

杨峰霖, 和祥, 陈朝稳, 等. 国土空间生态修复视角下岩溶断陷盆地区水源涵养研究——以洱海流域为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1445-1458.

DOI: 10.11932/karst20240620

国土空间生态修复视角下岩溶断陷 盆地区水源涵养研究 ——以洱海流域为例

杨峰霖¹, 和祥¹, 陈朝稳¹, 王金满^{2,3}, 周治平⁴, 张华⁵, 刘彪²

(1. 云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南昆明 650299; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 3. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 4. 云南地矿工程勘察集团有限公司, 云南昆明 650051; 5. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216)

摘要:洱海流域是“十四五”规划和“双重规划”的重要生态区, 其水源涵养功能对保障水资源和生态平衡至关重要。为制订有效的保护和修复策略, 通过 ANUSPLIN 气象插值、区域水文地质研判、InVEST 产水计算等方法, 对洱海流域产水及水源涵养功能进行评价和预测, 结论如下: (1) 经过水文地质评述, 论证出洱海流域是一个相对完整的水文地质单元; 受气候变迁和土地利用影响, 2022 年产水量较 2006 年增加 3.60%, 水源涵养量减少 1.65%。高水源涵养区主要在苍山山脉及北部山区, 平均水源涵养率超 10%; 低水源涵养区主要在坝区, 平均水源涵养率仅 2.89%; (2) 未来预测结果显示, 受降雨量减少的影响, 自然惯性发展情景与生态保护修复情景均发生下降, 而生态修复情景水源涵养量的减损量远低于自然惯性发展情景, 且水源涵养率有所增加; 自然惯性发展情景存在局部退化风险, 生态保护修复情景通过措施可提升水源涵养量, 降低退化风险; (3) 洱海流域水源涵养时空分布与气候等自然因素及土地利用结构密切相关。针对洱海流域存在水源涵养功能退化的情况, 研究评价了已有子工程, 并特别关注了苍山山脉北部和东南部山区, 提出生态现状评估、工程性补水等措施, 以提升水源涵养功能, 维护生态系统稳定, 促进可持续发展。

关键词: 断陷盆地区; 国土空间生态保护修复; 水源涵养; 土地利用情景模拟

创新点: 基于区域水文地质评价探明岩溶断陷盆地流域单元的完整性, 揭示了降雨分布极不均匀的立体气候区水源涵养功能时空变化趋势并优化修复策略, 为国土空间生态保护修复工作提供科学依据。

中图分类号: X171.4; X52 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1445-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

水源涵养是指生态系统通过其结构和过程拦截滞蓄降水、增强土壤下渗、涵养土壤水分和补充地下水、调节河川流量、增加可利用水资源量的功能^[1],

其作为生态系统服务的重要组成部分, 对于维护区域水资源安全、促进生态可持续发展具有重要意义。目前, 国内外对水源涵养的研究已形成了基于地理信息系统的动力模型研究模式^[2-4], 其涉及众多水文模型、生态模型, 如 SWAT^[5-8]、InVEST^[9-11]、

资助项目: 云南地矿集团有限公司专家工作室科研项目(云金资源 2022409)

第一作者简介: 杨峰霖(1998—), 男, 硕士, 研究方向为国土空间生态修复。E-mail: 2101210116@email.cugb.edu.cn。

收稿日期: 2024-02-02

HSPF^[7,12]等模型,其以土地利用变化为导向从水量、水质多个角度对研究区的水源涵养服务功能作出分析,研究方法较为成熟,然而其对于地处岩溶断陷盆地^[13]立体气候区^[14]的洱海流域(此类具有特殊地质、地理环境流域的水源涵养功能)仍缺乏针对性研究^[15]。

洱海流域是中国“十四五”发展规划和“双重规划”提出的“三区四带”中长江生态区(含川滇生态屏障)的重要组成部分,其生态环境的稳定对区域乃至国家生态安全具有重要意义。2022年6月,国家公布了《第二批山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目名单》,洱海流域山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目成为继抚仙湖之后云南省的第二个山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目。然而,该流域的生态环境面临严峻挑战^[16],受气候变化和人类活动^[17-18]的影响,洱海流域水资源量总体呈减少趋势,2011—2019年流域平均天然径流量、洱海平均陆地入湖水量及出湖水量均较多年平均(1960—2019年)偏少,流域生态补水量不足造成了其所肩负的国家级主导生态服务功能—水源涵养功能的下降。研究以洱海流域为例,基于岩溶断陷盆地地质评价,探讨流域单元的完整性以及地表水与地下水运移规律是否一致,结合立体气候区降水不均的特点量化分析水源涵养功能,并预测2030年流域的水源涵养功能,旨在深入了解该区域的水源涵养现状,揭示其变化趋势并优化修复策略,以期为国土空间生态保护修复工作提供科学依据。

1 研究区概况

洱海流域位于云南省西北部,大理白族自治州境内,总面积2565.19 km²,包括大理市大部分地区以及洱源县东部的区域,其地处横断山脉西南端,地势西北高、东南低,地形复杂,洱海位于流域南部的湖盆区,湖面面积252 km²,山脉走势呈南北向,形成典型的高山—坝区—断陷湖泊地貌。土地利用类型以林地为主,占流域总面积的43.09%,广泛分布于区域内苍山山脉及北部环盆地山区(图1);其次为灌木及草地,占流域总面积的24.94%,主要分布于洱海沿岸及上游的平原地区;建设用地面积占区域总面积的13.14%,主要分布于环洱海沿岸以及流域北部盆地地区;水域和耕地面积相对较少,分别占流域总面积的10.74%和7.99%,未利用地面积最少,占比不到

