北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

# 黄土高原生态系统健康时空演变格局及水文循环驱动分析

谢奕可 李享 陈立欣 代瑞宏 张初蕊 刘柯言 冯颖妍

# Spatiotemporal evolution of ecosystem health and its hydrological driving mechanisms in the Loess Plateau

Xie Yike, Li Xiang, Chen Lixin, Dai Ruihong, Zhang Churui, Liu Keyan, Feng Yingyan

引用本文:
谢奕可, 李享, 陈立欣, 代瑞宏, 张初蕊, 刘柯言, 冯颖妍. 黄土高原生态系统健康时空演变格局及水文循环驱动分析[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):123–134. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250325
Xie Yike, Li Xiang, Chen Lixin, Dai Ruihong, Zhang Churui, Liu Keyan, Feng Yingyan. Spatiotemporal evolution of ecosystem health and its hydrological driving mechanisms in the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):123–134. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250325

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250325

**您可能感兴趣的其他文章**
**Articles you may be interested in**

基于CASA模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应
Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response to climate factors in the Loess Plateau based on the CASA model
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 13–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250428

黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析
Spatial and temporal variation and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau
北京林业大学学报, 2023, 45(8): 29–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220381

库布齐沙漠地区生态系统格局演变及其驱动力分析
Evolution and driving forces of ecosystem pattern in Kubuqi Desert of northern China
北京林业大学学报, 2021, 43(4): 108–123. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200242

黄河流域生态系统演变特征、驱动机制与治理策略
Characteristics of ecosystem evolution, driving mechanisms and governance strategies in the Yellow River Basin
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 1–12. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250303

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析
Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 70–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230226

黄土高原青藏高原过渡带植被NPP时空变化及其驱动力
Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation NPP in transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau: a case study of Datong County, Qinghai Province of northwestern China
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 39–50. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240193

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250325

# 黄土高原生态系统健康时空演变格局及水文循环驱动分析

谢奕可[1,2] 李 享[1] 陈立欣[1,2] 代瑞宏[1,2] 张初蕊[1,2] 刘柯言[1,2] 冯颖妍[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083）

**摘要:【目的】**探究黄土高原不同生态系统健康时空演变格局及其对水文循环要素的非线性响应机制，为区域生态恢复与水资源管理提供参考。**【方法】**以黄土高原农田、森林和草地生态系统为对象，基于“活力−组织力−弹性−生态系统压力”（VORS）框架评估其健康状态，结合传统与空间马尔科夫模型揭示动态演变规律，并利用 XGBoost-SHAP 模型解析水文循环要素对生态系统健康的具体影响。**【结果】**(1)生态系统健康整体提升。其中，森林生态系统高等级区增幅最大，占比增加 35.52%，由中部向东部扩展；草地生态系统低等级区显著缩减，占比降低 25.60%，向西部收缩。(2)生态系统健康的邻域效应显著，低等级区具有负向溢出效应，抑制邻域健康等级向上转移；高等级区具有正向溢出效应，促进邻域健康等级提升。(3)农田和草地生态系统对水文要素变化敏感，降水为核心主导因子，对农田和草地两类生态系统健康的贡献率分别为 38.80% 和 45.80%。森林生态系统则更依赖水文要素的整体耦合作用，其交互效应总和约为单因子主效应的 1.18～1.43 倍。**【结论】**本研究揭示了黄土高原不同生态系统健康水文驱动机制的显著差异，以及植被恢复背景下生态系统与水文复杂的非线性关系，对区域分区治理和可持续发展具有重要意义。

**关键词：**生态系统健康；水文循环；动态演变；协同效应；黄土高原
**中图分类号：**S718；X171.1；X826 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)05−0123−12
**引文格式：**谢奕可，李享，陈立欣，等. 黄土高原生态系统健康时空演变格局及水文循环驱动分析 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(5)：123−134. Xie Yike, Li Xiang, Chen Lixin, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem health and its hydrological driving mechanisms in the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 123−134.

# Spatiotemporal evolution of ecosystem health and its hydrological driving mechanisms in the Loess Plateau

Xie Yike[1,2] Li Xiang[1] Chen Lixin[1,2] Dai Ruihong[1,2] Zhang Churui[1,2]
Liu Keyan[1,2] Feng Yingyan[1]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [**Objective**] This study explores the spatio-temporal patterns of ecosystem health across different ecosystems on the Loess Plateau and its nonlinear response mechanism to hydrological cycle components, so as to provide references for regional ecological restoration and water resource management. [**Method**] Focusing on farmland, forest, and grassland ecosystems on the Loess Plateau, this study assessed ecosystem health using the “vigor-organization-resilience-ecosystem stress” (VORS) framework. We employed both traditional and spatial Markov models to reveal their dynamic evolution patterns and utilized the XGBoost-SHAP model to analyze the specific impacts of hydrological cycle elements on ecosystem

**收稿日期:** 2025−08−26 **修回日期:** 2025−12−09
**基金项目:** 黄河水科学研究联合基金项目(U2243202)，国家自然科学基金项目(32271967)。
**第一作者:** 谢奕可。主要研究方向：生态系统健康。Email: xieyke@126.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
**责任作者:** 陈立欣，教授。主要研究方向：生态水文研究。Email: myclover17@126.com 地址：同上。
**本刊网址:** https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

health. [**Result**] (1) Ecosystem health improved significantly overall. Forest ecosystems showed the most pronounced increase in high-health areas (proportion increased by 35.52%), expanding eastward from central regions. Grassland ecosystems exhibited the most significant reduction in low-health areas (proportion decreased by 25.60%), contracting westward. (2) Low-health areas exerted a negative spillover effect, reducing the probability of neighboring ecosystems transitioning to higher health levels. Conversely, high-health areas demonstrated a positive spillover effect, promoting health level upgrades in adjacent areas. (3) Farmland and grassland ecosystems were highly sensitive to changes in hydrological elements, primarily dominated by precipitation (contributing 38.80% and 45.80% to their health changes, respectively). Forest ecosystem health, however, relied more on the synergistic coupling of multiple hydrological elements, where the combined interaction effects were approximately 1.18 to 1.43 times the main effects of individual factors. [**Conclusion**] This study reveals significant differences in the hydrological driving mechanisms for the health of distinct ecosystems on the Loess Plateau and elucidates the complex nonlinear relationship between ecosystems and hydrology within the context of vegetation restoration. It provides a theoretical basis for regional zoning management and sustainable development.

**Key words:** ecosystem health; hydrological cycle; dynamic evolution; synergistic effect; the Loess Plateau

黄土高原是我国典型的生态脆弱区，横跨多个省份，具有重要生态功能。自 1999 年退耕还林工程实施以来，该区域植被覆盖率显著提升，水土流失得到有效控制，生态环境初步改善[1]。然而，植被恢复可持续性差、生态修复发展不平衡等问题仍然存在[2]，这使得生态系统健康综合评估成为关键科学问题。生态系统健康是衡量生态系统质量的核心指标，涵盖活力、组织力和弹性等维度[3]，为诊断区域生态状况和制定保护策略提供理论依据。因此，从生态系统健康视角系统评估黄土高原生态恢复成效，揭示其时空演变规律及驱动机制，对推动区域可持续发展具有重要科学价值。

全球生态系统健康研究已取得丰富成果，但以往研究多聚焦于湿地[4]、草地[5]等单一生态系统，或流域[6]、城市[7]等复合区域，强调生态过程的整体性。考虑到黄土高原地形复杂、生态功能多样且区域差异显著[2]，需针对其内部农田、草地和森林等不同生态系统开展精细化研究，并选择适配评价方法。目前主要采用指标体系法，典型模型包括“活力−组织力−弹性”（vigor-organization-resilience，VOR）模型及其扩展[3]和“压力−状态−响应”（pressure-state-response，PSR）框架及其衍生[8]。VOR 模型注重系统整体性，但忽视外部压力因素，而 PSR 框架虽能反映压力响应关系，却难以全面捕捉区域生态动态特征[9]。Lin 等[10]提出的“活力−组织力−弹性−生态系统压力”（vigor-organization-resilience-ecosystem stress，VORS）模型通过引入压力维度，弥补了传统模型的不足，可为黄土高原等生态脆弱区健康评价提供方法借鉴。

