

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.029

CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.029

邓钰妆,陈国坤,黄燕,等.洱海流域水源涵养与土壤保持功能时空演变及权衡协同关系[J].水土保持学报,2026,40(1):438-450.

DENG Yuzhuang, CHEN Guokun, HUANG Yan, et al. Spatiotemporal evolution of trade-off and synergy relationship between water conservation and soil retention functions in Erhai Lake basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):438-450.

## 洱海流域水源涵养与土壤保持功能 时空演变及权衡协同关系

邓钰妆<sup>1</sup>, 陈国坤<sup>1,2,3</sup>, 黄燕<sup>1</sup>, 郭乾坤<sup>4</sup>, 蔺宏宏<sup>5,6</sup>, 冯俊鑫<sup>7</sup>

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093; 2.云南省定量遥感重点实验室,昆明 650093;  
3.云南省山地灾害天空地一体化智慧监测国际联合实验室,昆明 650093; 4.中国水利水电科学研究院,  
北京 100048; 5.云南大学国际河流与生态安全研究院,昆明 650500; 6.云南省水土流失防治与  
绿色发展重点实验室,昆明 650500; 7.北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

**摘要:** [目的] 为厘清2000—2020年洱海流域水源涵养与土壤保持服务的时空演变规律、空间耦合关系及其背后的驱动机制,提升高原湖泊流域的生态管理水平。[方法] 基于InVEST与CSLE模型,定量评估洱海流域2000—2020年水源涵养与土壤保持服务的时空演变格局,并结合地理探测器方法识别主控因子,通过协同-权衡识别方法与空间自相关分析,探讨二者耦合关系及其空间异质性。[结果] 1)2000—2010年洱海流域产水量下降42.19%,2020年虽有所回升,但整体水源涵养功能较2000年下降21.3%;土壤保持量则持续上升,2020年比2000年增加 $2.19 \times 10^6$  t。林地在2类服务中贡献最大,分别占水源涵养总量的56.61%和土壤保持总量的72.64%;耕地和草地对服务功能表现出差异性影响。2)水源涵养主要受气候因子与土壤类型驱动,PET与TR交互解释力最高( $q=0.63$ );土壤保持功能则具有更高的系统复杂性,涉及气候-土壤-人为-地形等多因子协同作用,PRE与TR组合的解释力最高( $q=0.71$ )。人类活动在一定自然背景下对生态系统服务具有显著的调制效应。3)2类服务整体以权衡关系为主(占比66.28%),协同关系主要集中于西部林草植被覆盖良好地带。[结论] 洱海流域生态管理应聚焦于协调水源涵养下降与土壤保持增强的权衡关系,管控气候-土壤及人为活动的交互影响,以实现区域生态服务的协同提升。

**关键词:** 洱海流域; 生态系统服务; InVEST模型; CSLE模型; 水源涵养; 土壤保持; 协同权衡

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0438-13

## Spatiotemporal Evolution of Trade-off and Synergy Relationship between Water Conservation and Soil Retention Functions in Erhai Lake Basin

DENG Yuzhuang<sup>1</sup>, CHEN Guokun<sup>1,2,3</sup>, HUANG Yan<sup>1</sup>, GUO Qiankun<sup>4</sup>, LIN Honghong<sup>5,6</sup>, FENG Junxin<sup>7</sup>

(1.Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2.Yunnan Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing, Kunming 650093, China; 3.Yunnan International Joint Laboratory for Integrated Sky-Ground Intelligent Monitoring of Mountain Hazards, Kunming 650093, China; 4.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 5.Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China; 6.Yunnan Key Laboratory of Soil Erosion Prevention and Green Development, Yunnan University, Kunming 650500, China; 7.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** [Objective] To enhance the ecological management of plateau lake basins, this study clarifies the spatiotemporal evolution, spatial coupling, and underlying driving mechanisms of water retention and soil conservation services in the Erhai Lake Basin from 2000 to 2020. [Methods] Based on the InVEST and Chinese Soil Loss Equation (CSLE) models, the spatiotemporal evolution of water retention and soil conservation services

收稿日期: 2025-06-30

修回日期: 2025-09-24

录用日期: 2025-10-16

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-11

资助项目: 云南省科技厅基础研究计划面上项目(202401AT070366, 202501AT070326); 云南省创新引导与科技型企业培育计划项目(202304BT090019)

第一作者: 邓钰妆(2000—),女,硕士研究生,主要从事遥感图像处理与信息分析研究。E-mail: dengyuzhuang@stu.kust.edu.cn

通信作者: 陈国坤(1989—),男,博士,硕士生导师,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: chengk@radi.ac.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

in the Erhai Lake Basin from 2000 to 2020 was quantitatively assessed. The Geodetector method was applied to identify dominant controlling factors, while synergy and trade-off identification methods and spatial autocorrelation analysis were used to explore their coupling relationships and spatial heterogeneity. [Results] 1) From 2000 to 2010, water yield in the basin decreased by 42.19%. Although it recovered slightly by 2020, the overall water retention function declined by 21.3% compared to 2000. Soil conservation, however, increased continuously, rising by  $2.19 \times 10^6$  tons from 2000 to 2020. Forest land contributed most significantly to both services, accounting for 56.61% of total water retention and 72.64% of total soil conservation amount. Cropland and grassland exhibited differentiated impacts on ecosystem services. 2) Water retention was primarily driven by climatic factors and soil types, with the interaction between PET and TR showing the highest explanatory power ( $q=0.63$ ). Soil conservation service displayed higher system complexity, jointly influenced by climate, soil, human activities, topography, where the PRE-TR combination yielded the strongest explanatory power ( $q=0.71$ ). Additionally, human activities exerted significant modulating effects on ecosystem services under specific natural conditions. 3) A trade-off relationship dominated the two services (66.28%), while synergistic relationships were mainly concentrated in western areas with well-vegetated forests and grasslands. [Conclusion] Ecological management in the Erhai Lake Basin should prioritize balancing the trade-off between declining water conservation and increasing soil retention. Regulating the interactive effects of climate, soil, and human activities is key to promoting synergistic improvement of regional ecosystem services.

**Keywords:** Erhai Lake basin; ecosystem services; InVEST model; CSLE model; water conservation; soil retention; synergy and trade-off

Received: 2025-06-30

Revised: 2025-09-24

Accepted: 2025-10-16

Online(www.cnki.net): 2025-11-11

生态系统服务(ecosystem services, ESs)是人类赖以生存与发展的自然基础,涵盖供给、调节、支持和文化等多种类型<sup>[1-2]</sup>,其系统性识别、量化评估及相互作用机制研究,已成为当前地理学、生态学与环境科学研究的前沿方向<sup>[3-4]</sup>。在众多服务类型中,调节类服务中的水源涵养与土壤保持在维系区域水土资源安全和生态系统稳定性方面具有关键作用:前者通过植被拦截、降水入渗和蓄积调节流域径流过程,是维护流域水文平衡的关键机制<sup>[5]</sup>;后者则通过地表植被阻滞侵蚀能量、增强地表稳定性和控制侵蚀过程,有效减少土壤流失和泥沙入湖<sup>[6]</sup>。然而,联合国千年生态系统评估(MA)指出,水源涵养与土壤保持等调节服务正面临多重压力,全球超过60%的此类功能存在退化风险<sup>[7]</sup>。在自然过程和人类活动双重作用下,两类服务既可能表现为协同效应,也可能表现为权衡关系<sup>[2,8]</sup>,因此,揭示其耦合机制已成为区域生态系统管理的重要科学问题。

近年来,生态系统服务评估研究持续深化,调节类服务的空间异质性及耦合机制日益受到关注<sup>[9]</sup>。已有研究<sup>[10]</sup>表明,水源涵养功能受气候因子(降水、蒸散发)、土壤类型及土地利用格局的共同影响,而土壤保持功能则与降雨侵蚀力、土壤属性、地形及水土保持措施密切相关<sup>[6,11]</sup>。在模型应用方面,

InVEST模型因数据需求适中、可表征景观异质性而被广泛应用于流域尺度水文服务模拟<sup>[12-13]</sup>;USLE及其改进模型(如RUSLE、CSLE)则常用于土壤侵蚀与保持量估算。其中,CSLE模型针对中国复杂地形和水土保持实践进行本土优化<sup>[14]</sup>,表现出更高适用性,相关应用已从坡面单元拓展至流域与区域尺度,尤其在地形起伏明显和农业活动强烈的地区显示出良好效果<sup>[15]</sup>。地理探测器(Geodetector)能够定量解析自然与人文因子对空间分异的解释力,被广泛用于揭示生态系统服务的驱动机制<sup>[16]</sup>。