1%。洱海深(大)断裂是研究区内最大的断裂,呈北西向纵贯全区。这一断裂对两侧地质发展控制性很强,东部的全部古生界在西部均未见到,两边的中生界也有一定的差异,具有形成早、活动时间长的特点。自更新世早期盆地形成后,研究区内洱源县中部及洱海湖面西侧区域被第四系河湖相沉积掩盖,堆积了冲洪积、湖相沉积等多种成因的第四纪松散堆积物,富含孔隙水。研究区东部海东镇一带以及北部广布着古生界碳酸盐岩岩溶水,中部为二叠系玄武岩,富水性较差;西部为苍山群(AnC_m)变质岩系裂隙水,南部属白垩(K)—侏罗系(J)“滇西红层”碎屑岩裂隙水,东南分布上三叠统浅海—滨海相碎屑岩和碳酸盐岩以及侏罗系、白垩系的海陆交互相、陆相红色碎屑建造。受地层岩性与地质构造影响,岩溶含水层分布于研究区北部以及东部海东一带,主要为泥盆系下统(D₁)、石炭系(C)和二叠系下统(P₁)石灰岩、白云岩等组成,具有分布广、厚度大、质纯、岩溶发育等特点。受地形地貌影响,区内地表水系发育,沟谷深切,受其控制的岩溶形态方向多,规模小,途径短,没有对洱海水体存在地下水袭夺和漏失的低邻谷。由此可知,研究区是一个以洱海为核心且相对完整的地下水水文地质单元,洱海湖面不仅是区域内地表水的汇集地,同时也扮演着地下水汇集中心的角色,是区域水文地质单元中的最低位置,区内地下水无论是各类岩浆岩、变质岩和沉积碎屑岩形成的基岩裂隙水、碳酸盐岩岩溶水以及第四系松散层的孔隙水亦受地形地貌和地层、构造控制,其导致洱海流域所有的地下水均向洱海湖面这一中心区域汇聚为地表径流,并经由西南角受人工控制的西洱河进入漾濞江,最终汇入澜沧江。

2 方法与数据

2.1 研究方法

2.1.1 ANUSPLIN 气象插值

基于研究区尺度小于市级行政区,且研究区区系高原山地地区,具有独特的立体气候^[19],本研究采用ANUSPLIN软件进行气象插值,其对于中国山区气温的插值具有较高精度^[20-21],过程由(1)式计算:

$$Z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

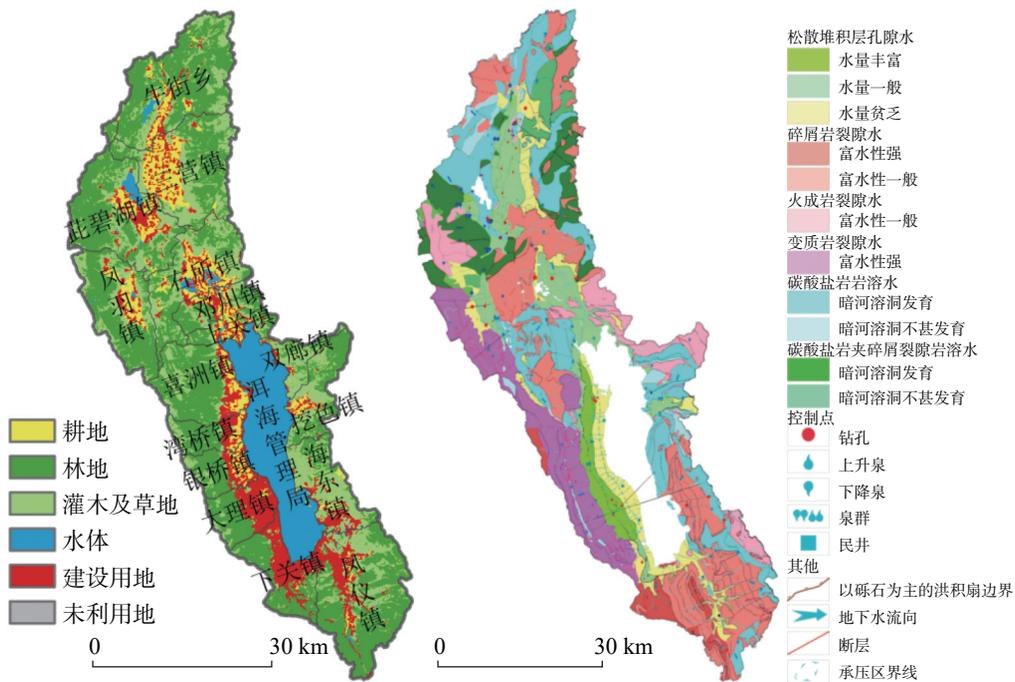


图 1 洱海流域 2022 年土地利用图与水文地质图

Fig. 1 Land use and hydrogeology of the Erhai basin in 2022

式中： Z_i 是位于空间 i 处的降雨预估值； x_i 是周围已知点 i 处的降雨量； $f(x_i)$ 是 x_i 的未知光滑函数； y_i 是 i 处作为独立协变量的高程； b^T 是高程 (T) 作为独立协变量的系数； e_i 是随机误差。

2.1.2 基于 InVEST 模型产水量与水源涵养测算

InVEST 模型中的产水量模块是一种基于水量平衡的估算方法^[10]。首先模型估算了每个栅格单元的水源供给量，在此基础上计算流域的总产水量和平均值，由 (2) 式计算：

$$Y_i = \left(1 - \frac{E_{ij}}{P_i}\right) \cdot P_i \quad (2)$$

式中： Y_i 为栅格单元 i 的产水量 (mm)； P_i 为栅格单元 i 的降雨量 (mm)； E_{ij} 为生态系统类型 j 上栅格单元 i 的蒸散量 (mm)。由 (3) 式计算：

$$\frac{E_{ij}}{P_i} = \frac{1 + \omega_x \cdot R_{ij}}{1 + \omega_x \cdot R_{ij} + 1/R_{ij}} \quad (3)$$

式中： ω_x 是表征自然气候—土壤特性的非物理参数； R_{ij} 为土地利用类型为 j 时，栅格单元 i 的一个无量纲干燥指数，其表示潜在蒸散发与降雨量的比值。

本文选取的研究区是高原断陷盆地区，必须考虑海拔、坡度等地形因素对水源涵养功能的影响，因此需要再采用流速系数、地形指数和土壤饱和导水率对产水量进行修正^[22]，最终得到水源涵养量。由