目前关于黄土高原生态系统健康的研究已在时空格局和驱动因素方面展开有益探索。在动态分析方面，现有方法（如 Theil-Sen 趋势分析[11]、GM-ARIMA 模型[12]及空间自相关法[13]等）对相邻区域间相互作用关注不足。Gu 等[14]通过空间马尔科夫模型引入“空间滞后”项状态转移概率矩阵，揭示区域间溢出效应和相互作用关系[15−16]，为生态系统健康动态分析提供新视角。在驱动因素方面，退耕还林工程的大规模植被恢复深刻改变了区域水文过程，导致土壤干层加剧与河川径流减少等生态水文问题[17]。水文要素（如降水和土壤水分）作为影响生态系统健康的关键因子，其作用机制备受关注。然而，现有研究[18−19]多聚焦于单一水文要素的影响分析，缺乏对多要素交互作用的定量评估，难以全面揭示水文过程对生态系统健康的综合影响。近年来，XGBoost 模型（eXtreme Gradient Boosting）等机器学习方法在特征识别和非线性关系建模中展现出优势，将其与 SHAP 模型（SHapley Additive exPlanations）结合，可进一步量化各水文要素的贡献度及交互效应[20]，为解析复杂驱动机制提供新工具。

基于此，本研究以黄土高原农田、草地和森林生态系统为对象，采用 VORS 评估框架，综合运用传统统计方法和空间马尔科夫模型，揭示不同生态系统健康的时空演变规律；并基于 XGBoost-SHAP 模型，识别关键水文要素对生态系统健康的影响及交互作用机制。重点探讨以下科学问题：（1）黄土高原不同生态系统健康的时空变化特征是什么？（2）不同水文要素对生态系统健康的影响如何？本研究旨在通过系统分析，丰富生态系统健康评估的理论与方法，为黄土高原及全球半干旱地区水资源管理和生态系统可持续性发展提供科学依据。

# 1　研究方法与数据来源

## 1.1　研究区概况

黄土高原（33°43′～41°16′N，100°54′～114°33′E）位于黄河流域中上游地区，总面积约 64 万 km$^2$，地势西高东低，以山地、丘陵、高原、盆地等地貌为主，主要生态系统类型为农田、森林、草地等（图 1）。该区域属暖温带大陆性季风气候，年均气温约为 7.3 ℃，局部气温随海拔变化较大，降水稀少且分布不均，年均降水量在 104～928 mm 之间，自东南向西北递减，年均蒸发量达到 524～820 mm[21]。

## 1.2　数据来源

本研究高程（digital elevation model，DEM）数据来源于地理空间数据云网站（表 1）。所有数据在参与运算前均统一投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_48N 并重采样至 500 m × 500 m 的栅格尺度。不同生态系统识别基于 1985—2023 年中国逐年土地覆盖数据（China Land Cover Dataset，CLCD）。通过 ArcGIS 10.7 将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大地类。水文要素数据中，表层土壤湿度（surface soil moisture，SMS）数据来源于 GLEAM（Global Land Evaporation Amsterdam Model）。其余水文数据均来自于“国家青藏高原科学数据中心”，包括：降水量（precipitation，PRE）数据采用中国逐月降水量数据集，潜在蒸散发（potential evapotranspiration，PET）数据采用中国逐月潜在蒸散发数据集，地下水储量异常（groundwater storage anomaly，GWSA）数据采用全球高分辨率水储量异常数据集，地表径流（surface runoff，SR）数据采用中国区域历史及未来预估径流和蒸散数据集中的历史数据和 FGOALS-g3 降尺度模式。净初级生产力（net primary productivity，NPP）数据从 Google Earth Engine（GEE）平台提供的 MOD17A3HGF 数据集中获取。

## 1.3　研究方法

### 1.3.1　生态系统健康评价

参考 Lin 等[10]研究并结合黄土高原实际情况，构建包含生态系统活力（EV）、生态系统组织力（EO）、生态系统弹性（ER）和生态系统压力（ES）4 个维度的综合评价体系。其中，EV 反映生态系统初级生产力和代谢能力，以 NPP 表征。EO 表征系统内部结构稳定性，综合景观形态、景观多样性和景观连通性，通过加权系数模型（公式 1）计算得到[22]。

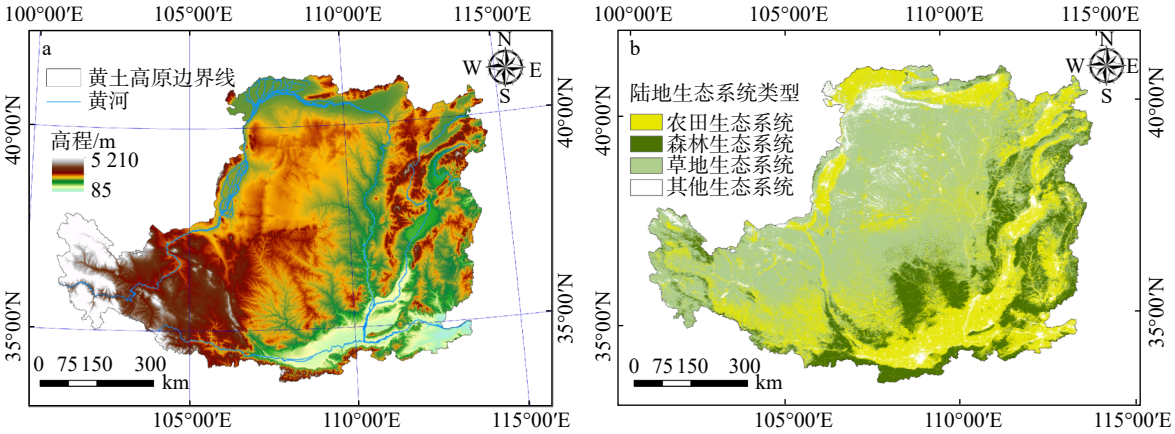



图 1　研究区位置（a）和主要陆地生态系统类型（b）

Fig. 1　Location (a) and major terrestrial ecosystem types (b) of the study area

**表 1　数据来源**

Tab. 1　Data sources

| 数据名称 | 分辨率 | 年份 | 数据来源 |
|---|---|---|---|
| 高程（DEM） | 90 m | 2024 | https://www.gscloud.cn |
| 土地利用（CLCD） | 30 m | 2002、2007、2012、2017、2022 | https://zenodo.org/records/18180184 |
| 土壤湿度（SMS） | 0.25° | 2002、2007、2012、2017、2022 | https://www.Gleam.eu |
| 降水量（PRE） | 1 km | 2002、2007、2012、2017、2022 | http://data.tpdc.ac.cn |
| 潜在蒸散发（PET） | 1 km | | |
| 地下水储量异常（GWSA） | 0.05° | | |
| 地表径流（SR） | 0.25° | | |

$$E_O = 0.4L_H + 0.4L_C + 0.2I_C = 0.2I_{SHDI} + 0.2I_{SHEI} + 0.1I_{COHESION} + 0.15I_{IJI} + 0.15I_{CONTAG} + 0.2I_{FRAC} \quad (1)$$

式中：$E_O$ 是生态系统组织力指数，$L_H$是景观多样性数，$L_C$是景观连通性数，$I_C$是景观形态数，$I_{SHDI}$是香农−威纳多样性指数，$I_{SHEI}$是香农−威纳均匀度指数，$I_{COHESION}$是景观凝聚度指数，$I_{IJI}$是穿插与并置指数，$I_{CONTAG}$是景观蔓延指数，$I_{FRAC}$是景观分维数。

