引文格式：赵丽君. 黄河流域生态环境对水源涵养量的响应[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):65-69. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.014

黄河流域生态环境对水源涵养量的响应

赵丽君[1]
（1. 中煤航测遥感集团有限公司，陕西 西安 710199）

摘　要：黄河流域是我国关键的生态功能区，流域内水资源的变化对区域内生态环境质量的影响至关重要。及时、准确地获取黄河流域水源涵养量和生态环境质量的时空格局与演变趋势，对黄河流域生态环境保护和建设具有重要意义。本研究以黄河流域2000—2022年MOSID地表温度、地表反射、植被指数、降水、蒸散发数据产品与土地利用、土壤深度等数据为基础，采用Google Earth Engine（GEE）遥感云平台、遥感生态指数（RSEI）和InVEST模型方法，研究了2000—2022年水源涵养量对黄河流域生态环境质量的影响，以期为协调我国黄河流域人类活动与生态环境保护提供参考依据。结果表明：2000—2022年黄河流域生态环境质量以中等、较低为主，占区域总面积约70%。研究时段提升区面积增幅最大，达129.21%，集中在黄河流域龙门至三门峡、内流区等区域。2000—2022年黄河流域水源涵养量，整体呈波动上升趋势，峰值在2021年为402.361 $1\times10^8 m^3$，空间上表现为西北低，西南、东南高，高值区集中在西南部龙羊峡以上和龙羊峡至兰州等区域，这主要与区域内河湖、湿地和森林面积有关。黄河流域水源涵养量对生态环境质量影响显著，主要表现为水源涵养量与降水的交互作用对生态环境质量的影响最大，达0.940 9。综上所述，黄河流域水源涵养量的增加能够有效促进生态环境质量提升，但应优先选择水源涵养低值区进行改善，严格限制人类用水，土地荒漠化等现象。

关键词：水资源；遥感生态指数；水源涵养量；MODIS遥感数据产品；黄河流域
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0065-05

Response of Ecological Environment to Water Conservation in the Yellow River Basin

ZHAO Lijun[1]
(1. China Coal Aerial Remote Sensing Group Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

Abstract: The Yellow River basin is a key ecological function area in China. The change of water resources in the basin is very important to the ecological environment quality in the region. Timely and accurate access to the spatio-temporal pattern and evolution trend of water conservation and ecological environment quality in the Yellow River basin is of great significance to the ecological environment protection and construction of the Yellow River basin. Based on the data of MOSID surface temperature, surface reflection, vegetation index, precipitation, evapotranspiration data products, land-use and soil depth in the Yellow River basin from 2000 to 2022, we used Google Earth Engine (GEE) remote sensing cloud platform, remote sensing ecological index (RSEI) and InVEST model method to study the impact of water conservation on the ecological environment quality of the Yellow River basin from 2000 to 2022, in order to provide reference for coordinating human activities and ecological environment protection in the Yellow River basin. The results showed that the ecological environment quality of the Yellow River basin was mainly medium and low from 2000 to 2022, accounting for about 70 % of the total area. During the study period, the area of lifting area increased the most, reaching 129.21%, concentrated in the Longmen-Sanmenxia and inner flow areas of the Yellow River basin. From 2000 to 2022, the water conservation capacity of the Yellow River basin showed a fluctuating upward trend as a whole, with a peak in 2021, which was 402.3611×108 m3. Spatially, it was low in the northwest and high in the southwest and southeast. The high-value areas were concentrated in the areas above Longyangxia in the southwest and from Longyangxia to Lanzhou, which was mainly related to the area of rivers, lakes, wetlands and forests in the region. The amount of water conservation in the Yellow River basin has a significant impact on the ecological environment quality. The interaction between water conservation and precipitation has the greatest impact on the ecological environment quality, reaching 0.940 9. In summary, the increase of water conservation in the Yellow River basin can effectively promote the improvement of ecological environment quality, but it should be preferred to select low-value areas of water conservation for improvement, strictly limit human water use, land desertification and other phenomena.