(4) 式计算：

$$C_{WC,i} = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.91g(D/H_{SOIL} \cdot P_{SLOP})}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y_i \quad (4)$$

式中： $C_{WC,i}$ 为栅格单元 i 的水源涵养量 (mm)； V 为流速系数； D 为集水区栅格数量； H_{SOIL} 为土壤深度 (mm)； P_{SLOP} 为百分比坡度； K_s 为土壤饱和导水率 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)； Y_i 为栅格单元 i 的产水量 (mm)。

2.1.3 SPSSAU 二次指数平滑法站点降雨数据预测

指数平滑是一种重要的时间序列预测法，其先对原始数据进行平滑处理，然后再根据平滑值经过计算构成预测模型，用于测取未来预测值。二次指数平滑法是将历史数据进行加权平均作为未来时刻的预测结果，为线性趋势预测公式，具有较好的中长期预测效果^[23]。

计算方法：设 X_1, X_2, \dots, X_N 为原始序列数据，则一次平滑值 $S_t^{(1)}$ 、二次平滑值 $S_t^{(2)}$ 分别为 (5)：

$$\begin{cases} S_t^{(1)} = \alpha \cdot X_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}^{(1)} \\ S_t^{(2)} = \alpha \cdot S_t^{(1)} + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}^{(2)} \end{cases} \quad (5)$$

式中： t 为预测期数； α 为平滑参数，可推导出预测公式 (6)、(7)：

$$\hat{X}_{t+T} = A_t + B_t \times T \quad (6)$$

$$A_t = 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)}, B_t = \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right)(S_t^{(1)} - S_t^{(2)}),$$

$$t = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中: \hat{X}_{t+T} 表示 $t+T$ 时刻的预测值; A_t 表示二次指数平滑预测模型的截距; B_t 表示二次指数平滑预测模型的斜率; T 表示基于 t 时期向后预测期的期数, $T=0, 1, 2, \dots, N$ 。

2.1.4 IDRIS CA-Markov 模型土地利用情景模拟

CA-Markov 模型是一种常用的土地利用变化模拟与预测的方法。它将细胞自动机(CA)和马尔可夫模型相结合,通过模拟土地利用变化的空间格局和规律并将变化过程分解为元胞级别的决策过程,预测未来的土地利用状态。CA 就是一种基于不连续离散的时空动态模拟模型^[24]。一个 CA 系统通常包括单元、状态、邻近范围与转换规则 4 个要素。由式(8)计算:

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (8)$$

式中: $S_{(t)}$ 代表基础时期元胞离散且有限的状态集合; $S_{(t+1)}$ 表示下一时期的状态集合; N 代表元胞的邻域; f 则为元胞状态转化规则。Markov 模型是由苏联数学家马尔可夫创建的一种预测方法,它将马尔可夫链理论模型和方法研究应用于概率论中,常用于预测土地利用变化趋势,其关键在于确定土地利用数据各像元在某一特定时刻内土地利用类型 $i(i=0, 1, 2, \dots, n)$ 转换为 $j(j=0, 1, 2, \dots, n)$ 的概率 P 。由(9)式计算:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.1.5 Kappa 系数检验

模型建立之后,对模型进行检核,合格之后才能利用该模型对未来研究区域进行预测分析。Kappa 系数是一种评定土地利用模拟精度的有效方法,研究采用该系数对 CA-Markov 模型进行检核^[25]。Kappa 系数 (K) 由(10)式计算:

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (10)$$

式中: P_o 是实际与模拟图对比概率; P_c 是模拟图正确比率程度期望值。Kappa 系数 (K) 的取值范围为 0~1 之间,一般分为四个等级,其分类标准如表 1 所示。

表 1 Kappa 系数检验对照表
Table 1 Verification of Kappa coefficients

K	0.00~0.25	0.26~0.50	0.51~0.75	0.76~1.00
一致性程度	极低	低	中	高

2.2 数据源及处理

2.2.1 数据源

本研究需用到的数据主要包括洱海流域土地利用、降雨、蒸散、地形、土壤、水文数据以及其他相关数据,栅格数据统一像元大小为 30 m×30 m,数据来源见表 2。

表 2 数据来源表
Table 2 Data sources

数据类型	数据源	数据类型
土地利用	Annual China Land Cover Dataset ^[26] 、Esri Sentinel-2	2006/2014/2022 年.tif
气象数据	国家气象数据中心、全球干旱指数和潜在蒸散量数据库(第3版)	2006—2020年 .txt、.tif
地形数据	中国地理数据云	.tif
行政界线	中国科学院资源环境科学与数据中心	.shp
土壤数据	世界土壤数据库	.mbd
区域地质资料	全国地质资料馆	.png
水文数据	大理州水务局官网	.pdf

2.2.2 数据处理与参数调试

为保证数据准确性,调用洱海流域内的两个站点以及大理州其余十个站点(图 2)2002—2022 年历年降雨数据,通过二次指数平滑法进行数据预测,初始值 S_0 取五年平均值,预测至 2030 年,每期插值数据均使用五年降雨均值进行插值,得 2002—2006 期(图 2a)、2010—2014 期(图 2b)、2018—2022 期(图 2c)、2026—2030 期(图 2d)。洱海流域的降雨量总体呈下降趋势,2011—2014 年降雨量尤为低下,洱海流域干旱现象与前人研究成果相符^[27-30]。

Zhang 系数是模型的一个季节修正参数,该系数的数值设置情况关系到产水模拟结果的精度,根据已公布的 2014 年及 2022 年大理州水资源公报,对 Zhang 系数进行调试,Zhang 系数定为 23.5,除此之外,InVEST 模型还需要以表格形式输入物理参数,主要包括土地利用、根系深度等(表 3)。