在生态系统服务交互关系研究中,协同/权衡分析框架逐渐成熟<sup>[17-18]</sup>。常见方法包括相关性分析、主成分分析、聚类分析、双变量空间自相关及地理探测器等<sup>[19-20]</sup>。近年来,部分研究尝试构建协同指数、供需耦合模型及多功能权衡矩阵,以刻画服务间的复杂互动关系及其对土地利用决策的响应<sup>[21-22]</sup>。如ARYAL等<sup>[8]</sup>对全球200余篇实证研究进行系统综述后指出,生态系统服务间普遍存在明显的权衡特征,但区域差异显著;YUAN等<sup>[23]</sup>在青藏高原的研究发现,气候变化与土地利用共同作用下,调节类服务间呈现出强烈的空间异质性;ZUO等<sup>[24]</sup>则强调应将生态系统服务权衡协同机制与可持续发展目标(SDGs)紧密结合,以提升生态管理的科学决策水

平。尽管如此,当前研究仍存在以下不足:1)多数研究集中于平原、丘陵或黄土高原等典型区<sup>[25-26]</sup>,而对高原湖泊流域特殊生态系统关注较少,相关调节服务的耦合机制研究明显不足。2)大多数研究侧重于揭示空间格局特征,缺乏对服务互动机制及多因子协同作用的深入剖析,尤其是在自然因子与人类活动交互条件下的作用机制研究仍显不足<sup>[2,27]</sup>。3)在模型应用方面,虽然 InVEST 与 CSLE 模型在稳态建模上具有优势,但现有研究往往未充分考虑模型的适用前提条件。如利用 CSLE 模型估算土壤保持量时,常通过简单地类赋值而忽视水土保持措施的区域差异,且模型估算结果的验证不足<sup>[11]</sup>。

洱海流域作为中国西南典型的高原湖泊生态区,具有重要的生态屏障功能。近年来,受农业结构调整、旅游业扩张及城镇化发展等多重因素影响,区域水源涵养能力下降、农业面源污染加剧、水土流失风险增加,流域生态系统面临严峻挑战。已有研究<sup>[28]</sup>多聚焦于水质监测、景观格局变化及生态保护红线划定,而对水源涵养与土壤保持功能的综合评估、权衡协同识别及驱动机制解析仍缺乏系统研究,特别是在考虑复杂地形异质性与土地利用演变背景下。

基于此,本文以洱海流域为例,综合运用 InVEST-CSLE 模型模拟 2000 年、2010 年、2020 年水源涵养与土壤保持功能的时空演变,引入地理探测器方法识别自然与人类活动因子的主控作用,并结合协同-权衡识别与空间自相关方法,系统分析两类服务的空间交互格局与驱动机制:1)定量揭示洱海流域水源涵养与土壤保持功能的时空分布特征;2)识别二者协同与权衡关系的空间分异与动态演变规律;3)解析关键自然因子与人类活动对二者耦合关系的驱动机制。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

洱海流域(25°25'~26°10'N,99°32'~100°27'E)位于云南省中部的大理白族自治州,属澜沧江一级支流洱海水系上游,地处云贵高原西缘低纬高原山地地貌区(图 1)。洱海作为生态环境部“新三湖”重点保护对象之一,湖面面积约 256 km<sup>2</sup>,流域总面积约 2 565 km<sup>2</sup>,兼具气候调节、生物多样性维持、水源涵养等多重生态功能。洱海流域不仅是中国西南地区生态屏障的重要组成部分,也是全国生物多样性保护的关键区域之一<sup>[28-29]</sup>。

流域整体地势由西北向东南倾斜,湖盆周边以山地和丘陵为主,呈现典型的“湖-田-山”复合地貌格局。气候类型属亚热带季风气候,年平均降水量

1 048 mm,年平均气温 15.3℃,雨季集中于 5—10 月,年内降水时空分布不均,进一步加剧季节性径流变化与水土流失风险<sup>[30]</sup>。流域土壤类型以黄棕壤和山地红壤为主,土地利用类型以林地、耕地和建设用地为主,是典型的生态敏感与人类活动强度交织区<sup>[31]</sup>。近年来,建设用地与旅游开发用地扩张迅速,导致生态系统服务压力持续加大。

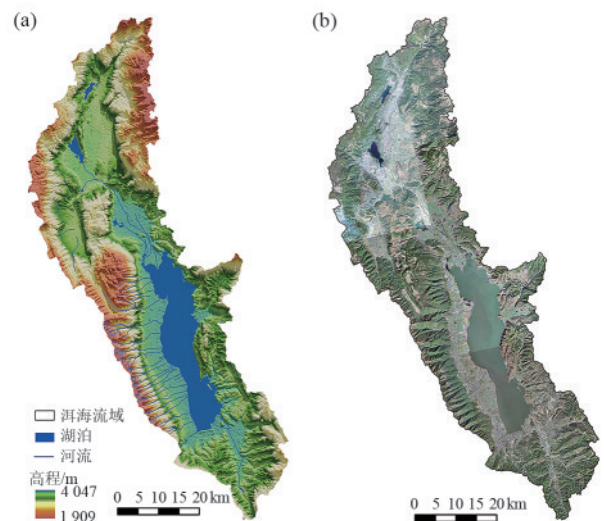


图 1 研究区 DEM 和高分遥感影像

Fig. 1 DEM and high-resolution remote sensing imagery of the study area

### 1.2 数据来源

本研究以 2000 年、2010 年、2020 年为研究年份,采用多源、多类型遥感与统计数据进行分析(图 2、图 3)。主要数据来源及处理方法为:

1)土地利用数据。基于国土变更调查数据、多期高分影像和实地调查,整合 7 套常用非同源土地利用/覆盖数据,经过自动分类与人工后处理校正,空间分辨率为 10 m(图 2),详见课题组前期研究成果<sup>[30]</sup>。

2)DEM 数据。ALOS DEM(12.5 m),源于美国阿拉斯加大学费尔班克斯地球物理研究所(<https://search.asf.alaska.edu/>),用于提取坡度、坡长等地形因子,并参与水文模拟与土壤保持量计算。

3)气象数据。包括年平均降水量、年平均气温及潜在蒸散发等,均获取自中国科学院资源环境科学与数据中心的公开数据平台(<https://www.resdc.cn>),空间分辨率为 1 km,用于 InVEST 模型计算与分析气候对生态系统服务的影响。

4)土壤数据。源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/>),包括土壤类型与土壤质地、有机碳、pH、砂粒、粉粒和黏粒质量分数等,用于估算植物可利用含水量与土壤可蚀性提供依据。

5)NDVI 数据源于 NASA(<https://neo.scigsfc>。

nasa.gov)所提供的MOD13Q1数据,重访周期为16 d,空间分辨率为250 m,为进一步消除噪声污染,使用Savitzky-Golay滤波对NDVI进行平滑处理,完成长时序植被覆盖率FVC计算,并参与CSLE模型中生物措施因子(B)估算。

6)高分遥感影像与实地调查数据:采用高分系列(高分二号、七号)遥感影像以及实地调查对土地利用分类、模型参数设定和模拟结果进行辅助验证与校准,影像数据源自国家遥感数据与应用服务平台(<https://www.cpeos.org.cn/>)。