Key words: water resource, RSEI, water conservation, MODIS remote sensing data product, the Yellow River basin

黄河流域横跨四大平原，是我国农业与生态安全核心区，当前面临水文失衡、水环境污染及土地退化等多重挑战，对国家可持续发展构成威胁。《黄河保护法》的颁布强化了流域生态协同治理要求，亟需开

作者简介：赵丽君（1981—），硕士，高级工程师，研究方向为地图学与地理信息系统，E-mail：444671489@qq.com。

展生态环境与水源涵养功能的定量评估。

作为生态系统服务功能之一的水源涵养，能够涵养土壤水分、维持植物生长所需水分、有效调节河川径流量[1-2]。目前对于水源涵养能力计算的方式众多，其中InVEST模型（integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs，InNEST）凭借生态服务功能的可视化、数据获取方便、准确性高等显著优势被广泛应用，成为众多研究者和实践者计算水源涵养量的首选工具之一[3]。国内外学者通过对植被、耕地、水体、建筑、森林等地表要素的分析，探讨出水源涵养变化的影响机制[4-7]。根据已有对水源涵养能力的研究发现，尽管有一些学者对水源涵养变化的驱动因素进行了深入研究，但在生态环境评价方面，考虑到空间异质性和多因子交互作用定量归因的研究仍然不足。

鉴于此，本文以黄河流域为研究区，利用2000—2022年降水（PET）、土地利用（LUCC）、植被覆盖度（NDVI）、地表温度（LST）、土壤等数据为数据源，运用RSEI模型分析黄河流域生态环境质量，InVEST模型计算黄河流域水源涵养服务能力，使用地理探测器中的交互探测方法，对黄河流域生态环境和水源涵养服务功能的深入定量评估以及驱动因素的细致探究，为推动流域内水资源与生态环境的高质量发展提供了重要的参考依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

黄河流域西起巴颜喀拉山，北抵阴山，南至秦岭，东邻渤海，横跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等九省（区），干流河道全长约5 464 km，最终注入渤海。流域内包括高原、山地、丘陵、盆地和平原等多种地形地貌，地势西高东低，高差悬殊。黄河流域内大部分地区属于干旱与半干旱地区，生态环境相对脆弱，干旱成为流域的基本特征，水资源主要来自兰州以上、秦岭北麓地区，而泥沙则主要来自河口镇至龙门区间与泾河、北洛河及渭河上游地区，水资源相对匮乏。此外，黄河流域还受到季风气候的影响，降水主要集中在夏季，年内降水分配不均，年均降水量约465.8 mm，地下水源供水量约106.97亿m^3，全年入海水量约260.90亿m^3。

1.2 数据源

研究数据中土地利用数据、高程数据、平均月降水数据、平均月潜在蒸散发数据均来自于中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/），月平均降水和潜在蒸散发数据累计得到年总和值。土壤深度数据来源于国家地球系统科学数据中心，在ArcGIS软件中提取土壤栅格数据。RSEI模型数据包括MOD13A1 500m植被指数16 d产品、MOD11A2 LST合成8 d产品、MOD09A1地表反射率8 d产品；对MODIS数据产品中NDVI、Wet与NDSI指标采用最大值合成，LST采用均值合成得到年数据。

InVEST模型变量包括植物蒸散系数（Kc）、流速系数（V）通过参考已有研究成果获得；季节常数（Z参数）通过与实际水资源总量数据与参考已有研究调整为4.2，植被可利用含水率（PAWC）数据计算参考相关文献。

为使各要素数据相匹配，提高模型模拟精度，统一将空间数据投影坐标变换为WGS_1984_Albers，栅格分辨率通过ArcGIS重采样为500 m×500 m。

2 研究方法

本文技术方法的路线图如图1所示。

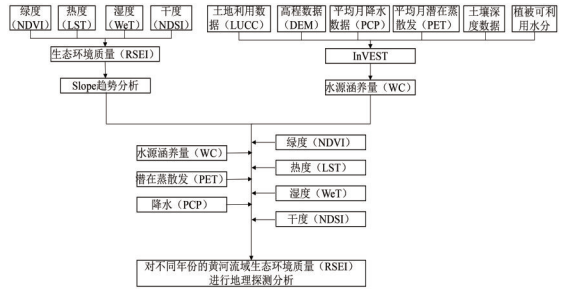


图1 技术路线图

2.1 遥感生态指数（RSEI）

遥感生态指数（RSEI）主要用于评价一个地区的生态环境质量，反映一个地区的生态环境系统的好坏。为降低水体对计算结果的影响，先用MNDWI水体指数剔除水体信息。

根据NDVI、LST、Wet、NDSI 4个指标，运用主成分分析（PCA）计算遥感生态指数（RSEI）：

$$RSEI_0 = 1 - PC1(NDVI, Wet, NDSI, LST) \quad (1)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0\min})/(RSEI_{0\max} - RSEI_{0\min}) \quad (2)$$