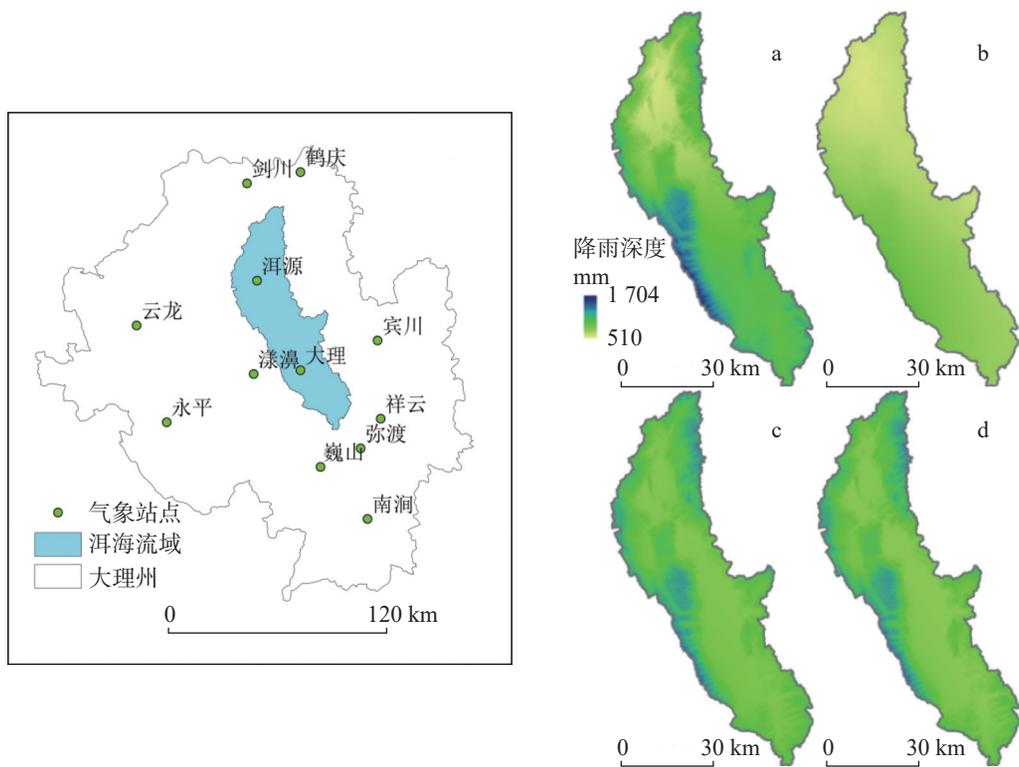


图 2 气象站点与各期降雨插值结果

Fig. 2 Meteorological stations and precipitation interpolation results from 2002–2006 (a), 2010–2014 (b), 2018–2022 (c) and 2026–2030 (d)

表 3 土地利用编码及相关参数

Table 3 Land use coding and related parameters

土地利用类型	土地利用编码	植物根系深度/mm	蒸散系数	流速系数
耕地	1	1 500	0.65	800
林地	2	7 000	1	200
灌木及草地	3	3 000	0.65	400
水域	4	10	1	2 012
建设用地	5	10	0.20	2 012
裸地	6	10	0.20	1 500

依据 Kappa 系数对比分析 2014、2022 年两期洱海流域土地利用空间分布的实际图和预测图的相似度,最后得出 Kappa 系数达 0.88、0.80,达到 Kappa 系数 0.76~1.00 的精度要求,适宜性图集符合预测结果,符合研究精度需要。设定自然惯性发展(图 3a)与山水工程生态保护修复(图 3b)两种情境,在自然惯性发展情境中,无生态修复措施与用地发展管控,延续 2014—2022 年洱海流域的土地利用变化趋势;在山水工程生态保护修复情境中,结合流域自然情况、洱海流域山水工程实施方案以及《全国国土规划纲要(2016—2030 年)》的要求,设定建设用地不再增长,灌木及草地更多地转化为农地与林地,模拟并得

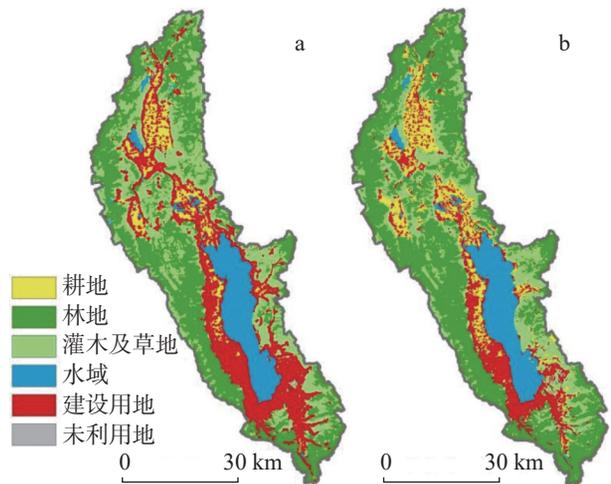


图 3 2030 年自然惯性发展情景 (a)、生态保护修复情景 (b)
Fig. 3 Natural inertia development scenario (a) and ecological protection and restoration scenario (b) for 2030

到 2030 年土地利用预测数据。

3 结果与分析

通过产水量及产水能力对产水功能进行评价,产水量即流域总共产生的地表径流量,产水能力即流域每平方千米所产生的地表径流量;通过水源涵

养量、水源涵养率对洱海流域历史期水源涵养功能进行评价,水源涵养量即将水分充分保持在流域中的水资源量,水源涵养率即流域产生的地表径流转化为保持在流域中的水资源量的效率。

3.1 产水及水源涵养功能时间变化

洱海流域 2006 年、2014 年、2022 年及 2030 年的降雨量分别为 934.5 mm、703.0 mm、925.8 mm、909.3 mm,2006 年、2014 年、2022 年产水量分别为 16.27 亿 m^3 、9.35 亿 m^3 、16.85 亿 m^3 ,流域产水能力分别为 51.48 万 $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ 、29.59 万 $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ 、53.34 万 $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$,呈先下降后上升趋势(图 4)。虽然受 2010—2014 年连续枯水年影响,2014 年洱海流域产水量及产水能力偏低,并且历史期流域降雨总体趋于下降,