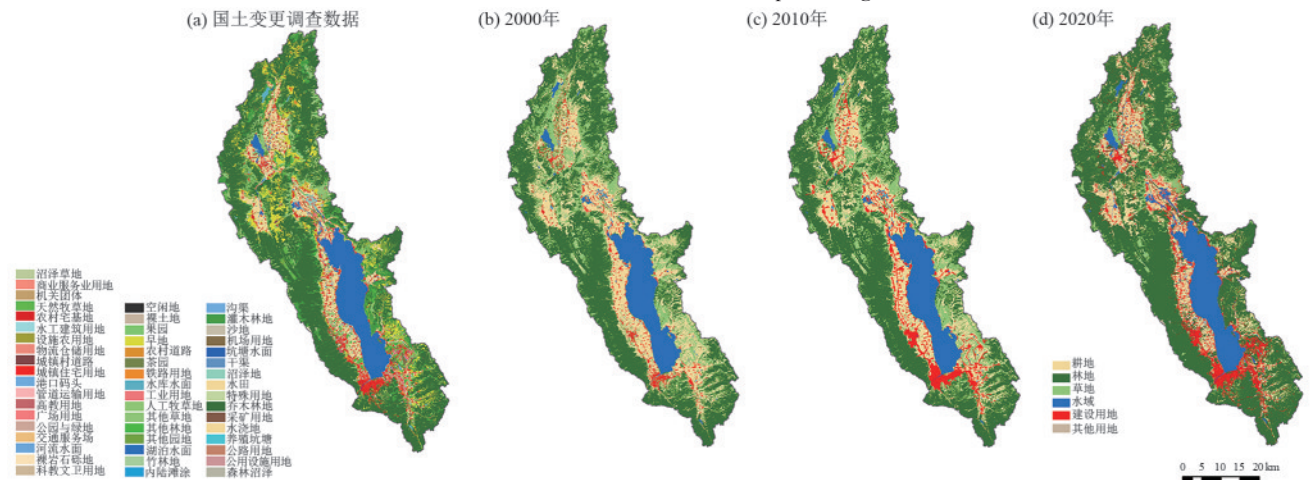


图 2 洱海流域国土变更调查数据及修正后的各时期土地利用类型分布

Fig. 2 Land use survey data and land types in each period after modification in Erhai Lake Basin

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 水源涵养量计算方法

##### 1) 模型原理

本文采用InVEST模型的Water Yield子模块计算像元尺度的产水量,该模块基于Budyko水热耦合理论<sup>[10]</sup>,综合考虑降水、蒸散发、土壤和植被等特征以估算水源涵养能力。计算公式为:

$$Y_{ia} = \left(1 - \frac{AET_{ia}}{P_i}\right) \times P_i \quad (1)$$

$$\frac{AET_{ia}}{P_i} = \frac{1 + W_i R_{ia}}{1 + W_i R_{ia} + \frac{1}{R_{ia}}} \quad (2)$$

式中: $Y_{ia}$ 为第*i*个像元在土地利用类型*a*下的年产水量,mm; $P_i$ 为年降雨量,mm; $AET_{ia}$ 为实际年均蒸散发量,mm; $W_i$ 为植物有效水分体积分数与降雨量的比值; $R_{ia}$ 为干燥指数。 $R_{ia}$ 和 $W_i$ 计算公式为:

$$R_{ia} = \frac{K \times ET_0}{P_i} \quad (3)$$

$$W_i = Z \times \frac{AWC_i}{P_i} \quad (4)$$

$$AWC_i = \text{Min}(\text{SoilDepth}_i, \text{RootDepth}_{ia}) \times PAWC_i \quad (5)$$

式中: $K$ 为植被蒸散系数; $ET_0$ 为潜在蒸散发量,mm; $Z$ 为常数; $AWC_i$ 为植物有效含水量,mm; $\text{SoilDepth}_i$ 为土层深度,mm; $\text{RootDepth}_{ia}$ 为植物根系深度,mm; $PAWC_i$ 为植被可利用含水量,mm。

##### 2) 产水量参数设定与处理

Yield Water模块核心输入参数包括气象要素、下垫面特征、流域边界及根系限制层深度等数据。

根据FAO提供的参考值并结合区域研究成果进行根系限制层深度赋值<sup>[32]</sup>。采用周文佐等<sup>[33]</sup>提出的经验回归公式计算植物可利用含水量(PAWC),计算公式为:

$$PAWC_i = 54.509 - 0.132Sand_i - 0.003Sand_i^2 - 0.055Silt_i - 0.006Silt_i^2 - 0.738Clay_i + 0.007Clay_i^2 - 2.688OM_i + 0.501OM_i^2 \quad (6)$$

式中: $Sand_i$ 、 $Silt_i$ 、 $Clay_i$ 分别为土壤中砂、粉、黏粒质量分数,%; $OM_i$ 为有机碳质量分数,%。上述参数通过世界土壤数据库(HWSD v1.2)获取,土壤有机碳质量分数通过Bemmelen系数<sup>[34]</sup>转换为有机质质量分数。

根据土地利用类型进行生物物理参数(植物根系深度和蒸散系数)分类<sup>[26]</sup>。林地、草地、耕地、未利用地、建设用水体和水面根系深度分别为5 200、2 300、2 100、200、1、1 mm,蒸散系数分别为0.95、0.72、0.65、0.20、0.30、1。其中,水体不具涵养功能,仅用于模拟蒸发过程。

$Z$ 系数与研究区的降水规律有关,根据模拟将修正结果设定为2.0。

##### 3) 水源涵养量计算

基于Water Yield模块模拟的产水量,可结合地形、土壤与水文属性计算水源涵养能力,计算公式为:

$$WR = \min\left(\frac{249}{V}, 1\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y$$

$$TI = \lg\left(\frac{D}{S \times P}\right)$$

$$K_s = 1.148 \times 10^{(-0.6 + 1.26 \times 10^{-2} Sand_i - 6.4 \times 10^{-3} Clay_i)}$$
(7)

式中:WR为水源涵养量,mm;V为流速系数;Y为产水量,mm;TI为地形指数; $K_s$ 为土壤饱和导水率,cm/d;D为研究区集水区的栅格量数,%;S为土层深度,mm;P为坡度,%; $Sand_i$ 为砂粒的质量分数,%, $Clay_i$ 为黏粒的质量分数,%, $Sand_i$ 与 $Clay_i$ 均源于世界土壤数据库。

1.3.2 土壤保持量估算方法 本研究采用CSLE(Chinese soil loss equation)模型对土壤保持功能进行模拟,CSLE模型基于我国典型小流域长期观测数据而建立,能够更好地反映中国复杂地形与水土保持实践。其基本形式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times B \times E \times T \quad (8)$$

式中:A为土壤侵蚀量,t/( $hm^2 \cdot a$ );R为降雨侵蚀力因子,(MJ·mm)/( $hm^2 \cdot h \cdot a$ );K为土壤可蚀性因子,( $t \cdot hm^2 \cdot h$ )/(MJ· $hm^2 \cdot mm$ );L为坡长因子;S为坡度因子;B、E、T分别为水土保持生物、工程、耕作措施因子,无量纲。各因子计算方法参考全国水利普查中的规范和相关文献<sup>[35-36]</sup>。

土壤保持量SC反映生态系统对土壤侵蚀的阻滞能力,其被定义为潜在侵蚀量与实际侵蚀量之差:

$$SC = A_{\text{potential}} - A_{\text{actual}}$$

$$A_{\text{potential}} = R \times K \times L \times S \quad (9)$$

$$A_{\text{actual}} = R \times K \times L \times S \times B \times E \times T$$

$$SC = R \times K \times L \times S(1 - B \times E \times T) \quad (10)$$

式中:SC为单位面积土壤保持量,t/( $hm^2 \cdot a$ ); $A_{\text{potential}}$ 为在无任何水保措施和植被覆盖情境下的潜在侵蚀量,t/( $hm^2 \cdot a$ ); $A_{\text{actual}}$ 为考虑植被覆盖等水保措施后的实际侵蚀量,t/( $hm^2 \cdot a$ )。

1.3.3 双变量局部空间自相关 为进一步探究两项服务在空间上的耦合程度,采用双变量LISA方法检验水源涵养与土壤保持功能的空间耦合格局。通过计算局部Moran's I指数,以评估某一空间单元及其邻近单元在2个变量上的协同变化特征<sup>[20]</sup>,该指数由公式(11)表示。

$$I_i^{kl} = \frac{(x_i^k - \bar{x}^k) \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j^l - \bar{x}^l)}{\sigma^k \sigma^l} \quad (11)$$

式中: $x_i^k$ 和 $x_j^l$ 分别为第*i*个和第*j*个空间单元在变量*k*和*l*上的观测值; $\bar{x}^k$ 和 $\bar{x}^l$ 为变量平均值; $\sigma^k$ 和 $\sigma^l$ 为标准; $\omega_{ij}$ 为空间权重矩阵元素,用于量化*i*和*j*间的邻近关系。

1.3.4 生态系统服务驱动因子分析 地理探测器(geodetector)作为一种非线性、非参数统计方法,因其能有效识别空间分异性并衡量自然与人文因子对生

态格局的解释力,在生态系统服务研究中得到广泛应用<sup>[16]</sup>。为系统探讨洱海流域水源涵养与土壤保持功能的主控因子及其交互机制,本研究运用其分析4类驱动因子(表1)对生态系统服务空间分异的影响机制,采用单因子作用和双因子交互效应分析的综合评估框架。其核心统计量为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (12)$$