式中，RSEI为遥感生态指数，区间为[0，1]，结果越靠近1表示区域生态环境状况越好，反之则越差。$RSEI_{0min}$和$RSEI_{0max}$分别为最小值和最大值。之后，根据RSEI结果，按照0.2间隔分为低（0~0.2）、较低（0.2~0.4）、中等（0.4~0.6）、较高（0.6~0.8）和高（0.8~1）5个等级[8]。

Slope趋势分析是对每个年份的数据成果运用线性回归分析，计算时间段内RSEI的变化趋势。计算方法如下：

$$\text{Slope}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}(i\times \text{RSEI}_i)-\sum_{i=1}^{n}i\times\sum_{i=1}^{n}\text{RSEI}_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-(\sum_{i=1}^{n}i)^2} \quad (3)$$

式中，Slope为像元回归方程的斜率；RSEI_i为第 i 年的RSEI均值；n 为选择的时间段。当Slope > 0时，表示RSEI为增加趋势；当Slope=0时，表示不变；当Slope < 0时，表示RSEI为减少趋势。

2.2　InVEST模型

InVEST模型主要包括地表生态、海域和陆域水资源三大模块，本文选取陆域水资源模块，利用水源涵养计算模型对黄河流域的水资源进行研究[9]。

1）产水量。产水量是指流域在一定时间内的总出水量，InVEST模型通过水量平衡关系来估算产水量，认为产水量等于降水量与实际蒸散发之间的差值，由公式（4）计算。对每个像元内的产水量进行估算，通过与实际水资源量的对比，调整 Z 值（季节常数），以此为基础得到流域的产水平均值。

$$\text{Yield}_x=\left(1-\frac{\text{AET}_x}{P_x}\right)\times P_x \quad (4)$$

式中，Yield_x 为每个像元 x 的年产水量（mm）；P_x 为每个像元 x 的年均降雨量（mm）；AET_x 为每个像元 x 上每种土地代表的实际蒸散量（mm）。

$$\frac{\text{AET}_x}{p_x}=1+\frac{\text{PET}_x}{p_x}-\left[1+\left(\frac{\text{PET}_x}{p_x}\right)^n\right]^{1/n} \quad (5)$$

式中，PET_x为潜在蒸散发；n为无量纲常数，为可利用水量与降水量的比值。本文参考已有研究及对比分析，确定季节常数Z为4.2[10-12]，计算得出2000—2022年黄河流域平均产水量为$647.68\times10^8\text{m}^3$，与《中国环境统计年鉴》和《黄河水资源公报》公布的2000—2022年黄河流域平均水资源总量$660.55\times10^8\text{m}^3$相比误差最小，表明模型计算产水量符合实际水资源总量的变化规律，可进行下一步水源涵养量的计算。

2）水源涵养量。水源涵养量是指在特定流域内，经过一定时期后所剩余的净水量。本文基于InVEST模型计算水源涵养量，该模型首先确定了流域的产水量，然后结合地形复杂程度、土壤对水的传导能力以及水流速度等因素，对初步计算的产水量进行调整，从而得到更为精确的水源涵养量。这个过程综合考虑了多种自然因素对水源的影响，以确保计算结果的准确性和实用性。

$$WC_x=\min\left(1,\frac{249}{\text{Vel}_x}\right)\times\min\left(1,\frac{0.9\times TI_x}{3}\right)\times \min\left(1,\frac{\text{Ksat}_x}{300}\right)\times\text{Yield}_x \quad (6)$$

式中，WC_x 为第 x 个栅格上的水源涵养量（mm）；Vel_x 为流速系数；TI_x为第x个栅格上的地形指数，无量纲；Ksat_x为第 x 个栅格上的土壤饱和导水率（mm/d），对其进行定量模拟和分析计算；Yield_x为第 x 个栅格上的产水量[13-14]。

$$TI=\lg\left(\frac{\text{DrainageArea}}{\text{SoilDepth}\times\text{PercentSlope}}\right) \quad (7)$$