ER 是指生态系统受干扰后的抵抗能力，通过 InVEST 3.14.2 模型生境质量模块计算。该模块基于土地利用数据，结合威胁因子（耕地、建设用地、未利用地和水域等人类活动密集区域）影响距离、权重及生境敏感性（表 2、3）进行计算（公式 2）[23]。

$$Q_{xj} = H_j\left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right) \quad (2)$$

式中：$Q_{xj}$ 为第 $j$ 种土地利用类型中栅格 $x$ 的生境质量，$D_{xj}$ 为栅格 $x$ 在第 $j$ 种土地利用类型中的生境退化程度，$H_j$ 为第 $j$ 种土地利用类型的生境适宜性，$z$ 为归一化指数，$k$ 为半饱和系数。

**表 2 威胁因子参数**

Tab. 2 Threat parameters

| 威胁因子 | 最大影响距离/km | 权重 | 空间衰退类型 |
|---|---|---|---|
| 耕地 | 1 | 0.3 | 线性 |
| 水域 | 1 | 0.6 | 线性 |
| 建设用地 | 3 | 1 | 指数 |
| 未利用地 | 0.5 | 0.5 | 线性 |

**表 3 不同土地利用类型的生境适宜性及其对威胁因子的敏感性**

Tab. 3 Habitat score of different land cover types and their sensitivity to each threat factor

| 土地利用类型 | 生境适宜度 | 威胁因子 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 耕地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
| 耕地 | 0.4 | 0 | 0.7 | 0.4 | 0 |
| 林地 | 0.8 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.4 |
| 草地 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| 水域 | 1 | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.2 |
| 建设用地 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 未利用地 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

ES 是指导致生态系统退化或潜在崩溃的外部压力[24]，本研究参考 Lin 等[10]做法，选取土壤侵蚀强度代表 ES，通过 InVest 模型泥沙输移比模块中的通用土壤流失方程（USLE）进行量化（公式 3）。

$$I_{USLE} = RKL_SCP \quad (3)$$

式中：$I_{USLE}$ 为单位面积年平均土壤侵蚀模数，t/(hm$^2$·a)；$R$ 为降雨侵蚀因子，MJ·mm/(hm$^2$·h·a)；$K$ 为土壤可蚀性因子，t·h/(MJ·mm)；$L_S$ 为地形因子；$C$ 为植被覆盖管理因子；$P$ 为土壤保持因子。

对各指标数值进行归一化处理（公式 4、5）后，根据公式 6 计算得到生态系统健康指数。

$$x_{sp} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4)$$

$$x_{sn} = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad (5)$$

$$I_{EH} = \sqrt[4]{I_{EV} I_{EO} I_{ER} I_{ES}} \quad (6)$$

式中：$x_{sp}$ 和 $x_{sn}$ 分别为正向和负向数据的标准化值，$x_i$ 为第 $i$ 个指标值，$x_{min}$ 为该指标的最小值，$x_{max}$ 为该指标的最大值，$I_{EH}$ 为生态系统健康指数，$I_{EV}$ 为归一化的生态系统活力指数，$I_{EO}$ 为归一化的生态系统组织力指数，$I_{ER}$ 为归一化的生态系统弹性指数，$I_{ES}$ 为归一化的生态系统压力指数。参考已有研究成果[13−16,25]将黄土高原生态系统健康指数分为低（0，0.40]、中（0.40，0.50] 和高（0.50，1.00）3 个等级水平。

### 1.3.2 生态系统健康动态演变

本文采用传统马尔科夫链模型量化生态系统健康在不同研究期发生状态转移的概率分布，从而刻画其演化过程[26]。首先，使用上述生态系统健康等级划分依据，用 $k$ = 1、2、3 分别表示低、中、高等级。然后基于 Matlab R2022a 软件计算各类生态系统健康水平概率分布和转移情况，具体公式如下。

$$P\{X_{t+1} = j | X_t = i, X_{t-1} = i_{t-1}, \cdots, X_0 = i_0\} = P\{X_{t+1} = j | X_t = i\} = P_{ij} \quad (7)$$

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (8)$$

式中：$P_{ij}$表示生态系统健康水平从 $t$ 时刻的 $i$ 类型到 $t$ + 1 时刻转移为 $j$ 类型的概率；$n_{ij}$表示研究时间段内 $t$ 时刻 $i$ 类型向 $t$ + 1 时刻 $j$ 状态转移的研究单元数量之和，$n_i$表示研究时间段内类型 $i$ 的研究单元数量之和。当 $j = i$ 时，$P_{ij}$表示保持 $i$ 类型的概率，即为概率矩阵对角线上元素。

在传统马尔科夫链基础上加入“空间滞后”项作为邻域背景，构建空间马尔科夫链[16]。将邻域背景划分为低、中、高 3 种等级，分别构建 3 个 3 × 3 的条件转移概率矩阵。通过引入邻接权重矩阵（相邻为 1，反之为 0）刻画研究单元的空间邻接性与连续性，公式如下[16]。

$$\mathrm{Lag}_a = \sum_{b=1}^{n} (Y_b \boldsymbol{W}_{ab}) \quad (9)$$

式中：$\mathrm{Lag}_a$是单元 $a$ 的空间滞后值；$Y_b$为单元 $b$ 的观测值；$\boldsymbol{W}_{ab}$为空间权重矩阵。

通过比较传统与空间马尔科夫转移矩阵结果，可揭示邻域背景对转移概率的影响。例如：若 $P_{12|3} > P_{12}$，则表示当邻域处于高等级（状态 3）时，本地低等级（状态 1）向中等级（状态 2）转移的概率大于传统马尔科夫链中的对应概率，表明邻域高等级背景对该转移具有促进作用；反之，若 $P_{12|3} < P_{12}$，则表明邻域高等级背景对该转移具有抑制作用。

### 1.3.3　水文循环要素对生态系统健康影响评估

本文采用 XGBoost 回归模型评估各水文要素对生态系统健康的影响，并结合 SHAP 方法对预测结果进行解释分析[20]，包括总效应（SHAP value）、主效应（SHAP main value）和交互效应。总效应表示要素对生态系统健康的总体影响，主效应反映单个要素本身的影响，交互效应度量多要素的综合影响。各个要素的总效应 SHAP 值计算公式如下[20]。

$$\varphi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(M-|S|-1)!}{M!} [f_x(S \cup \{i\}) - f_x(S)] \tag{10}$$

式中：$\varphi_i$表示第 $i$ 个特征的总效应 SHAP 值，$S$ 表示特征的子集，$|S|$表示子集 $S$ 的大小；$M$ 代表特征总数，$f_x(S)$表示使用不包括第 $i$ 个特征的子集进行评估时的模型输出。

二阶交互效应的 SHAP 值计算公式如下[20]。

$$\varphi_{i,j} = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i,j\}} \frac{|S|!(M-|S|-2)!}{2(M-1)!} \nabla_{i,j}(S) \tag{11}$$

$$\nabla_{i,j}(S) = f_x(S \cup \{i,j\}) - f_x(S \cup \{i\}) - f_x(S \cup \{j\}) + f_x(S) \tag{12}$$