式中:*q*为驱动因子的解释力,*q*值越接近1,说明该因子对响应变量的解释力越强;*i*为自变量或因变量的分层; $N_i$ 为第*i*层的单元数量;*N*为全域的单元数量; $\sigma_i^2$ 为第*i*层内因变量的方差; $\sigma^2$ 为全域内因变量的方差。

交互作用探测方法能够解析多驱动因子间的协同影响机制,通过量化比较各因子独立作用*q*( $X1$ )、*q*( $X2$ )与交互作用*q*( $X1 \cap X2$ )的解释力差异,评估双因子组合对响应变量*Y*的空间分异性产生的增强、减弱或独立效应。表2为5类交互作用类型及判别标准。

1.3.5 权衡-协同分析方法 通过逐像元Pearson相关系数识别两类服务的协同与权衡关系:

$$R_{(ij)} = \frac{\sum_{n=1}^n (ES1_{n(ij)} - \overline{ES1_{(ij)}})(ES2_{n(ij)} - \overline{ES2_{(ij)}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (ES1_{n(ij)} - \overline{ES1_{(ij)}})^2 \sum_{n=1}^n (ES2_{n(ij)} - \overline{ES2_{(ij)}})^2}} \quad (13)$$

式中:ES1与ES2为2种生态系统服务的值;*R*为ES1与ES2间的相关系数;*i*、*j*分别为栅格数据中具体像元的行号和列号;*n*为栅格数据的时间序列。

## 2 结果与分析

### 2.1 水源涵养与土壤保持功能时空变化特征

2.1.1 水源涵养功能 2000—2020年,洱海流域多年平均产水总量为8.15亿 $m^3/a$ ,平均产水深度为317.9 mm/a。产水量呈“先降后升”的波动趋势,2000年为10.24亿 $m^3$ (399.2 mm),至2010年下降至5.92亿 $m^3$ (230.8 mm),降幅42.2%;2020年回升至8.31亿 $m^3$ (323.8 mm),但仍低于2000年水平,表明水源供给能力整体下降。空间上,产水量呈“西北高、东南低”格局,高值集中于苍山森林-草地带,低值分布在坝区与湖滨带(图3)。

表 1 驱动因子类型  
Table 1 Types of driving factors

影响因素类型	具体因子
自然地表因子	高程(DEM)、植被覆盖度(FVC)、斑块密度(PD)、斑块聚集指数(AI)
气候因子	年平均温度(TEM)、年平均潜在蒸散量(PET)、年平均降水量(PRE)
人为因子	人口密度(POP)、国内生产总值(GDP)
土壤因子	土壤类型(TR)、土壤 pH、土壤有机质(OM)

注:斑块密度(PD)与斑块聚集指数(AI)为基于Fragstats4.2计算的景观格局指数。

表 2 交互作用探测的交互类型  
Table 2 Interaction types for interaction detection

交互条件	交互作用类型
$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	相互独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

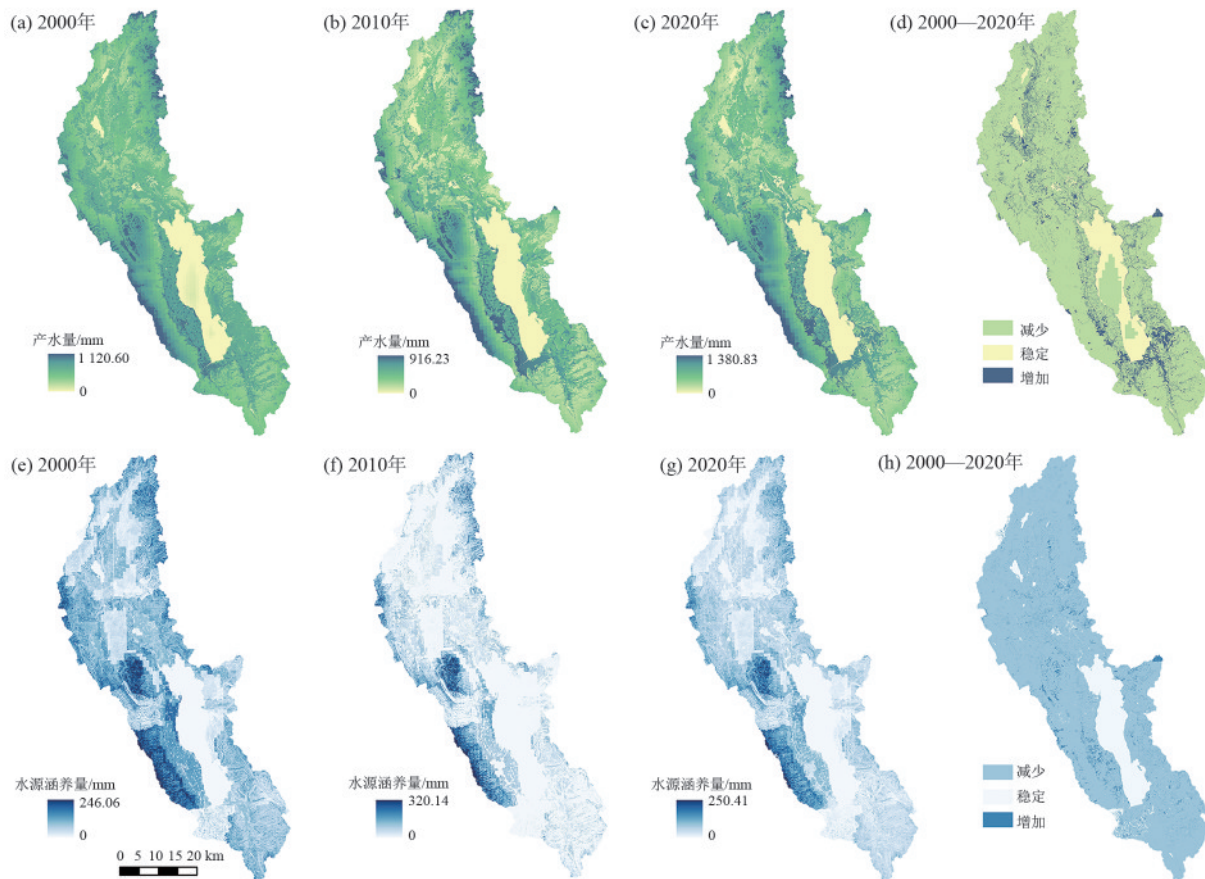


图 3 洱海流域 2000—2020 年产水量与水源涵养量变化

Fig. 3 Changes in water yields and water retention in Erhai Lake Basin from 2000 to 2020

为验证 InVEST 模型产水量模拟的可靠性,选取研究区内边界完整的大理市作为验证对象,将模型结果与《大理州水资源公报》([https://www.dali.gov.cn/dlrmzf/c102607/common\\_list.shtml](https://www.dali.gov.cn/dlrmzf/c102607/common_list.shtml))统计数据进行分析。受数据限制(研究区边界与公报统计单元存在一定差异),验证年份选择 2010 年和 2020 年。结果显示,大理市平均水资源总量为 4.78 亿 m<sup>3</sup>,本研

究模拟值为 4.82 亿 m<sup>3</sup>,相对精度达 99.14%,表明模型在本区具有较高精度和适用性,为水源涵养功能评估提供可靠依据。

2000—2020 年,洱海流域年均水源涵养总量为 1.70 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,2000 年涵养能力最强(2.19 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>),2010 年最低(1.20 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>),2020 年回升至 1.72 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。涵养能力下降区域占 83.94%,稳定区域占

12.01%，增加区域仅占 4.05%，水源涵养功能整体受人为干扰与气候变化双重影响而减弱。空间格局总体呈“西部高、南北低”的分布，高涵养区集中在苍山林地，低值区则分布于湖滨坝区(图 3)。

对不同土地利用类型而言，2000—2020 年单位面积水源涵养能力由高至低依次为草地(8.17 mm) > 林地(7.77 mm) > 耕地(7.58 mm) > 未利用地(4.39 mm) > 建设用地(3.21 mm)。林地在总量贡献中占比最高(56.6%)，其后为耕地(22.4%)和草地(17.7%)。值得注意的是，未利用地尽管面积小，2000—2020 年水源涵养能力增幅达 152%，表明边缘地类在特定情境下仍具一定生态提升潜力。