式中，DrainageArea为集水区栅格数量；SoilDepth为土壤深度（mm）；PercentSlope为百分比坡度。

2.3　地理探测器

地理探测器是运用数值型数据和定性数据，探测两因子交互对因变量的影响。包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测4个模块。本研究使用地理探测器中的交互探测模块分析两自变量间的交互作用，即多因子共同作用的联合效应对因变量的解释力，探测各因子 X 解释对属性 Y 的影响程度。计算方法为[15]：

$$q=1-\frac{\sum_{h}^{L}N_h\sigma^2{}_h}{N\times\sigma^2{}_h}=1-\frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (8)$$

$$\text{SSW}=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma^2{}_h,\ \text{SST}=N\times\sigma^2 \quad (9)$$

式中，q 为自变量对因变量的影响程度，取值在0~1之间，越接近1表示影响程度越大；h 为探测因子的类型，每个类型中包含多个样本；N_h 为 h 层中的样本数；σ 为 h 层中样本的方差。交互探测模块主要是分析多个因素对因变量的影响，即因子 X_1 和 X_2 共同作用时对因变量 Y 的影响程度。

2000—2022年间黄河流域整体保持生态环境逐步改善，同时存在一定波动性变化和地域性特征。本文参考已有研究，基于研究区的实际情况以及驱动因子可获取性、可量化性等原则[16-19]，以2000—2022年黄河流域生态环境质量（RSEI）为因变量，选取涉及水资源相关驱动因素：包括水源涵养量（WC）、降水（PCP）、潜在蒸散发（PET）；生态环境相关因子：包括绿度（NDVI）、湿度（Wet）、热度（LST）和干度（NDSI），共7个自然地理因子分析黄河流域生态环境变化的原因。

3　结果与分析

3.1　生态环境质量时空格局

3.1.1　生态环境质量时间变化过程

黄河流域的生态环境质量在2000—2022年间呈现

出整体向好的趋势。根据RSEI均值的变化，可以明显看出生态环境质量的稳步提升，如图2所示。

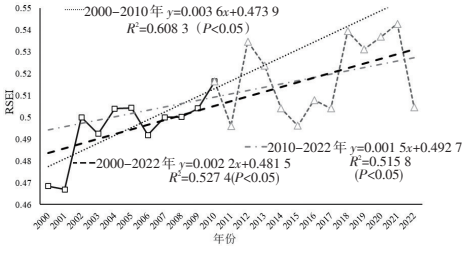


图2 2000—2020年黄河流域RSEI均值年际变化

3.1.2 生态环境质量空间变化过程

2000—2022年黄河流域生态环境质量以中等和较低为主，占区域总面积的70%，主要分布在黄河流域北部和中部。生态环境质量高、较高的区域主要分布在龙羊峡以上、龙门至三门峡和河口镇至龙门区域，途径黄河源头区、青藏高原峡谷区、草甸区以及洛河峡谷，包括有秦岭北麓、六盘山、子午岭、吕梁山等国家自然保护区，是水资源较为丰富的区域；低值区域主要集中在黄河流域西北部，“几”字湾河道转折处，最低值位于库布齐沙漠等荒漠区，降水偏低，植被稀少。

根据2000—2022年RSEI等级变化幅度，将黄河流域生态环境质量变化区域分为提升区、下降区和不变区。2000—2022年提升区面积共计233 783.34 km²，占区域总面积的29.21%，主要分布在黄河流域龙门至三门峡、河口镇至龙门及内流区等区域，其中2010—2022年提升区面积较2000—2010年有所增加，占比提高2.7%，主要提升在黄河流域龙门至三门峡和内流区。2000—2022年下降区面积为189 283.67 km²，占区域总面积的23.65%，主要分布在黄河流域龙羊峡以上及花园口以下等区域，其中2010—2022年下降区面积较2000—2010年降幅较大，占比下降5.11%，主要分布在黄河流域兰州至河口镇、三门峡至花园口等区域（表1、图3）。整体来看，2000—2022年黄河流域生态环境质量以不变为主，下降区面积和提升区面积基本保持平衡。但从变化过程来看，黄河流域生态环境正在逐渐改善，2010—2022年较2000—2010年生态环境质量提升区面积占比逐渐增高，下降区面积逐渐减少。

