6):78-87. (YANG Jie, XIE Baopeng, ZHANG Degang. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem services trade-off synergy in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research,2021,41(6):78-87. (in Chinese))

[10] 庞彩艳,文琦,丁金梅,等. 黄河上游流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J]. 生态学报,2024,44(12):5003-5013. (PANG Caiyan, WEN Qi, DING Jinmei, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in the upper reaches of the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (12): 5003-5013. (in Chinese))

[11] 鞠琴,刘小妮,刘娣,等. 基于遥感和通量观测的实际蒸发发时空变化特征:以黄河流域水源涵养区为例[J]. 水科学进展,2024,35(2):338-347. (JU Qin, LIU Xiaoni, LIU Di, et al. Spatiotemporal variation characteristics of actual evapotranspiration based on remote sensing and flux observations: case study in the water conservation area of the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (2): 338-347. (in Chinese))

[12] 王国庆,张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护,2024,40(2):1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area[J]. Water Resources Protection,2024,40(2):1-8. (in Chinese))

[13] 梁康,公丽,宋小青,等. 黄河水源涵养区土地利用变化的区域分异特征及未来格局[J]. 水科学进展,2024,35(2):325-337. (LIANG Kang, GONG Li, SONG Xiaoqing, et al. Regional differentiation and future patterns of land use changes in the water conservation zone of the Yellow River [J]. Advances in Water Science,2024,35(2):325-337. (in Chinese))

[14] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. 水资源保护,2024,40(3):106-115. (JU Qin, WU Jinyu, WANG Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 106-115. (in Chinese))

[15] 岁姚炳,牛存稳,贾仰文,等. 黄河水源涵养区近 60 a 降水、气温和径流演变及其对水源涵养的影响[J]. 山地学报,2023,41(1):41-55. (SUI Yaobing, NIU Cunwen, JIA Yangwen, et al. Precipitation, temperature and runoff for the recent 60 years in the Yellow River water conservation area of China and their influence on water conservation [J]. Mountain Research, 2023, 41 (1): 41-55. (in Chinese))

[16] 江善虎,任明明,章二子,等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River [J].

- Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51 (2):1-7. (in Chinese))
- [17] REN Liliang, YUAN Shanshui, YANG Xiaoli, et al. Initiatives to clarify mechanisms of hydrological evolution in human-influenced Yellow River Basin [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2): 117-121.
- [18] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京:南京农业大学,2003.
- [19] 马良,金陶陶,文一惠,等. InVEST 模型研究进展[J]. 生态经济, 2015, 31 (10): 126-131. (MA Liang, JIN Taotao, WEN Yihui, et al. The research progress of InVEST model [J]. Ecological Economy, 2015, 31 (10): 126-131. (in Chinese))
- [20] 唐尧,祝炜平,张慧,等. InVEST 模型原理及其应用研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34 (3): 204-208. (TANG Yao, ZHU Weiping, ZHANG Hui, et al. A review on principle and application of the InVEST model [J]. Ecological Science, 2015, 34(3): 204-208. (in Chinese))
- [21] 顾晋怡,李一平,杜薇. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养能力评价及其变化特征分析[J]. 水资源保护, 2018, 34 (3): 62-67. (GU Jingyi, LI Yiping, DU Wei. Evaluation on water source conservation capacity and analysis of its variation characteristics of Taihu Lake Basin based on InVEST model [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 62-67. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 吕乐婷,乔皓,郑德凤,等. 太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 111-120. (LYU Leting, QIAO Hao, ZHENG Defeng, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River Basin and its impact on water conservation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 111-120. (in Chinese))
- [24] 左其亭,王骄阳,杨峰,等. 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, 2022, 42 (2): 13-19. (ZUO Qiting, WANG Jiaoyang, YANG Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 13-19. (in Chinese))
- [25] 杨洁. 基于 FLUS-InVEST 模型的黄河流域土地利用变化模拟与碳储量估算研究[D]. 郑州:河南大学,2023.
- [26] 杨淑威,赵娟,朱家田,等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34 (4): 175-182. (YANG Lianwei, ZHAO Juan, ZHU Jiatian, et al. Spatial-temporal change and prediction of carbon stock in the ecosystem of Xi'an based on PLUS and InVEST models [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 175-182. (in Chinese))
- [27] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, 41 (4): 12-22. (YANG Jie, XIE Baopeng, ZHANG Degang. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in the Yellow River Basin based on InVEST model and GeoDetector [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41 (4): 12-22. (in Chinese))
- [28] 任会源. 黄河流域生态系统服务功能时空变化及影响因素研究[D]. 济南:山东建筑大学,2023.
- [29] 张乐勤,方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. 水资源保护, 2017, 33 (1): 24-29. (ZHANG Leqin, FANG Yuyuan. Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui Province based on spatial autocorrelation analysis [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 24-29. (in Chinese))
- [30] 朱春霞,钟绍卓,龙宇,等. 黄河流域生态系统服务的时空演变及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2023, 42 (10): 2502-2513. (ZHU Chunxia, ZHONG Shaozhao, LONG Yu, et al. Spatiotemporal variation of ecosystem services and their drivers in the Yellow River Basin, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42 (10): 2502-2513. (in Chinese))
- [31] 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))
- [32] 周冰玉,李志威,田世民,等. 黄河源区水源涵养能力研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (4): 87-93. (ZHOU Bingyu, LI Zhiwei, TIAN Shimin, et al. A review on water conservation capacity in Yellow River source region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 87-93. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 12 - 07 编辑:施业)