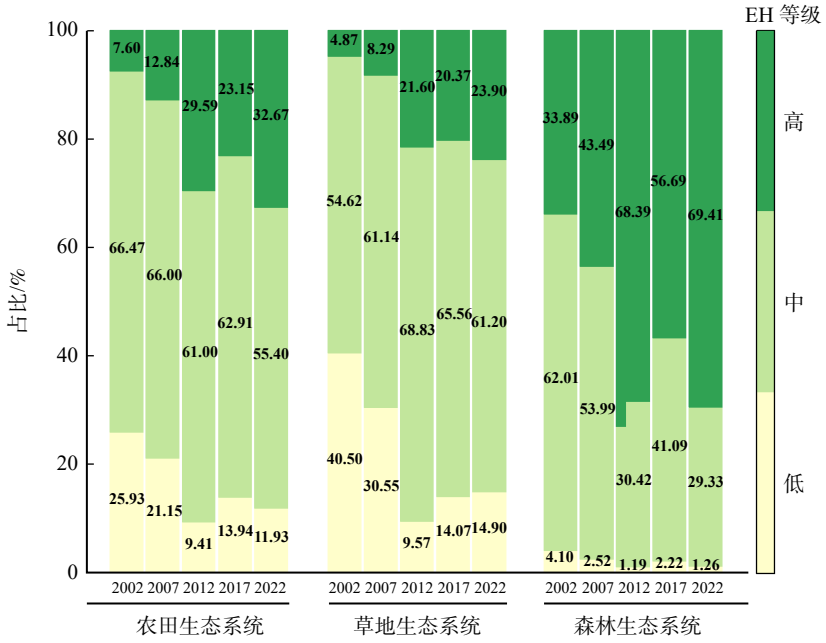
式中：$\varphi_{i,j}$表示特征 $i$ 和 $j$ 之间二阶交互作用效应的 SHAP 值，$\nabla_{i,j}(S)$为捕获模型输出的变化，具体取决于子集 $S$ 中包含或排除特征 $i$ 和 $j$。每个要素的主效应是从总效应 SHAP 值中减去二阶交互效应 SHAP 值得到的。

## 2　结果与分析

### 2.1　黄土高原不同生态系统健康时空格局

2002—2022 年，黄土高原生态系统健康呈持续改善趋势，整体均值由 0.43 提升至 0.47。不同生态系统健康水平差异明显，总体表现为森林最优、农田次之、草地相对较弱（图 2）。具体而言，农田以中等级区为主（占比 55.40%～66.47%），高等级区比例大幅跃升，由 7.60% 增至 32.67%。草地同样以中等级为主（54.62%～68.83%），高等级区占比从 4.87% 增至 23.90%，低等级区占比从 40.50% 降至 14.90%；研究前期（2002—2007 年）低等级区远超高等级区，至中后期（2012—2017 年）高等级区比例（20.37%～23.90%）反超低等级区。森林生态系统则由前期以中等级区为主（53.99%～62.01%），发展为中后期高等级区占主导（56.69%～69.41%），整个研究期间高等级区占比增加 35.52%。3 类生态系统均呈现“高健康等级区扩张、低健康等级区收缩”的演变特征。

空间分布上，黄土高原生态系统健康整体呈现“西北和东南较低、中部较高”的格局（图 3）。农田




EH 指生态系统健康。下同。

图 2　2002—2022 年黄土高原不同生态系统健康等级占比

Fig. 2　Proportion of different ecosystem health levels on the Loess Plateau from 2002 to 2022

高等级区主要集中于中部和东部(约 21.17%),而低等级区多分布于西北和东南部(约 16.47%)。草地呈现“南高北低”特征,高等级区逐渐向北部扩展,而低等级区域西部收缩,森林生态系统高等级区主要位于黄土高原中部(约 54.37%),并向东部扩展,低等级区则零星分布于黄土高原东南部边缘(约 2.26%)。上述格局反映出黄土高原生态系统健康动态演变与区域差异。

### 2.2 黄土高原生态系统健康空间跃迁

传统马尔科夫模型分析结果显示(表 4),生态系统健康等级转移具稳定性,概率矩阵显示对角线概率($P \geqslant 53.7\%$)始终高于非对角线概率($P \leqslant 36.6\%$)。这种稳定性在极端水平下最为明显,反映了生态系统健康两极分化格局,即 $P_{33}(93.3\%) > P_{11}(74.2\%) > P_{22}(53.7\%)$。此外,中等生态系统健康等级呈向上转移趋势,即 $P_{23}(36.6\%) > P_{21}(9.8\%)$,表现出“俱乐部趋同”现象。

对比传统与空间马尔科夫转移矩阵结果(表 4、5)发现,尽管邻域背景未改变生态系统健康等级转移的稳定性,但空间溢出效应显著影响了转移路径。低生态系统健康区表现出负向溢出效应,抑制邻域生态系统健康等级提升;而高生态系统健康区则对邻域产生正向溢出效应,增加邻域等级向上转移的概率,例如 $P_{23|2}(22.2\%) < P_{23}(36.6\%) < P_{23|3}(64.3\%)$。

### 2.3 水文循环要素对不同生态系统健康的影响

XGBoost 模型表明各水文循环要素对农田、草地和森林生态系统健康有显著影响($R^2 > 0.70$),但影响程度存在明显差异(图 4)。农田和草地生态系统中,降水是首要驱动力,贡献率分别为 38.80% 和 45.80%,高于其他水文要素影响的 2 倍。而森林生态系统中地下水、径流和降水贡献率均超过 20%。

图 5 揭示了生态系统健康与各水文循环要素之间复杂的非线性关系。降水对生态系统健康的贡献度随降水量增加而提升,低于约 430 mm 时对农田和草地生态系统健康呈负效应(SHAP < 0;图 5a, f),而降雨对于森林生态系统健康的影响较为复杂,在超过 560 mm 表现出稳定的正效应(SHAP > 0,图 5k)。地表径流和土壤湿度的提升增强了对不同生态系统健康的贡献(图 5c, e, h, j, o),但在森林生态系统中,土壤湿度对生态系统健康的贡献度随其增加而减弱(图 5m)。地下水储量异常(GWSA)总体对生态系统健康有正向贡献(SHAP > 0;图 5b, g, l),反映地下水补给利于植被生长或系统稳定,但其贡献随 GWSA 增加而递减,暗示生态系统健康对地下水的响应可能存在饱和效应。潜在蒸散发(PET)对不同生态系统健康的影响较为复杂,过高或过低 PET 均对生态系统健康产生负影响(图 5d, i, n),其中农田对 PET 的耐受范围比森林和草地更宽。

不同生态系统中水文要素交互作用存在差异(图 6)。农田生态系统中(图 6a),降水和地下水的主效应均高于其二阶交互效应之和,是驱动生态系统健康变化的核心主导因子。土壤湿度、潜在蒸散发、径流的交互效应之和超过自身主效应,以多因子协同交互作用间接影响生态系统健康,属于非主导

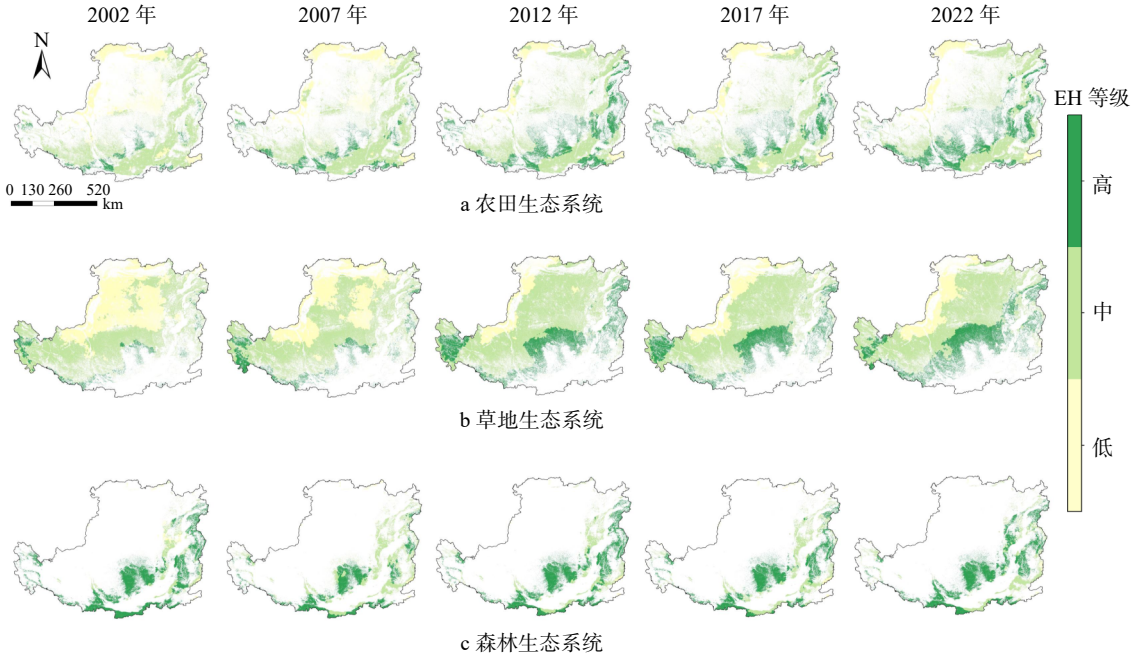



图 3 2002—2022 年黄土高原农田、草地和森林生态系统健康空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ecosystem health in cropland, grassland, and forest ecosystems on the Loess Plateau from 2002 to 2022