2.1.2 土壤保持功能 为解析洱海流域土壤侵蚀驱动机制，基于 CSLE 模型对关键指标因子进行定量分析(图 4)表明，流域多年平均降雨侵蚀力( $R$ )为 2 064.52 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)，空间上呈西南

高、东北低的格局。受极端降水事件频发影响，近 20 a  $R$  由 1 949.52 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a) 增至 2 202.20 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)；土壤可蚀性( $K$ )为 0~0.011 3 (t·hm<sup>2</sup>·h)/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>)，平均值约为 0.006 (t·hm<sup>2</sup>·h)/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>)。高值集中在西部和东北部，地形因子( $LS$ )平均值为 4.26。高值集中在南部、西部和北部山区，平原及湖盆区则偏低；生物措施因子( $B$ )近 20 a 平均值由 0.27 降至 0.19，表明生态修复成效显著；工程措施因子( $E$ )值为 0.01~1，全流域平均值较为稳定(0.909~0.917)。高值区为未修复坡耕地，低值区多见于洱海西部的高标准农田区与北部梯田集中的农业区；耕作措施因子( $T$ )值为 0.19~1.00，平均值总体呈上升趋势，表明耕作强度整体增强。高值集中于坡耕地，低值则分布于西部和北部实施轮作、间作和保育耕作的耕地区。

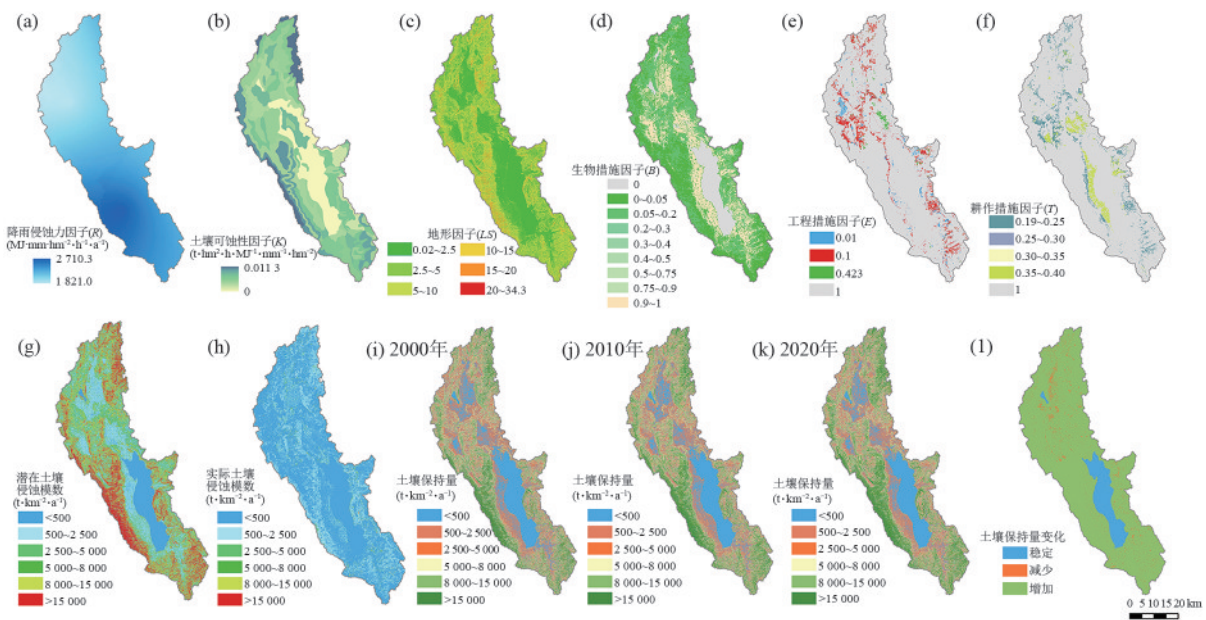


图 4 洱海流域土壤侵蚀因子、侵蚀模数、潜在与实际土壤侵蚀量和土壤保持量变化

Fig. 4 Changes in soil erosion factors, soil erosion modulus, potential and actual soil erosion, and soil conservation amount in Erhai Lake basin

根据 CSLE 模型估算结果(图 4)，2000—2020 年洱海流域年均潜在土壤侵蚀模数为 6 097.8 t/(km<sup>2</sup>·a)，实际侵蚀模数则由 2000 年的 489.7 t/(km<sup>2</sup>·a) 降至 2020 年的 375.5 t/(km<sup>2</sup>·a)，说明在生态修复措施作用下，实际土壤侵蚀逐步减弱。洱海流域年平均土壤保持模数为 5 666.51 t/(km<sup>2</sup>·a)，总量为 14.53 × 10<sup>6</sup> t，2020 年相较 2000 年增加 2.19 × 10<sup>6</sup> t，显示出较强的区域土壤保持能力。

鉴于标准径流小区数据覆盖不足，为检验 CSLE 模型在区域尺度的适用性，本研究引入第一次全国水利普查水土保持专项普查中的抽样单元数据作为

参照，野外调查单元信息具体包括降雨、土壤、地形和水土保持措施等关键参数。通过回归分析对二者进行比较显示(图 5)，本研究计算的土壤侵蚀速率与普查数据具有显著线性相关( $R^2=0.95, p<0.05$ )，说明结果具有可靠性。

对不同地类而言，单位面积土壤保持量由高到低依次为林地 > 未利用地 > 草地 > 建设用地 > 耕地 > 水域。林地平均保持量达 8 486.88 t/(km<sup>2</sup>·a)，占总保持量 72.64%，为主导贡献类型，其后为草地(16.83%)和耕地(7.11%)。从变化趋势看，各类型单位面积保持量整体上升，水域增幅最高(95.83%)，反映水生生态治

理成效显著;林地虽增幅最小(8.87%),但其功能表现最稳定,具备较强生态韧性;未利用地与建设用地分别增长 77.91% 和 75.17%,表明边缘地类在合理管理下亦具备潜在生态提升能力。

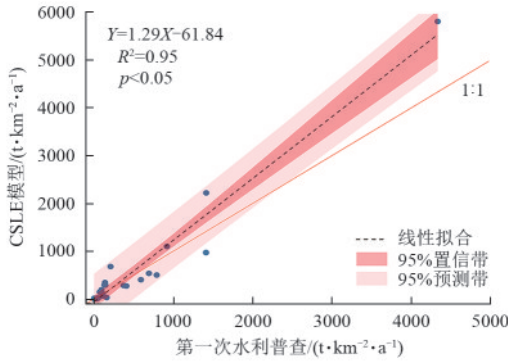
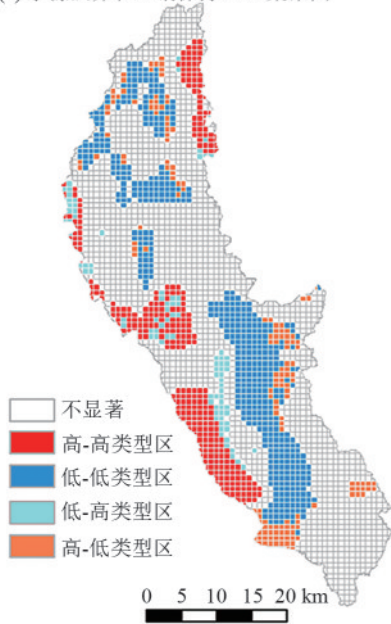


图 5 基于全国水利普查抽样调查数据对估算的土壤侵蚀模数进行验证

Fig. 5 Verification of estimated soil erosion modulus using sampling survey data from the national of China census for water

2.1.3 双变量局部空间自相关分析 双变量LISA分析(图6)表明,洱海流域水源涵养与土壤保持功能存在显著空间正相关性(全局 Moran's  $I=0.48, p<0.01$ )。高-高聚集区(HH)主要位于西部山地,低-低聚集区(LL)集中于坝区和平地。高水源涵养-低土