但 2022 年产水量与产水能力相较 2006 年有所提升。2030 年自然惯性发展情景以及生态保护修复情景下的产水量分别为 17.30 亿 m^3 、16.29 亿 m^3 ,产水能力分别为 54.74 万 $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ 、51.55 万 $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ 。在自然惯性发展情境下,洱海流域产水量继续增长,较 2022 年增长了 2.6%,在生态保护修复情境下,洱海流域产水量较 2022 年减少了 3.4%。虽然受流域降雨减少的影响,但在自然惯性发展的情况下,受土地利用变化即城市继续扩张、林地退化的影响,洱海流域的产水量继续增长,这种趋势如果持续下去,可能会对洱海的水资源量造成长期影响,进而威胁到流域的生态安全;而在同样降雨条件下,生态保护修复情景的流域产水量却减少了。

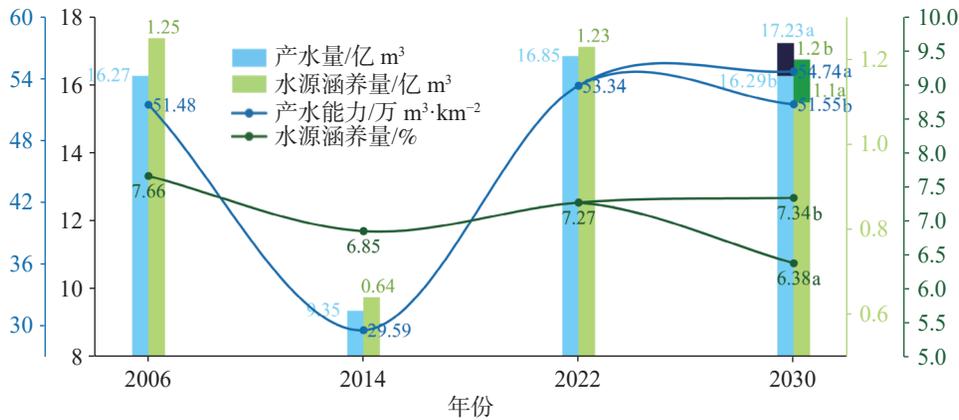


图 4 洱海流域 2006—2030 年产水及水源涵养功能

Fig. 4 Water yield and water conservation of the Erhai basin from 2006 to 2030

通过对洱海流域 2006 年、2014 年、2022 年产水量及流速系数等数据计算得出的水源涵养量分别为: 1.25 亿 m^3 、0.64 亿 m^3 、1.23 亿 m^3 ;水源涵养率分别为, 7.66%、6.85%、7.27%, 总体呈下降趋势, 受 2010—2014 年连续枯水年影响, 2014 期洱海流域水源涵养功能尤其低下。洱海流域 2030 年在自然惯性发展情景(2030a)中, 洱海流域水源涵养量为 1.10 亿 m^3 , 较 2022 年历史期水源涵养量减少了 9.92%; 在生态保护修复情景(2030b)中, 洱海流域水源涵养量为 1.20 亿 m^3 , 较 2022 年历史期水源涵养量减少了 2.46%; 自然惯性发展情景和生态保护修复情景流域水源涵养率分别为 6.38%、7.34%。受降雨总量减少的影响, 2030 年多个情境下洱海流域的水源涵养量均有所下降, 值得注意的是生态修复情景下水源涵养量的损减量远小于自然惯性发展情景, 且水源

涵养率较 2022 年有所增长, 而自然惯性发展情景的流域水源涵养率却较 2022 年减少了 0.89%。

3.2 产水及水源涵养功能空间分布

根据流域产水深度分布图以及通过自然断点法进行分级的流域产水能力分级图(图 5)可知, 高原立体气候高降水影响的产水量高值区主要分布在西南部苍山山脉和东北部山区, 而低值区则主要分布在西北部盆地及东南部干热河谷及山区。在自然惯性发展情景中(2030a), 洱海流域盆地区南部以及北部城市沿线产水量深度较 2022 年有所增加, 产水能力由低级转为中级; 在生态保护修复情景中(2030b), 由于城市扩张以及林地退化的趋势得以遏制, 流域产水深度以及产水能力变化不明显。