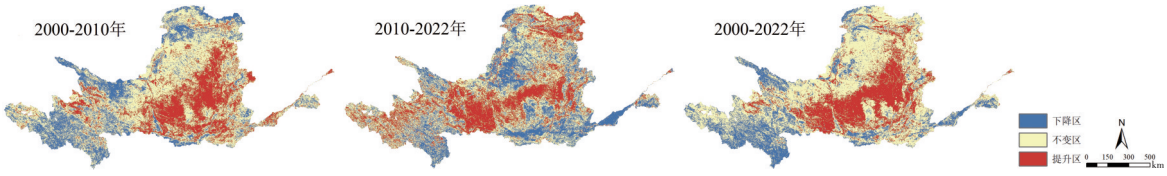


图3 2000–2022年黄河流域RSEI变化区空间分布

表1 2000–2022年RSEI变化分区面积统计

类型	2000–2010年		2010–2022年		2000–2022年	
	面积km²	占比%	面积km²	占比%	面积km²	占比%
提升区	196 326.78	24.53	217 936.33	27.23	233 783.34	29.21
不变区	436 432.91	54.53	373 925.28	46.72	377 286.77	47.14
下降区	167 594.08	20.94	208 492.16	26.05	189 283.67	23.65

3.2 水源涵养量特征分析

3.2.1 黄河流域水源涵养量时间变化特征

2000—2022年黄河流域平均水源涵养量为286.540 3×10⁸m³，年际涵养量变化较大，整体呈现波动上升趋势。2022年水源涵养量较2000年增加了139.134 2×10⁸m³。2021年水源涵养量为历年峰值，为402.361 1×10⁸m³，相较于2010年增加了40.81%；2000年水源涵养量较2010年减少了27.36%，为历年最低值。2000—2022年黄河流域水源涵养量呈显著增加趋势，年际变化速率为5.761（$P<0.05$）；以2010年为界，之前水源涵养量呈显著上升趋势，线性年际变化速率为12.603（$P<0.05$）相较于2010—2022年线性变化速率10.673（$P<0.05$）增长了1.18倍。

3.2.2 黄河流域水源涵养量空间分布特征

2000—2022年黄河流域各年水源涵养量在空间分布上具有一致性，在空间尺度上表现为西北低，西南、东南高。北部兰州至河口镇、内流区等区域常年缺水，降水偏低，植被密度较低，为水源涵养量低值区；高值区主要位于西南部龙羊峡以上和部分龙羊峡至兰州等区域，从黄河源头到草甸区及洛河峡谷区，河湖、湿地和森林对黄河流域的水源保护具有重要贡献。2000—2022年黄河流域水源涵养量变化幅度较大，流域在龙羊峡以上、龙门至三门峡南部、三门峡至花园口和花园口以下区域为水源涵养保持的主要贡献区域；改善区域位于河口镇至龙门、龙门至三门峡北部和内流区，减少区域主要为兰州至河口镇等区域。

3.3 黄河流域生态环境质量影响因子的地理探测

基于交互探测的结果显示：2000—2022年，7个驱动因子对黄河流域生态环境质量的影响程度均通过了显著性检验（$P<0.05$）且对生态环境质量的影响也存在差异性，从高到低依次为：WC > PCP > NDVI > PET > Wet > LST > NDSI。其中水源涵养量q值最高，降水次之，二者对生态环境质量的影响最大，是保护生态环境质量的主导因素。NDVI和PET也会在一定程度上影响黄河流域各地的生态环境质量，但其

影响能力随着年份变化波动较强，影响力不及 *WC* 和PCP，NDSI对生态环境质量的影响最弱，如表2所示。

表2　2000—2022年黄河流域各因子对生态环境质量空间分布的解释力

年份	*WC*	PCP	NDVI	PET	Wet	LST	NDSI
2000年	0.488	0.476	0.424	0.308	0.229	0.133	0.075
2005年	0.501	0.480	0.427	0.228	0.185	0.129	0.112
2010年	0.525	0.486	0.383	0.342	0.217	0.141	0.062
2015年	0.578	0.499	0.403	0.391	0.199	0.158	0.088
2020年	0.511	0.500	0.391	0.278	0.247	0.087	0.110
2022年	0.518	0.479	0.389	0.327	0.206	0.133	0.127

交互探测结果表明：驱动因子间的交互作用对生态环境质量的影响力均强于任何单一因子的影响。2000—2022年期间，*WC* 与PCP的耦合对生态环境质量的影响程度最大，二者对生态环境质量的影响是降水单因子的2.22倍；其次为 *WC* 与NDVI的交互作用，表明相同水平NDVI的地区，由于 *WC* 的不同导致生态环境质量表现差异。其中水源涵养量对生态环境质量的影响最为显著，导致水源涵养量与其他环境因子的交互作用影响力大于其他因子间的交互作用，进一步加剧了这种南北差异。*WC* 与PCP二者的交互作用为NDVI和PCP交互作用的1.15倍，即在同一水平的NDVI区域，*WC* 对生态环境的影响程度要明显高于PCP，如图4所示。