(a) 水源涵养和土壤保持LISA集聚图



壤保持(HL)区与低水源涵养-高土壤保持(LH)区主要分布于山地与坝区过渡带,异质性明显,需针对不同区域采取差异化管理策略以提升生态系统服务的协同效应。

### 2.2 生态系统服务功能驱动因子分析

2.2.1 水源涵养功能驱动因子 单因子探测结果(图7)表明,PET( $q>0.40$ )在各时期均为最主要驱动因子,其次为PRE、TR、TEM、DEM及OM( $q>0.30$ )。相较之下,FVC、AI及pH的 $q$ 较低(0.10~0.20),社会经济因子(如GDP、POP)解释力最弱( $q<0.10$ )。从因子类型来看,气候因子整体解释力最强,依次为土壤因子、地形因子和社会经济因子,说明气候因子与土壤属性耦合是水源涵养的关键机制。

双因子交互分析结果(图7)表明,各驱动因子间的交互作用普遍存在增强或非线性增强特征。其中,PET与TR交互作用的解释力最高( $q=0.63$ ),FVC×PET、PRE×TR等组合( $q$ 为0.55~0.58)亦表现出增强效应,表明气候因子与土壤属性的耦合是调控水源涵养的关键机制。单一人为因子与自然因子(如PET、DEM)交互作用后解释能力显著提升( $q>0.40$ ),说明人类活动在一定自然背景下对生态系统服务具有显著的调节效应。

(b) 水源涵养和土壤保持Moran's I散点图

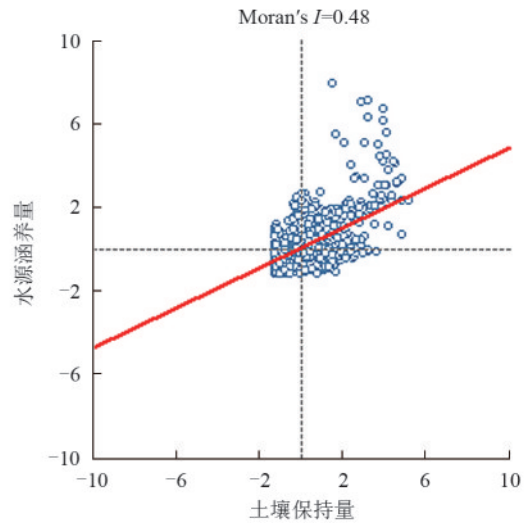


图 6 洱海流域水源涵养和土壤保持服务相关分析

Fig. 6 Correlation analysis between water retention and soil retention in Erhai Lake basin

2.2.2 土壤保持功能驱动因子 土壤保持功能受多种自然因素驱动,以 TR 和 PRE 为主导因素(图7)。2000年与2020年以TR为首( $q>0.53$ ),2010年则由PRE主导( $q=0.55$ )。DEM、TEM、OM和PET对土壤保持也存在重要的解释力, $q$ 均为0.42~0.50。AI、PD、PH和

FVC等因子的 $q$ 偏低( $<0.20$ ),尤其是GDP与POP等社会经济因子的直接驱动作用较为有限( $q$ 约0.14)。双因子交互效应中(图7),TR×PRE解释力最高( $q=0.71$ )。人类活动因子(GDP、POP)单独作用较弱,但与自然因子交互后显著增强(如POP×DEM,  $q=0.68$ )。

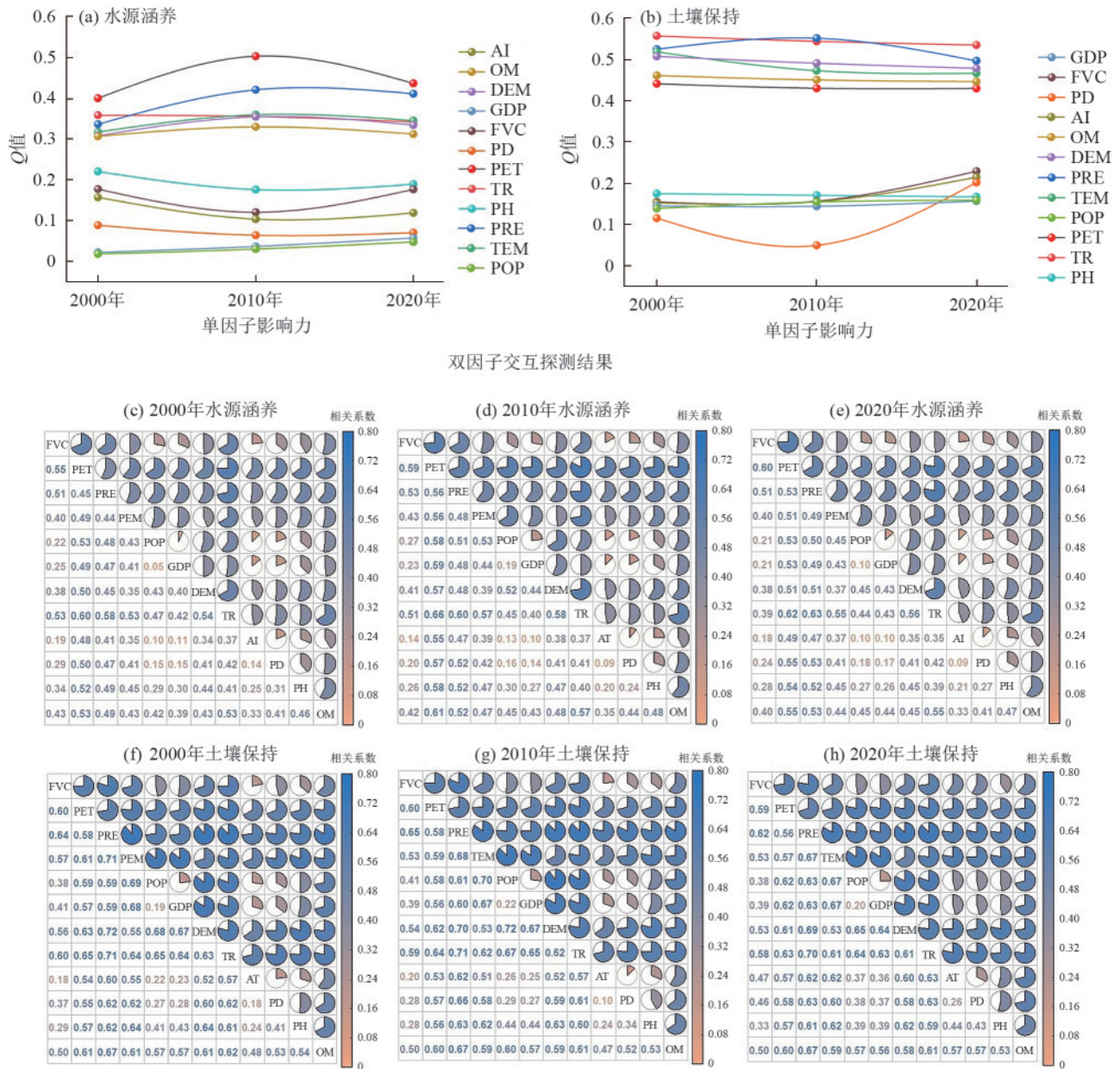


图 7 基于地理探测器的水源涵养和土壤保持功能各影响因子的解释力

Fig. 7 Explanatory power analysis of each influencing factor on water retention and soil conservation services based on Geodetector

2.3 权衡-协同关系分析

生态系统服务间既可能存在权衡,也可能表现为协同。为刻画二者关系的时空格局,本研究基于逐像元相关性分析,利用 Pearson 相关系数对 InVEST 模拟的水源涵养量与 CSLE 估算的土壤保持量进行系统评估,并结合统计显著性划分为强/中/弱的权衡或协同类型。

2.3.1 权衡协同时空特征 结果显示,2000—2020年,洱海流域水源涵养与土壤保持服务整体以权衡关系为主(66.28%),其中弱权衡占比达64.83%;协同关系占(18.46%),主要表现为弱协同(18.36%)。权衡关系广泛分布于流域中下游地区,常与农业开垦和城镇扩张等导致的植被破坏相关,进而引发水源涵

养能力下降和土壤侵蚀加剧。相比之下,流域上游及苍山等地的林草区呈现出较明显的协同效应,即水源涵养与土壤保持功能同步提升。

2.3.2 不同土地利用类型的权衡协同关系 洱海流域不同土地利用类型的水源涵养与土壤保持关系总体以权衡为主(面积占比均>50%)。其中,林地和耕地既有显著权衡效应(>70%),也呈现一定协同潜力,是2类服务调控的关键类型。草地权衡与协同状态基本平衡(权衡54.51%,协同39.81%),展现出较强生态韧性;建设用地与未利用地以强烈权衡关系为主(分别为89.93%与78.53%),协同能力极弱。从地类构成看(图8),权衡关系主要由耕地(弱权衡占比最高)、建设用地(强权衡贡献突出)驱动,而协