**表 4　黄土高原生态系统健康等级传统马尔科夫转移矩阵**

Tab. 4　Traditional Markov transfer matrix of ecosystem health levels on the Loess Plateau

| 等级 | 低 | 中 | 高 |
|---|---|---|---|
| 低 | 0.742 | 0.258 | 0 |
| 中 | 0.098 | 0.537 | 0.366 |
| 高 | 0 | 0.067 | 0.933 |

**表 5　黄土高原生态系统健康等级空间马尔科夫转移矩阵**

Tab. 5　Spatial Markov transition matrix of ecosystem health levels on the Loess Plateau

| 邻域 | 等级 | 低 | 中 | 高 |
|---|---|---|---|---|
| 低 | 低 | 0.769 | 0.231 | 0 |
| | 中 | 0 | 0 | 0 |
| | 高 | 0 | 0 | 0 |
| 中 | 低 | 0.688 | 0.313 | 0 |
| | 中 | 0.148 | 0.630 | 0.222 |
| | 高 | 0 | 0.182 | 0.818 |
| 高 | 低 | 1 | 0 | 0 |
| | 中 | 0 | 0.357 | 0.643 |
| | 高 | 0 | 0.054 | 0.946 |

驱动因子。草地生态系统(图 6b)中，降水、土壤湿度和地下水主效应占优，对生态系统健康起主导驱动作用，其余因子表现为次要驱动作用。森林生态系统(图 6c)中各要素交互效应总和约为主效应总和的 1.18 ~ 1.43 倍，表明森林生态系统健康受各水文循环要素耦合作用的影响较为显著。此外，农田与草地生态系统中降水与各因子交互作用普遍大于其余因子之间的交互效应，进一步反映降水的主导作用，表明降水不仅单独驱动生态系统健康，还通过调节其他水文要素影响生态系统健康。

## 3　讨　　论

### 3.1　生态系统健康时空演变及空间溢出效应

2002—2022 年黄土高原生态系统健康整体呈上升趋势，与王雅慧等[13]、Zhang 等[25]研究结论一致。不同之处在于，既往研究多聚焦区域整体变化，而本研究通过对比 3 类生态系统进一步揭示其内部差异。其中，森林生态系统健康改善最明显，高值区自中部向东部扩展，与同期土壤保持高供给高需求区域空间分布转变表现一致[27]。这得益于退耕还林工程推