由图 5 可知, 高水源涵养深度与水源涵养率区

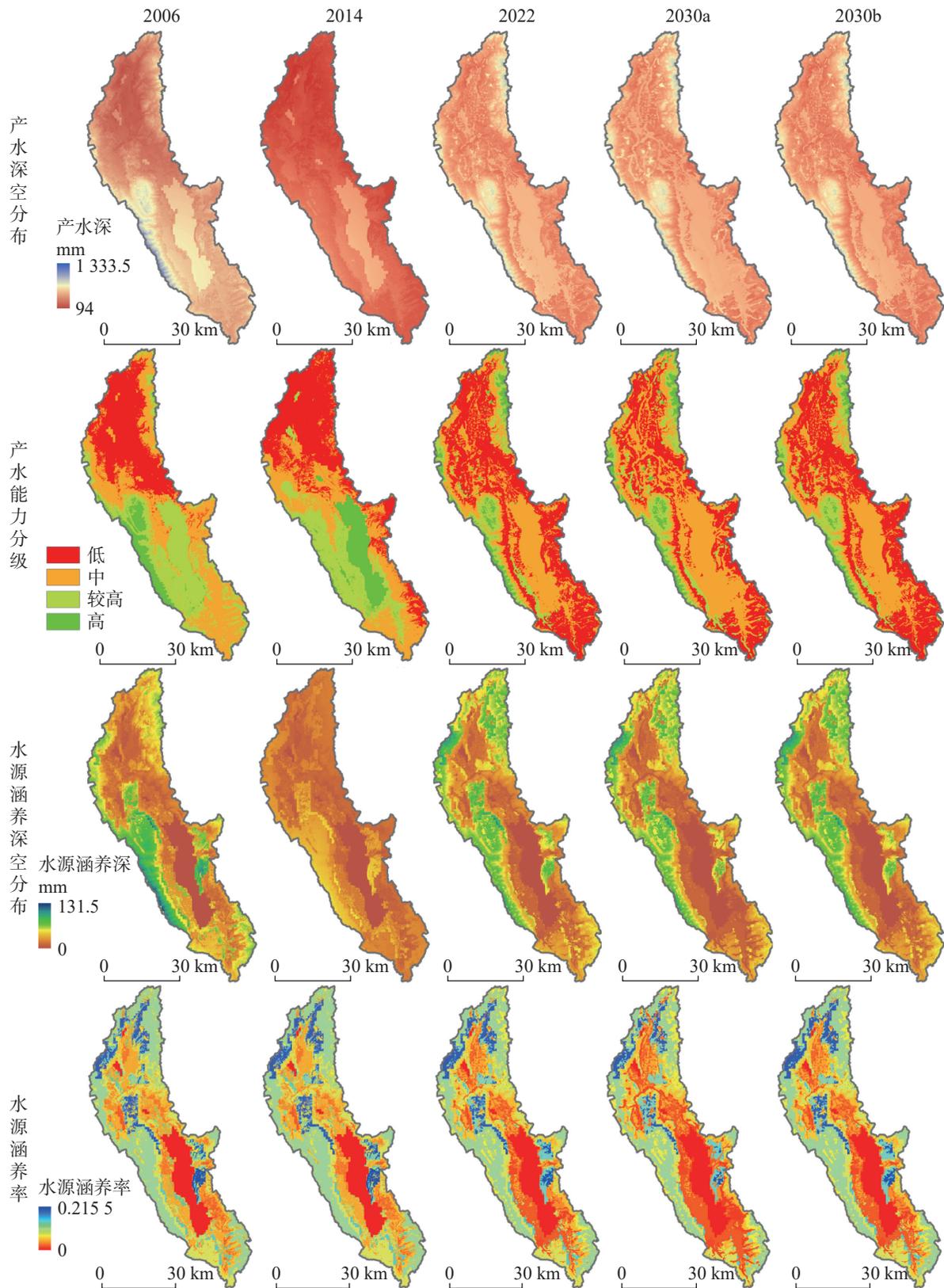


图 5 2006—2030 年洱海流域产水及水源涵养功能分布图

Fig. 5 Distribution of water yield and water conservation of the Erhai basin from 2006 to 2030

域主要分布在西部苍山山脉、北部环盆地山区及洱海东部挖色镇南北两侧的山区, 这些区域的水源涵

养率普遍高于 20%, 这些区域植被覆盖率高, 能够有效保持水源, 减少地表径流, 提高地下水位, 对于维

护洱海流域的生态平衡和水资源安全具有重要意义。而低水源涵养深度与水源涵养率区域则主要分布在盆地及洱海等水域,水源涵养率普遍在 10% 以下,这些区域不透水面多,降雨后容易产生地表径流,难以有效涵养水源。在自然惯性发展情景下,受城市扩张的影响,洱海南部大理市主城区以及北部盆地区的水源涵养深度和水源涵养率呈现出继续降低的趋势;而在生态保护修复情景中,则有了积极变化,通过实施生态保护措施,如限制城镇扩张、植树造林等,水源涵养减少的问题得以遏制。

值得注意的是在 2014 年洱海流域产水深空间分布图与产水能力分级图中洱海湖面等水体较其他地区属于产水深度大、产水能力分级为高的区域,结合降雨量较低的原因可知,在连续枯水年中,河湖水体相对较高的产水能力可起到减轻干旱、缓解干旱灾害影响的作用;虽然 2014 期洱海流域水源涵养深空分布图较其他两期水源涵养深空分布图的水源涵养深度较低,但结合了产水深空分布计算的三期水源涵养率空间分布图差别并不明显,其可有效排除极端气候条件给水源涵养功能计算带来的干扰。

3.3 基于水源涵养的国土空间生态保护修复优化

结合洱海流域的自然地理概况、山水工程成果以及水源涵养研究的需要,通过综合空间叠加,将洱海流域划分为 4 个保护修复单元、6 个水源涵养提升的子项目(图 6)。通过产水及水源涵养测算与预测,采用历史期以及 2030 年生态保护修复情景四期数据,得出洱海流域各单元产水量、产水能力、水源涵养量及水源涵养率统计表(表 4)。

坝区单元产水量和产水能力相对较高,但水源涵养量和水源涵养率相对较低,属于产水低、水源涵养低转化率区域,其受人口密集和农业活动频繁的影响,大量的城市建设增加了不透水面面积,使降雨更多的转化为地表径流,该区域未来主要以城市绿化以及限制城镇扩张为主要策略。

北部山区单元是洱海流域水源涵养量最高的区域,属于高产水、高水源涵养、高转化率区域。该区域是洱海流域重要的水源涵养区,包含洱海源头水源涵养林管护以及三营镇历史遗留矿山生态修复两个项目,符合生态保护修复思路,而针对该单元南部的苍山山脉北部的高水源涵养率区域(图 7)却缺乏

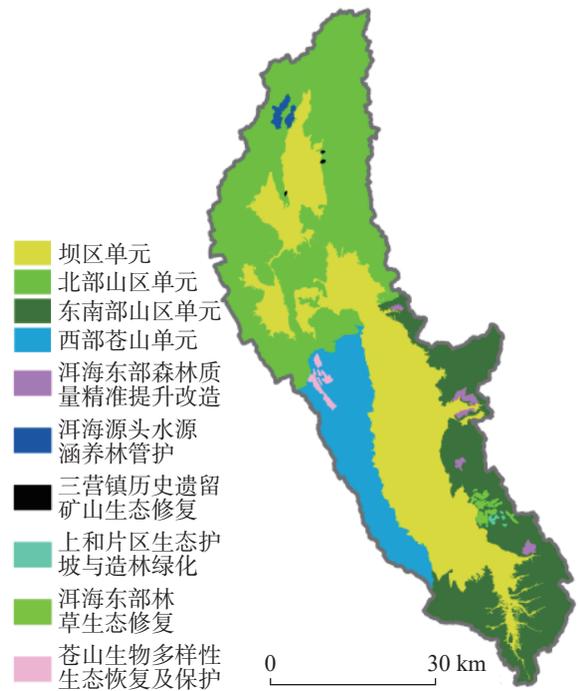


图 6 洱海流域水源涵养保护修复单元与子项目

Fig. 6 Units of and sub-projects for water conservation protection and restoration of the Erhai basin