同关系高度依赖林地、草地、水域的自然功能共生,反映人类活动强度直接影响服务关系性质,凸显自

然生态系统在维持服务协同中的关键作用及人类干扰区权衡风险。

(a) 空间分布特征

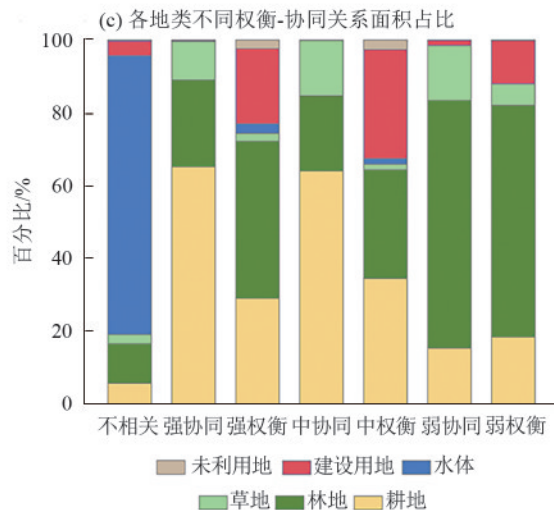
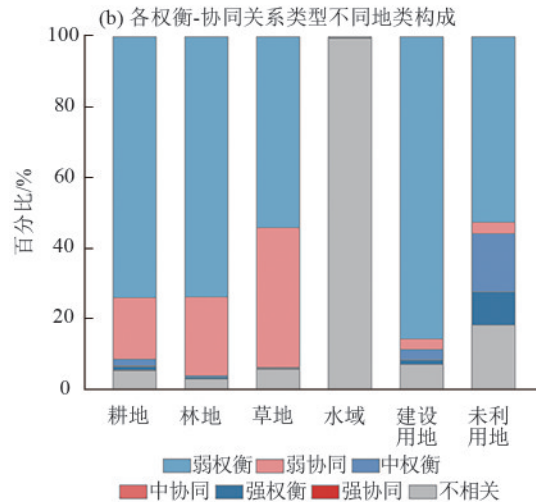
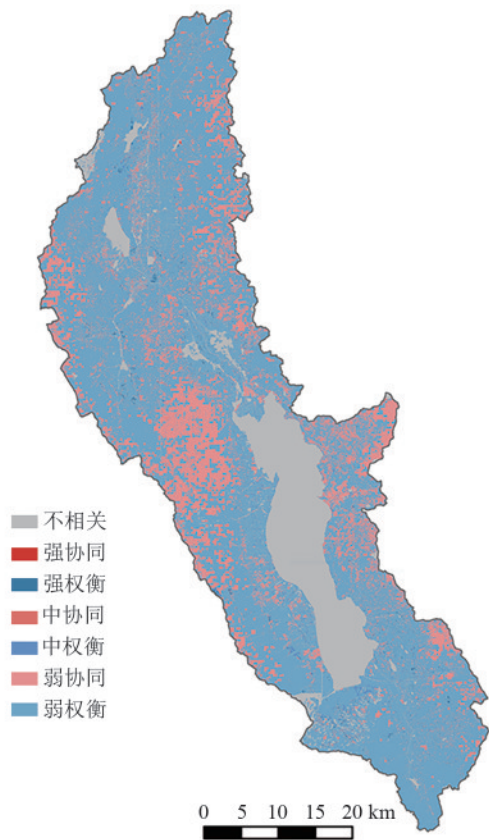


图 8 洱海流域生态系统服务权衡协同关系及构成

Fig. 8 Trade-off/synergy relationships and constitution of ecosystem services in Erhai Lake basin

### 3 讨论

#### 3.1 水源涵养与土壤保持的差异性响应机制

本研究发现,2000—2020年洱海流域水源涵养功能整体下降21.3%,而土壤保持功能则增强 $2.19 \times 10^6$  t,呈明显的差异性演变趋势,此现象与两类服务的形成机制密切相关。水源涵养主要依赖于降水输入和植被对土壤水分入渗能力的维持,当土地利用结构改变(如坝区建设用地扩张、山前地带开垦等)导致下垫面透水性下降时,涵养能力明显削弱<sup>[10]</sup>。相比之下,土壤保持更多受坡度、土壤质地和植被覆盖的影响,在生态修复措施(如退耕还林、湿地恢复)和植被恢复作用下,其功能表现为稳步增强。表明人类活动对水源涵养具有更直接的削弱效应,而对土壤保持则可能通过工程与生物措施产生恢复性影响<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 权衡为主、协同为辅的交互关系

洱海流域水源涵养与土壤保持服务整体以权衡

关系为主(66.3%),协同关系仅占18.5%。此结果与ARYAL等<sup>[8]</sup>的全球综述、西南高山峡谷区<sup>[37]</sup>和长江流域等<sup>[38]</sup>区域研究结论均一致,即大多数调节类服务间存在较高概率的权衡关系,但区域差异显著。权衡现象主要集中在耕地与建设用地,原因在于土地利用强度提高同时削弱水源涵养与土壤保持功能,但其影响路径不同,前者通过降低入渗和蒸散调节能力导致涵养下降,后者则通过坡度扰动与裸地暴露增加侵蚀风险。

与此同时,本研究也识别到西部林草覆盖良好的区域存在协同效应,说明在自然因子占主导、干扰较弱的条件下,2类服务能够实现同步提升。与YUAN等<sup>[23]</sup>在青藏高原的研究结果相吻合,表明林草植被在高原生态系统中具有双重调节功能。

#### 3.3 驱动因子与复合机制解析

驱动因子分析显示,水源涵养主要受气候因子

和土壤属性驱动,其中PET与TR组合解释力最高( $q=0.63$ ),说明水源涵养不仅取决于气候供需,并高度依赖土壤的调节能力。PET与TR的组合体现“蒸散量 $\times$ 土壤供水能力”的双重约束机制。与水源涵养相比,土壤保持的驱动机制更为复杂,它不仅受降水与土壤因子控制,还受坡度地形、植被覆盖及人为措施的综合影响,其中TR $\times$ PRE组合解释力最高( $q=0.71$ )体现“侵蚀动力 $\times$ 抵抗能力”的耦合关系。该差异反映两类服务对气候与环境因子的不同敏感性。值得注意的是,人类活动因子(如GDP、POP等)单独解释力较低,但与自然因子交互后表现出非线性增强效应(如POP $\times$ DEM,  $q=0.68$ ),说明在复杂地形背景下,人类活动往往通过与自然环境的耦合影响生态系统服务。此发现印证了DAI等<sup>[12]</sup>在西南山地提出的相关理论,在生态系统服务评估中需综合考虑自然与人为因子的交互效应。

### 3.4 与其他区域的对比分析

与黄河流域、长江上游等典型流域研究相比,洱海流域呈更强烈的空间异质性和权衡特征。FENG等<sup>[17]</sup>在黄土高原研究表明,水源涵养与土壤保持多表现为协同关系,而本研究发现,洱海流域以权衡为主,可能与高原湖泊地区特殊的地形结构和土地利用压力有关;另一方面,LI等<sup>[18]</sup>在川滇生态屏障区的研究指出,气候因子年际波动在山地对服务功能影响显著,而本研究亦发现,PET与PRE的解释力在洱海流域居于主导地位,进一步证明气候因子在高原湖泊流域的关键作用。

## 4 结论

1)2000—2020年,洱海流域水源涵养功能整体下降21.3%,土壤保持功能则增加 $2.19\times 10^6$  t,呈“涵养弱化、保持增强”的差异化响应特征。

2)洱海流域水源涵养主要受气候与土壤因子驱动(PET $\times$ TR,  $q=0.63$ ),土壤保持则受气候、土壤与地形复合作用(PRE $\times$ TR,  $q=0.71$ )。人类活动因子虽单独作用有限,但与自然因子交互后表现出显著增强效应,说明人地耦合是影响生态系统服务的重要机制。

3)整体上,洱海流域两类服务以权衡关系为主(66.28%),坝区耕地与建设用地是主要的权衡区域,但林草区存在协同效应。空间自相关分析揭示出明显的“高-高聚集区”与“低-低聚集区”,表明两类服务在空间上具有显著集聚性与异质性。