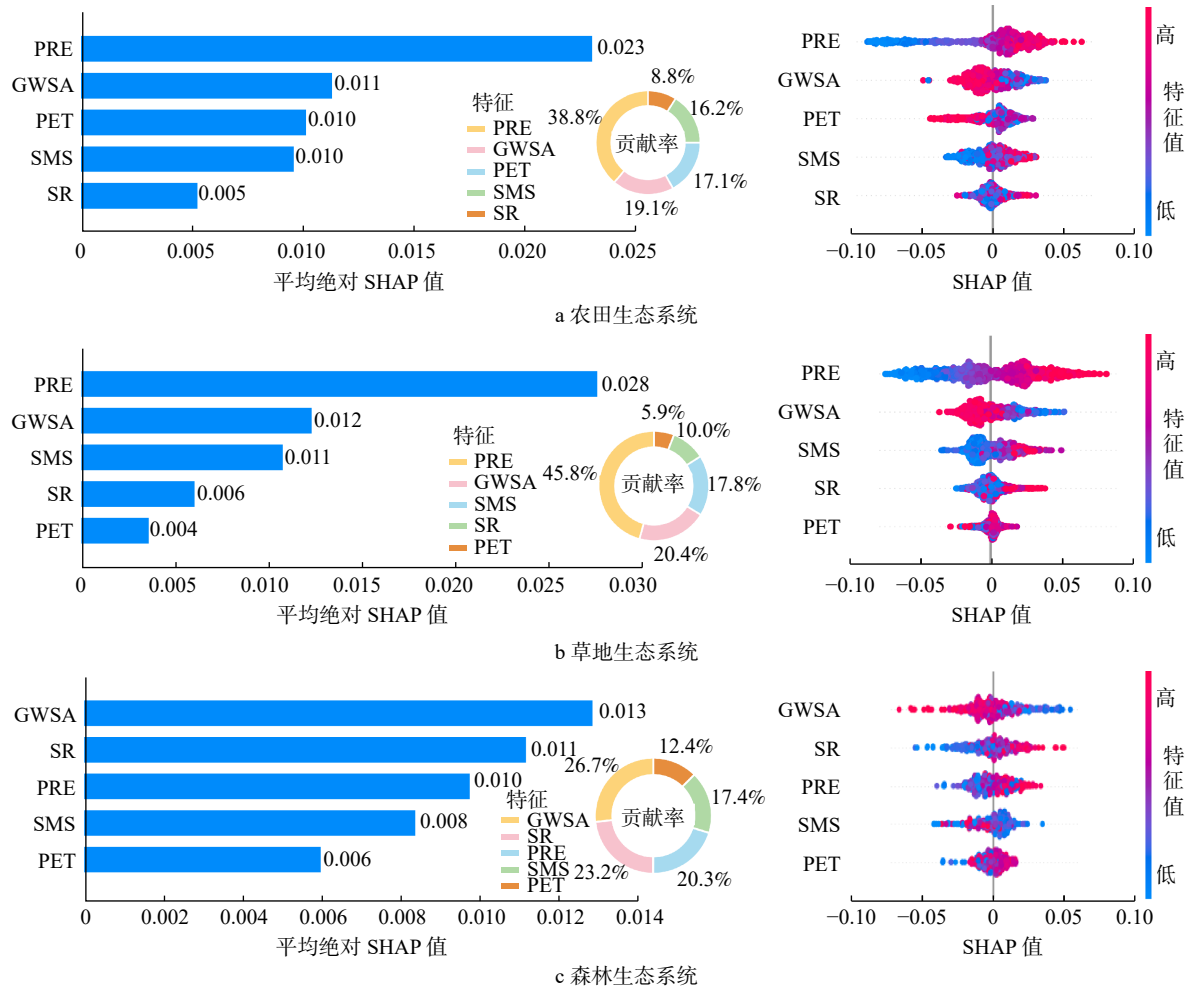



图 4　不同生态系统水文循环要素特征重要性图和 SHAP 蜂群图

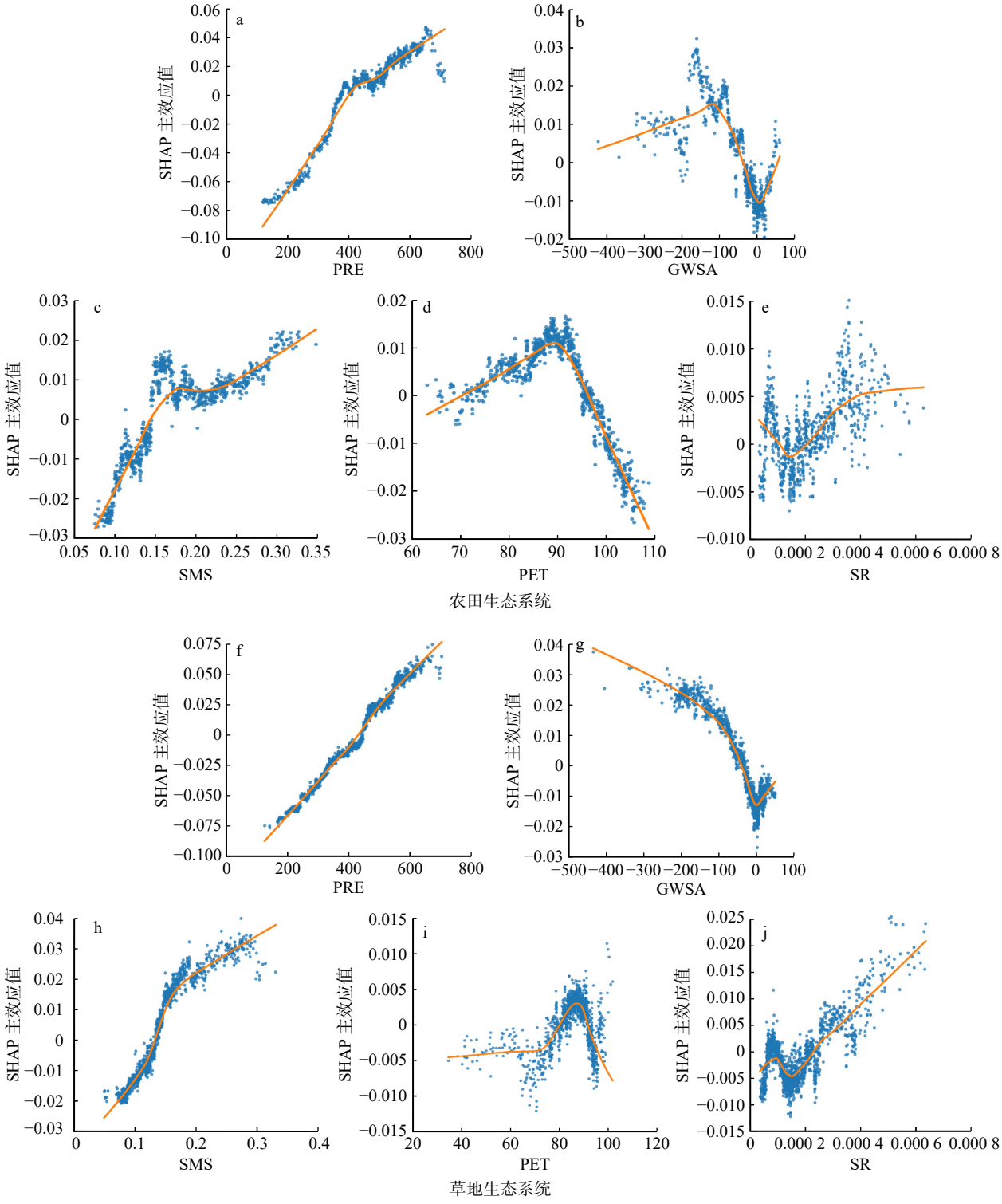
Fig. 4　Feature importance and SHAP beeswarm plots for hydrological cycle elements in different ecosystems

动植被覆盖度由 2000 年的 0.439 提升至 2022 年的 0.636，年均增长 0.86%[1]。同时，农田生态系统低值持续分布（约占 16.47%）于西北和东南部，与人类活动导致自然用地转化有关[28]。

邻域对生态系统健康的影响具有空间溢出效应，且倾向于放大极端状态，解释了生态系统健康“高健康等级区扩张、低健康等级区收缩”的演变特征。该发现加深了对空间邻域相互作用的理解，超越了仅关注空间自相关的传统研究[13]。低等级区产生显著负向溢出效应，抑制相邻区域向上转移概率，因此持续分布于西北和东南部的生态系统健康低值区提升仍需时间；高等级区面积大且集中分布，其正向溢出效应增加相邻区域向上转移概率，推动黄土高原中部高值区向东和向南扩展。森林面积连通性与植被覆盖增加促进生态系统稳定，这一机制支持了上述空间扩展动态[29]。

### 3.2 水文循环要素对不同生态系统健康的影响

本研究揭示了黄土高原不同生态系统健康对水



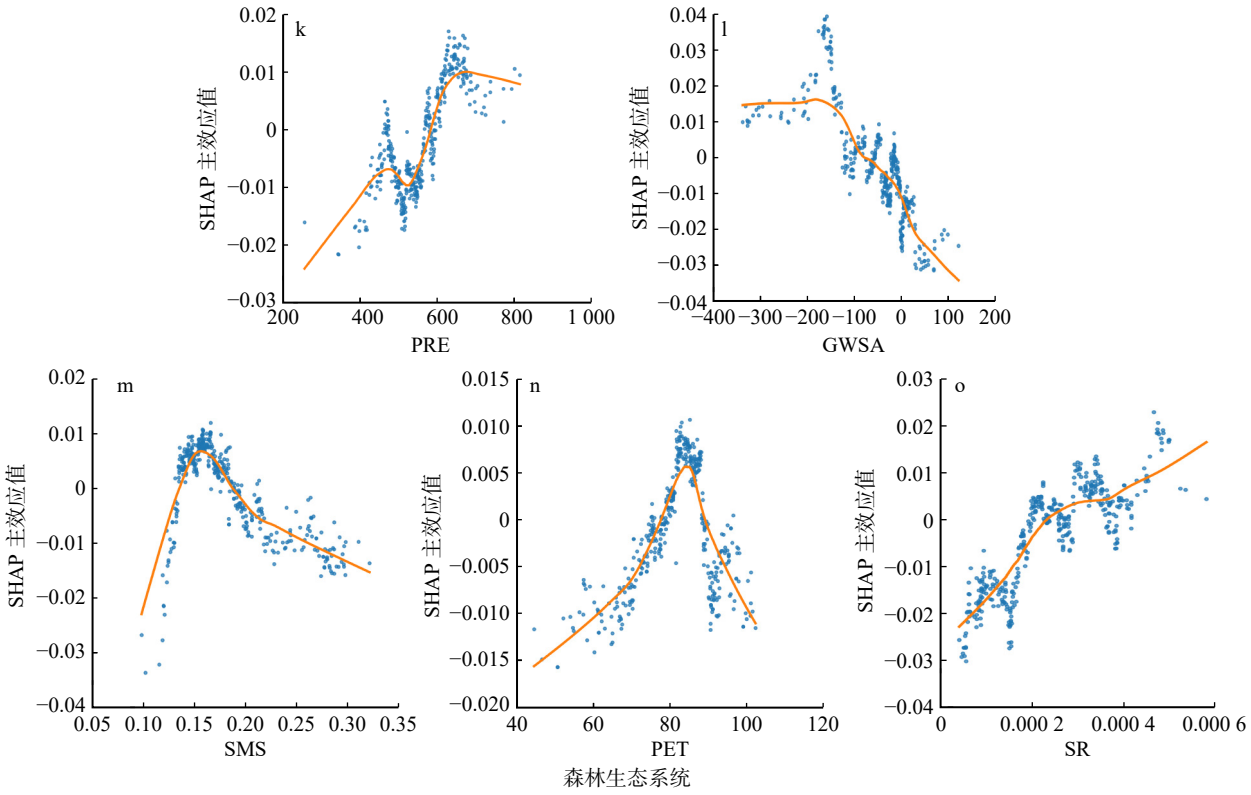



图 5　2002—2022 年水文循环要素 SHAP 主效应值依赖图

Fig. 5　SHAP dependence plot of main effect values of hydrological cycle elements from 2002 to 2022