相关生态保护工程措施,对此提出以下建议:

(1)对于苍山山脉北部的高水源涵养区,应开展更详细的实地生态现状评估,明确其水源涵养功能的重要性以及潜在的退化风险。

(2)考虑到苍山山脉北部区域的地理特点和生态环境,建议开展以天然林管护为主的生态保护工程,以减少人为干扰,从而更好地保持其水源涵养功能。

东南部山区单元产水量和产水能力以及水源涵养量和水源涵养率相对均衡,属于产水、水源涵养、转化率均衡的区域。该单元挖色镇南北两侧的高水源涵养率区域存在退化风险(图 8),且该区域靠近大理市主城区并包括海东、挖色镇两处建设用地扩张区域,未来该区域的土地利用结构要以限制城镇扩张、林地管护限制采伐与提质为主要策略。该单元包含洱海东部森林质量精准提升改造、洱海东部林草生态修复、上和片区生态护坡与造林绿化三个项目符合水源涵养提升思路。然而,受苍山山脉降雨阻断的影响,该区域降雨偏低,凤仪、海东一带地下水贫乏,凤仪坝区地下水埋藏较深,多藏于地面以下 12 m,存在极大的工程性缺水风险,与实地考察情况相吻合(图 9)。该区域的水源涵养提升工程在植被选取方面需更加慎重,应尽量选取符合该区域岩溶

表 4 洱海流域各单元产水量、产水能力、水源涵养量及水源涵养率统计表

Table 4 Statistics of water yield, water yield capacity, water conservation and water conservation rate in each unit of the Erhai basin

	流域面积占比/%	产水量/亿m ³ 及占比/%					产水能力/万m ³ ·km ⁻²				
		2006年	2014年	2022年	2030年生态修复情景	历史期均值	2006年	2014年	2022年	2030年生态修复情景	历史期均值
坝区单元	32.68	5.29/ 32.49	3.97/ 42.43	5.58/ 33.10	5.35/ 33.10	4.94/ 34.92	51.18	38.42	54.02	51.81	47.87
北部山区单元	34.83	4.59/ 28.23	2.29/ 24.44	5.94/ 35.26	5.83/ 35.26	4.27/ 30.18	41.72	20.76	53.99	52.97	38.82
东南部山区单元	20.98	3.55/ 21.82	1.75/ 18.68	3.00/ 17.83	2.84/ 17.83	2.77/ 19.55	53.54	26.35	45.31	42.78	41.73
西部苍山单元	11.50	2.84/ 17.46	1.35/ 14.44	2.33/ 14.44	2.27/ 13.95	2.17/ 15.35	78.14	37.15	64.07	62.51	59.79

	流域面积占比/%	水源涵养量/亿m ³ 及占比/%					水源涵养率/%				
		2006年	2014年	2022年	2030年生态修复情景	历史期均值	2006年	2014年	2022年	2030年生态修复情景	历史期均值
坝区单元	32.68	0.18/ 14.08	0.12/ 19.12	0.13/ 10.30	0.12/ 9.71	0.14/ 13.63	3.32	3.09	2.26	2.17	2.89
北部山区单元	34.83	0.48/ 38.30	0.23/ 36.46	0.62/ 50.49	0.62/ 51.67	0.44/ 42.72	10.39	10.23	10.41	10.59	10.34
东南部山区单元	20.98	0.29/ 23.58	0.14/ 22.16	0.24/ 18.98	0.23/ 18.98	0.23/ 21.84	8.28	8.13	8.12	8.00	8.18
西部苍山单元	11.50	0.30/ 24.05	0.14/ 22.25	0.24/ 19.63	0.23/ 19.63	0.23/ 21.81	10.55	10.56	10.16	10.33	10.42

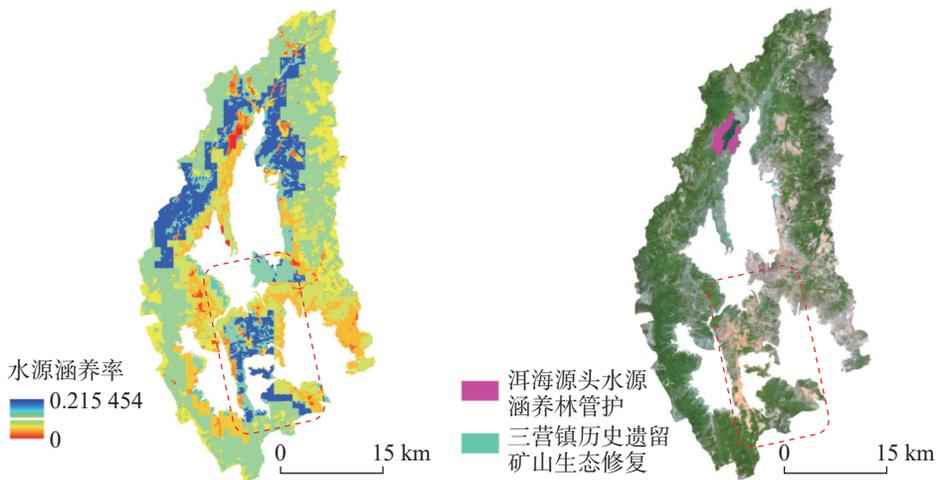


图 7 北部山区单元水源涵养率空间分布图及卫星图

Fig. 7 Spatial distribution of water conservation rates and satellite images in the northern mountainous unit

岩性本底、耗水量低且耐旱的植被，考虑到洱海流域在历史期经历过极度干旱的时期，为防止未来处于管护期生态修复工程不受极度干旱事件的破坏，该区域可结合洱海水体旱季调蓄以及本地岩溶地下水赋存的水文地质情况，适当开采地下水进行人工补水。