本研究旨在揭示高原湖泊流域主要调节类服务的耦合关系与驱动机制,为洱海流域生态保护、水土保持和国土空间优化提供决策依据。该框架方法可

为其他高原湖泊地区的生态系统服务权衡/协同关系研究提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Ecological Economics,1998,25(1):3-15.
- [2] COSTANZA R, DE GROOT R, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?[J].Ecosystem Services,2017,28:1-16.
- [3] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J].地理学报,2017,72(6):960-973.  
PENG J, HU X X, ZHAO M Y, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making[J].Acta Geographica Sinica,2017,72(6):960-973.
- [4] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J].地球科学进展,2015,30(11):1250-1259.  
DAI E F, WANG X L, ZHU J J, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs [J]. Advances in Earth Science,2015,30(11):1250-1259.
- [5] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J].生态学报,2013,33(4):1019-1030.  
WANG X X, SHEN H T, LI X Y, et al. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(4):1019-1030.
- [6] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.  
LIU Y, ZHAO W W, JIA L Z. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(2):432-440.
- [7] HOWE C, SUICH H, VIRI B, et al. Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world [J]. Global Environmental Change,2014,28:263-275.
- [8] ARYAL K, MARASENI T, APAN A. How much do we know about trade-offs in ecosystem services? A systematic review of empirical research observations [J]. Science of the Total Environment,2022,806:e151229.
- [9] WANG J N, WU W J, YANG M, et al. Exploring the complex trade-offs and synergies of global ecosystem services [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2024,21:e100391.
- [10] 刘俸汝,赵俊三,林伊琳,等.基于气候和土地利用变化的云南省水源涵养功能时空演变及驱动力分析[J].水土保持学报,2024,38(5):212-224.

- LIU F R, ZHAO J S, LIN Y L, et al. Temporal and spatial evolution and driving force analysis of water conservation function in Yunnan Province based on climate and land use change[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 212-224.
- [11] LIU B Y, XIE Y, LI Z G, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(4): 430-439.
- [12] DAI E F, WANG Y H. Identifying driving factors of ecosystem service trade-offs in mountainous region of southwestern China across geomorphic and climatic types[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: e111520.
- [13] GENG W L, LI Y Y, ZHANG P Y, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs/synergies among ecosystem services in the Yellow River basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: e108825.
- [14] GUO Q, HAO Y, LIU B. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data[J]. *Catena*, 2015, 124: 68-76.
- [15] ZHANG Y S, LU X, LIU B Y, et al. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: A case study in the Yellow River basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: e142480.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.  
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [17] FENG Q, ZHAO W W, FU B J, et al. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 1250-1263.
- [18] LI J H, ZHOU K C, XIE B G, et al. Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: Comprehensive analysis based on heterogeneity perspective[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 133: e108372.
- [19] TURKELBOOM F, LEONE M, JACOBS S, et al. When we cannot have it all: Ecosystem services trade-offs in the context of spatial planning[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 566-578.
- [20] 张宇洁, 张晓萍, 孙伟楠, 等. 1970—2020年北洛河流域产水、保土、固碳生态系统服务时空演变特征与权衡/协同关系[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 365-377.  
ZHANG Y J, ZHANG X P, SUN W N, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and trade-offs/synergies of water yield, soil conservation, and carbon storage ecosystem services in the Beiluo River basin from 1970 to 2020[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 365-377.
- [21] GAO M W, HU Y C, LIU X W, et al. Revealing multi-scale characteristics of ecosystem services supply and demand imbalance to enhance refined ecosystem management in China[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: e112971.
- [22] 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 J, XIE B P, ZHANG D G. 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.
- [23] YUAN Z R, LIANG Y L, ZHAO H, et al. Trade-offs and synergies between ecosystem services on the Tibetan Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: e111384.
- [24] ZUO L L, LIU G H, ZHAO J Y, et al. Spatiotemporal heterogeneity management: Optimizing the critical role of ecosystem services in achieving sustainable development goals[J]. *Geography and Sustainability*, 2025, 6(1): e100211.
- [25] WANG X Z, WU J Z, LIU Y L, et al. Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 311: e114835.
- [26] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于InVEST模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6161-6170.  
LIU Y Y, LIU X Y, ZHANG B, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [27] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [28] 储昭升, 高思佳, 庞燕, 等. 洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(5): 507-514.  
CHU Z S, GAO S J, PANG Y, et al. Characteristics, problems and ecological protection and restoration measures of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland elements in Lake Erhai basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(5): 507-514.
- [29] LI W J, KANG J W, WANG Y. Exploring the interactions and driving factors among typical ecological risks based on ecosystem services: A case study in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: e113000.
- [30] 黄燕, 陈国坤, 唐伯惠, 等. 洱海流域常用非同源LULC产品一致性分析和精度评估[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(23): 235-247.  
HUANG Y, CHEN G K, TANG B H, et al. Consistency analysis and accuracy evaluation of commonly-used

- nonhomologous LULC products in Erhai Lake basin of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(23): 235-247.
- [31] 高崇, 陈国坤, 段兴武, 等. 基于对象级间隙填充与SG滤波的Sentinel-2 NDVI时间序列重建[J]. 农业工程学报, 2025, 41(10): 212-220.  
GAO C, CHEN G K, DUAN X W, et al. Enhanced Sentinel-2 NDVI time series reconstruction *via* object-level gap filling and Savitzky-Golay filtering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(10): 212-220.
- [32] 覃黄茜. 土地利用/覆被变化下洱海流域生态系统服务权衡与协同关系研究[D]. 云南大理: 大理大学, 2023.  
QIN H Q. Study on balance and synergy of ecosystem services in Erhai Lake basin under land use/cover change [D]. Dali, Yunnan: Dali University, 2023.
- [33] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究: 以东北黑土为例[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 88-95.  
ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J. Soil available water capacity and its empirical and statistical models-with special reference to black soils in northeast China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17(4): 88-95.
- [34] PRIBYL D W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor[J]. Geoderma, 2010, 156(3/4): 75-83.
- [35] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. 中国水土保持, 2013(10): 26-34.  
LIU B Y, GUO S Y, LI Z G, et al. Sampling survey of hydraulic erosion in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 26-34.
- [36] 冯俊鑫, 陈国坤, 左丽君, 等. 基于GF-6 WFV影像和CSLE模型的山区耕地侵蚀定量评价及特征分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 169-179.  
FENG J X, CHEN G K, ZUO L J, et al. Quantitative evaluation and characteristic analysis of cultivated land erosion in mountain area using GF-6 WFV and CSLE model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21): 169-179.
- [37] 刘静, 项嘉仪, 张东海, 等. 基于多源地理数据的西南高山峡谷区生态系统服务评估及权衡与协同关系[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 214-223.  
LIU J, XIANG J Y, ZHANG D H, et al. Evaluation of ecosystem services and tradeoff and synergy in the alpine and canyon region of southwest China based on multi-source geographic data[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 214-223.
- [38] 牛丽楠, 邵全琴, 陈美祺, 等. 2000—2020年长江流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J]. 资源科学, 2024, 46(5): 853-866.  
NIU L N, SHAO Q Q, CHEN M Q, et al. Changes in ecosystem services and their tradeoffs and synergies in the Yangtze River basin from 2000 to 2020[J]. Resources Science, 2024, 46(5): 853-866.
- (上接第437页)
- [39] 孙志强, 韩春雪, 李海港. 荒漠草原土壤呼吸及其组分对持续干旱及再湿润的响应[J]. 草地学报, 2025, 33(2): 535-546.  
SUN Z Q, HAN C X, LI H G. Responses of soil respiration and its components to persistent drought and rewetting in desert steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 535-546.
- [40] ZHANG Y J, GUO S L, LIU Q F, et al. Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2015, 74: 196-205.
- [41] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 363-371.  
HAN G X, ZHOU G S, XU Z Z, et al. Responses of soil respiration to the coordinated effects of soil temperature and biotic factors in a maize field[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 363-371.
- [42] SUN W H, ZHAO X N, GAO X D, et al. Impacts of land use conversion on the response of soil respiration to precipitation in drylands: A case study with four-yearlong observations [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 304: e108426.
- [43] EPRON D, BOSCH A, BONAL D, et al. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana[J]. Journal of Tropical Ecology, 2006, 22(5): 565-574.