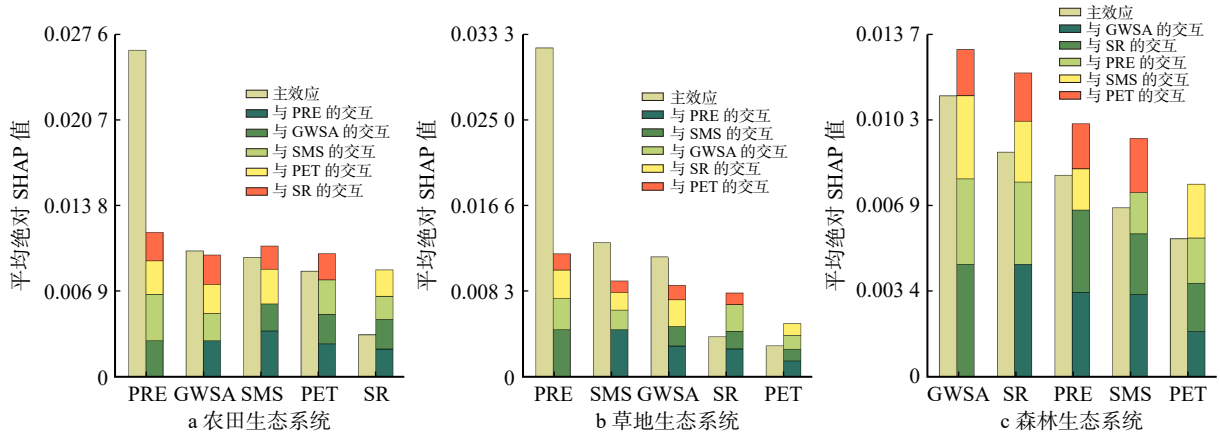



图 6　2002—2022 年水文要素主效应与交互效应堆积柱状图

Fig. 6　Stacked bar chart of SHAP main effect and interaction effect of hydrological elements from 2002 to 2022

文要素响应的差异，包括降水需求、潜在蒸散发适应区间及地下水贡献上限等方面，并初步解析了要素间交互作用。具体而言，降水是农田（贡献率 38.80%）和草地（45.80%）生态系统健康的主导驱动因素，其影响约高于其他水文要素的 2 倍，符合水资源作为半干旱区关键限制因子的特征[17]。降水对生态系统健康的影响差异（图 5 a, f, k），反映出不同植被类型在水文响应和水分利用策略上的本质区别。森林植被通常具有较高根长密度和根表面积，土壤入渗能力优于草地和农田[30]，能更有效地利用降水。但森林复杂的垂直结构、较高的蒸腾速率和较大的生物量会造成水资源需求较高和竞争激烈[31]。例如，刺槐（*Robinia pseudoacacia*）等人工林蒸散量常超出降水量，导致深层土壤干化（＞2 m）和水分过度消耗，威胁系统可持续性[28]。此外，当生态系统遭遇降水不足（如低于历史平均水平）时，易引发土壤水分和碳库耗竭[32]。因此，维系森林生态系统健康需要更高的降水输入。上述影响差异凸显了在黄土高原实施水分适配型分区生态恢复策略的必要性。

在农田和草地中，降水不仅直接驱动生态系统健康，还通过调节土壤湿度和径流等要素发挥“主调控”作用。相比之下，森林生态系统健康更依赖于各

水文要素间的交互与整体耦合，这源于其通过增强根系吸水、增加蒸腾和加强水分循环等链式过程形成更复杂的水文调控机制[33]，从而在应对植被动态与气候变化时表现出更高的稳定性。

潜在蒸散发（PET）的高值和低值均对生态系统健康产生负效应。农田最适 PET 范围较宽，表明其对水汽压力适应性更强。作为陆–气耦合的关键环节，蒸散发受气温和饱和水汽压差（VPD）调控[34]。低温与高 VPD 会抑制植物生理活性，限制光合作用与碳吸收[35]。长期高 VPD 环境易引发树木死亡、植被退化及碳汇衰减[36]，直接威胁生态系统健康。农田管理措施[37]能有效缓解极端蒸散发的负面影响。研究表明，干旱地区提高作物蒸腾占比（Tr / ET）是提升水分利用效率的关键[37]，例如玉米（*Zea mays*）在地膜覆盖与滴灌条件下 Tr / ET 可提高 5%～12%[38−39]。气候变化可能加剧 PET 波动与大气干旱风险，需通过选育抗旱高效品种、推广滴灌和覆盖保墒等适应性管理策略优化水分利用效率[37]。

地下水储量异常（GWSA）对森林生态系统健康的贡献通常高于农田和草地（图 4），可能与不同植被功能型对地下水埋深的响应差异有关。例如，陕北黄土高原[40]的深根系植物（如沙柳 *Salix cheilophila*）能够利用深层地下水来满足其水分需求，而浅根系植物（如油蒿 *Artemisia ordosica*）则主要依赖由降水补给的土壤水。此外，虽然 GWSA 升高总体上对生态系统健康有正向贡献，但其边际贡献率（或贡献效率）随 GWSA 增加而减弱（图 5b，g，l），这表明生态系统健康对地下水的响应可能存在饱和阈值或上限。该现象可能与 GWSA 持续增加导致地下水位上升、埋深变浅有关。通常情况下，浅地下水埋深通过缓解水分胁迫显著促进植被生产力，但当埋深低于某一生态阈值后，促进作用将减弱甚至消失[41]。此外，在水分限制区，地下水支持生产力，而在湿润地区，浅地下水位可能因土壤厌氧环境、蒸散损失或结构扰动等因素抑制生产力[42]。

## 4 结论与展望

2002—2022 年黄土高原生态系统健康整体呈上升趋势，表现为森林 > 农田 > 草地；其中森林生态系统高等级区增加最为显著，占比增加 35.52%，由中部向东部扩展；草地生态系统低等级区减少最为显著，占比降低 25.60%，向西部收缩。生态系统健康演变具有维持原有状态的稳定性，邻域背景通过空间溢出效应显著影响等级转移：低等级区具负向溢出效应加剧邻域退化；高等级区具正向溢出效应增加邻域向上转移概率。在驱动因素方面，农田和草地生态系统对水文要素变化敏感，降水起主导作用，其贡献率高于其他水文要素的 2 倍；相比之下，森林生态系统健康受多水文要素耦合作用的影响更为显著。此外，生态系统健康对地下水响应存在差异与上限，潜在蒸散发对农田的影响范围相对更宽，其交互效应总和约为单因子主效应的 1.18～1.43 倍。

本研究深化了对不同生态系统健康与水文循环要素关系的理解，但评价体系仍有待完善。未来研究可拓展指标维度，如纳入生态系统服务指标，构建多尺度评价体系。此外，受数据所限，当前水文要素精度有限，特别是对土壤水分垂直分层刻画不足，未来可考虑结合生态水文耦合模型，融合高分辨率遥感与地面观测，进一步揭示完整水文过程对生态系统健康的驱动机制。

## 参 考 文 献


[1] 范雯萱, 刘金成. 基于 CASA 模型的黄土高原植被生产力时空动态及其对气候因子的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4): 13−22.
Fan W X, Liu J C. Spatiotemporal dynamics of vegetation productivity and its response toclimate factors in the Loess Plateau based on the CASA model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 13−22.

[2] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110−1117.
Fu B J, Liu Y S, Cao Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110−1117.

[3] Su M R, Xie H, Yue W C, et al. Urban ecosystem health evaluation for typical Chinese cities along the belt and road [J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 572−582.

[4] Javaid M, Shafi A, Hamid A, et al. Dynamics of the wetland ecosystem health in urban and rural settings in high altitude ecoregion [J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166566.

[5] 徐小博, 田哲豪, 佟一杰, 等. 粪甲虫衰减与草地生态系统健康的关联及应对策略 [J]. 生态学报, 2025, 45(22): 10823−10833.
Xu X B, Tian Z H, Tong Y J, et al. The association between dung beetle decline and grassland ecosystem health: strategies for mitigation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): 10823−10833.