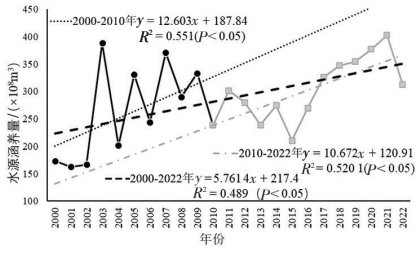


图4　黄河流域2000—2022年水源涵养量

4　结　语

基于GEE平台构建的RSEI模型与InVEST模型分析表明，2000—2022年间黄河流域生态环境质量整体呈缓慢增长趋势（年均增速0.002，$P<0.05$），RSEI均值为0.46~0.55，以中低等级为主。其中，2000—2010年增速较快（0.004/a），主要分布于南部地区；2010年后增速放缓，但质量提升区面积占比逐步增加。空间分布上呈现南北两极分化，东南及西南部因降水充沛、植被覆盖度高（NDVI>0.6）成为高值区，而西北部受沙漠化、植被稀疏及年均降水不足（<300 mm）制约，生态环境质量最低。退耕还林、水土流失治理等政策显著改善了北部和中部生态质量，但2010年后城镇化加速与资源过度开发导致部分中心城市环境恶化。水源涵养量（*WC*）时空演变与生态环境质量高度耦合，整体呈波动上升趋势，2022年较2000年增加139.13×10^{8}m^3，2021年达峰值。空间分布表现为“西北低、西南-东南高”，西北干旱区因NDVI低、降水少导致 *WC* 值最低，而源头高原山地及东部入海口湿地、森林对 *WC* 贡献最大（占流域总量的65%）。地理探测器分析表明，降水（PCP）对生态环境质量解释力最强，其次为植被覆盖度（NDVI），二者通过水量平衡机制驱动 *WC* 变化，且降水与 *WC* 的交互作用对生态质量影响最显著。

研究表明，现有模型（如RSEI、InVEST）虽能动态评估生态与水资源，但对人类活动复杂效应（如城市扩张、资源过度开发）的量化不足，导致结果存在偏差。建议未来统筹生态保护与城市发展，优先治理水土流失严重区（如龙门至三门峡段），严格管控水资源开发强度，并通过扩大林草地面积（南部经验可推广至北部）提升生态系统蓄水能力。该结论为黄土高原、国家公园等生态脆弱区治理提供科学依据，强调需建立多因子协同管理机制，以应对气候变化与人类活动的双重挑战。

参考文献

[1] 陈勉为，冯丹，张仕凯，等. 基于RSEI和ANN-CA-Markov模型的伊宁市生态环境质量动态监测及预测研究[J]. 干旱区地理，2023，46(6):911-921

[2] 张昌顺，范娜，刘春兰，等. 1990—2018年中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变[J]. 生态学报，2023，43(13):5 536-5 545

[3] 王辉源，宋进喜，孟清. 秦岭水源涵养功能解析[J]. 水土保持学报，2020，34(6):211-218

[4] 姚鹏，李金泽. 以水定城:资源节约型评比达标赛如何“去”资本错配[J]. 世界经济，2023，46(3):233-256

[5] Daneshi A，Brouwer R，Najalinejad A，et al. Modelling the Impacts of Climate and Land Use Change on Water Security in a Semi-arid Forested Watershed Using InVEST[J]. Journal of Hydrology，2021，593(25):1 256- 1 269

[6] Shrestha M，Shrestha S，Shrestha P K. Evaluation of Land Use Change and Its Impact on Water Yield in Songkhram River Basin[J]. Thailand International Journal of River Basin Management，2020，18(1):23-31

[7] 吕一河，胡健，孙飞翔，等. 水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. 生态学报，2015，35(15):5 191-5 196

[8] 许丽婷，刘海红，黄丽洁，等. 2000—2020年汾河流域生态环境与水源涵养时空变化[J]. 干旱区研究，2023，40(2):313-325

[9] 王芳，李文慧，林妍敏，等. 1990—2020年黄河流域典型生

（下转第86页）