[6] 张玉荣, 潘保柱, 冯治远, 等. 泾河流域生态健康评价及驱动因素研究—基于底栖动物生物完整性 [J]. 中国环境科学, 2025, 45(10): 5706−5717.
Zhang Y R, Pan B Z, Feng Z Y, et al. Evaluation of ecological health and driving factors in Ching River Basin: a study based on biological integrity of benthic macroinvertebrates [J]. China Environmental Science, 2025, 45(10): 5706−5717.

[7] Wang X Y, Yao W F, Luo Q Z, et al. Spatial relationship between ecosystem health and urbanization in coastal mountain city, Qingdao, China [J]. Ecological Informatics, 2024, 79: 102458.

[8] Chen M H, Chen F, Tang C J, et al. Integration of DPSIR framework and TOPSIS model reveals insight into the coastal zone ecosystem health [J]. Ocean & Coastal Management, 2022, 226: 106285.

[9] Shen W, Li Y, Qin Y C. Research on the influencing factors and multi-scale regulatory pathway of ecosystem health: a case study in the middle reaches of the Yellow River, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 406: 137038.

[10] Lin X, Wang Z T, Bao Y. Integrating ecosystem stress into the assessment of ecosystem health in karst areas and exploring its driving factors [J]. Ecological Indicators, 2024, 167: 112662.

[11] 李凤, 周文佐, 邵周玲, 等. 2000—2018 年西秦岭景观格局变化及生态系统健康评价 [J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1338−1352.
Li F, Zhou W Z, Shao Z L, et al. Landscape pattern changes and ecosystem health assessment in the Western Qinling Mountains from 2000 to 2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1338−1352.

[12] 罗鹏, 谈存峰, 齐婷婷. 基于 PSR 模型的黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 180−189.
Luo P, Tan C F, Qi T T. Evaluation and prediction of ecosystem health in Gansu section of Yellow River basin based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 180−189.

[13] 王雅慧, 赵安周, 刘宪锋, 等. 黄土高原生态系统健康时空演变及其驱动因素分析 [J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4558−4567.
Wang Y H, Zhao A Z, Liu X F, et al. Analysis of spatial and temporal evolution of ecosystem health and its driving factors on the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2025, 46(7): 4558−4567.

[14] Liu Y B, Liu J, Yin X J, et al. Human activities and ecosystem health: a historical analysis of Poyang Lake [J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112446.

[15] Gu T S, Zhao H B, Yue L, et al. Attribution analysis of urban social resilience differences under rainstorm disaster impact: insights from interpretable spatial machine learning framework [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 118: 106029.

[16] 赵宏波, 谷天顺, 孙东琪, 等. “三生”功能视角下黄河流域城市人居环境动态演变与机制 [J]. 地理学报, 2023, 78(12): 2973−2999.
Zhao H B, Gu T S, Sun D Q, et al. Dynamic evolution and influencing mechanism of urban human settlements in the Yellow River Basin from the perspective of “production-living-ecological” function [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(12): 2973−2999.

[17] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, et al. Vegetation resilience does not increase consistently with greening in China’s Loess Plateau [J]. Communications Earth & Environment, 2023, 4(1): 336.

[18] Ouyang X, Wei X, Wei G E, et al. The expansion efficiency of urban land in China’s urban agglomerations and its impact on ecosystem services [J]. Habitat International, 2023, 141: 102944.

[19] Li X, Yu K X, Xu G C, et al. Quantifying thresholds of key drivers for ecosystem health in large-scale river basins: a case study of the upper and middle Yellow River [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 383: 125480.

[20] Chen J K, Wang K X, Du P J, et al. Quantifying the main and interactive effects of the dominant factors on the diurnal cycles of land surface temperature in typical urban functional zones [J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 114: 105727.

[21] Guo J, Fan L X, Feng P F, et al. Response of vegetation evapotranspiration to landscape pattern changes in an arid region: a case study of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2025, 252: 108878.

[22] Kang P, Chen W P, Hou Y, et al. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 1442−1454.

[23] Li S F, Hong Z L, Xue X P, et al. Evolution characteristics and multi-scenario prediction of habitat quality in Yulin City based on PLUS and InVEST models [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11852.

[24] Yin J B, Guo S L, Wang J, et al. Thermodynamic driving mechanisms for the formation of global precipitation extremes and ecohydrological effects [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(1): 92−110.

[25] Zhang X P, Wu T X, Du Q Q, et al. Spatiotemporal changes of ecosystem health and the impact of its driving factors on the Loess Plateau in China [J]. Ecological Indicators, 2025, 170: 113020.

[26] Sakamoto H, Islam N. Convergence across Chinese provinces: an analysis using Markov transition matrix [J]. China Economic Review, 2008, 19(1): 66−79.

[27] Wang Y, Wang H, Zhang J, et al. Exploring interactions in water-related ecosystem services nexus in Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 336: 117550.

[28] Ma Y, Chen H, Liu D, et al. Identification and management of priority regulation areas based on the supply-demand relationship of ecosystem services: a case study of the Loess Plateau [J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111754.

[29] Crouzeilles R, Curran M. Which landscape size best predicts the influence of forest cover on restoration success? a global meta-analysis on the scale of effect [J]. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(2): 440−448.

[30] Ren X Y, Zhang Q, Yue P, et al. Environmental and biophysical effects of the Bowen ratio over typical farmland ecosystems in the Loess Plateau [J]. Remote Sensing, 2022, 14(8): 1897.

[31] Zhang, S Y, Zhao G J, Fan J J, et al. Variations of soil infiltration in response to vegetation restoration and its influencing factors on

the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 372: 123356.

[32] Au J, Bloom A A, Parazoo N C, et al. Forest productivity recovery or collapse? Model-data integration insights on drought-induced tipping points [J]. Global Change Biology, 2023, 29(19): 5652−5665.

[33] Liang W, Fu B J, Wang S, et al. Quantification of the ecosystem carrying capacity on China's Loess Plateau [J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 192−202.

[34] Zhang F R, Sun J N, Wang M Q, et al. Impacts of vegetation change on contribution of recycled moisture to precipitation on the Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2025, 663: 134204.

[35] 刘璐, 张圣微, 周莹, 等. 内蒙古参考蒸散量对饱和水汽压差和温度的滞后响应 [J]. 中国草地学报, 2025, 47(9): 82−94.
Liu L, Zhang S W, Zhou Y, et al. Hysteretic response of reference evapotranspiration to vapor pressure deficit and temperature in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(9): 82−94.

[36] Zhong Z Q, He B, Wang Y P, et al. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity [J]. Science Advances, 2023, 9(32): eadf3166.

[37] He B, Chen C, Lin S R, et al. Worldwide impacts of atmospheric vapor pressure deficit on the interannual variability of terrestrial carbon sinks [J]. National Science Review, 2022, 9(4): nwab150.

[38] Qiu R J, Katul G G, Zhang L, et al. The effects of changing environments, abiotic stresses, and management practices on cropland evapotranspiration: a review [J]. Reviews of Geophysics, 2025, 63(1): e2024RG000858.

[39] Zhang Y Q, Wang J D, Gong S H, et al. Effects of film mulching on evapotranspiration, yield and water use efficiency of a maize field with drip irrigation in northeastern China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 205: 90−99.

[40] 刘深思, 徐贵青, 李彦, 等. 5 种沙地灌木对地下水埋深变化的响应 [J]. 生态学报, 2021, 41(2): 615−625.
Liu S S, Xu G Q, Li Y, et al. Difference and consistency of responses of five sandy shrubs to changes in ground water level in the Hailiutu River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 615−625.

[41] Glanville K, Sheldon F, Butler D, et al. Effects and significance of groundwater for vegetation: a systematic review [J]. Science of the Total Environment, 2023, 875: 162577.

[42] Koirala S, Jung M, Reichstein M, et al. Global distribution of groundwater-vegetation spatial covariation [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(9): 4134−4142.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）