西部苍山单元水源涵养量和水源涵养率极高，属于高产水、高水源涵养、高转化率区域，是洱海流

域乃至云南省重要的生态功能区，得益于大量植被覆盖以及苍山山脉地形雨带来的丰沛降雨(图 10)，是洱海流域重要的水源涵养区。该单元包含苍山生物多样性生态恢复及保护一个项目，其旨在保护苍山的生物多样性，维护生态系统的平衡与稳定。苍山作为洱海流域的重要生态屏障，其生物多样性的保护对于提升整个流域的水源涵养功能具有重要意义。

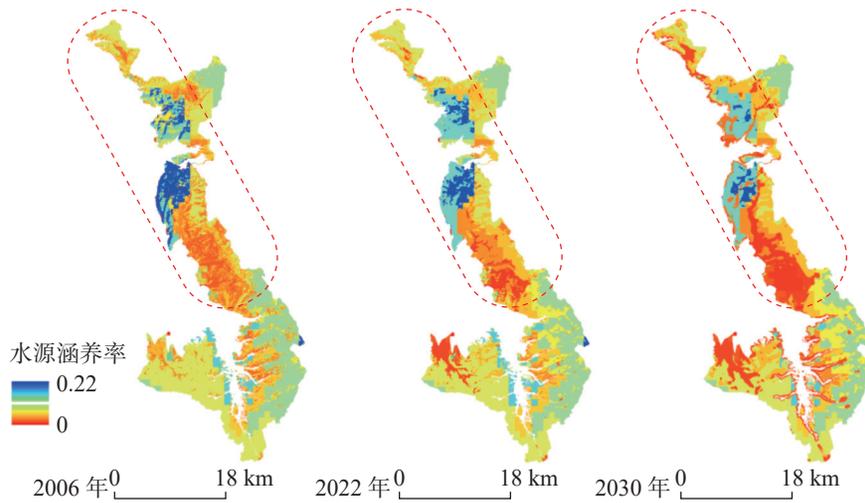


图 8 东南部山区单元 2006—2022—2030 年自然惯性发展情景水源涵养率

Fig. 8 Dynamic changes of water conservation rates in southeastern mountainous unit under the natural inertia development scenario (2006—2022—2030)



图 9 东南部山区单元实地拍摄图

Fig. 9 Field photographs of the southeastern mountainous unit

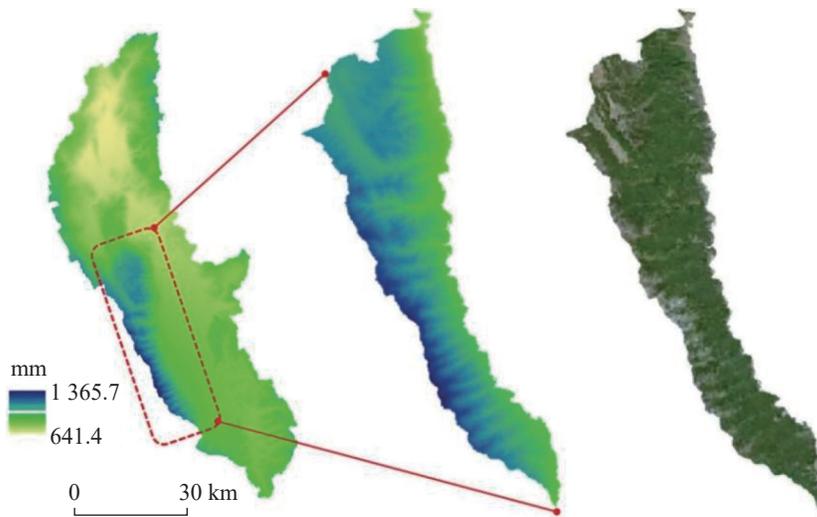


图 10 西部苍山单元 2006—2022 年平均降雨分布图与卫星图

Fig. 10 Distribution of average precipitation and satellite images of the western Cangshan mountain unit

3.4 洱海流域产水及水源涵养功能变化机理

洱海流域的产水及水源涵养功能具有显著的空间相关性,其空间分布与气候、地形地貌等自然因素

及土地利用结构密切相关。首先,大尺度的区域气候环流会直接影响区域水源涵养功能,洱海流域属于典型的印度洋季风环流区^[31],该地区降雨主要受

孟加拉湾的暖湿气流和青藏高原的干冷空气相互作用形成^[32], 然而受全球气候变化影响, 青藏高原冰川消退、气候暖湿化明显^[33], 降水量总体升高, 其对洱海流域的降水乃至国内其他青藏高原以东受印度洋季风气候调节的区域产生了袭夺, 降雨量逐年下降, 影响了流域的水源涵养功能。其次, 区域微气象的差异造成流域内降水空间分布极不均匀, 洱海流域内高程每增加 100 m, 降雨量增加约 70 mm, 其间接地影响了流域水源涵养的空间分布。此外, 地形地貌还影响流域的水文过程, 如坡度、坡长等条件影响地表径流的形成和分布, 从而影响流域的产水及水源涵养功能^[22]。另一方面, 土地利用结构的改变会直接导致植被覆盖、土壤质量等因素的变化, 进而影响水源涵养功能。土地利用方面, 林草覆盖度较高的区域通常具有较高的水源涵养量, 而建设用地无法保留降雨更容易形成地表径流, 通常具有较林草地更高的产水量和更低的水源涵养量, 然而洱海流域历史期土地利用类型变化即农业用地(耕地)向生态用地(林地、灌木及草地)和建设用地转移以及生态用地内部——林地向灌木及草地转移两种类型导致洱海流域产水量的升高以及水源涵养量的降低。

4 结论与建议

(1) 本研究结合水文地质研判证明洱海流域是一个以洱海为核心且相对完整的水文地质单元, InVEST 模型对流域产水空间分布模拟以及 ANUSPLIN 模型对洱海流域立体气候降雨模拟表现出良好的准确性, 这为水源涵养功能评估提供了可靠的数据基础, 未来可将这些方法应用于其他具有类似地质和气候特征的流域。历史期结果显示, 2022 年洱海流域的产水量较 2006 年增加了 3.60%, 而 2022 年洱海流域的水源涵养量较 2006 年减少了 1.65%。洱海流域的水源涵养功能呈现出明显的空间异质性, 高水源涵养功能区域主要分布在苍山山脉以及流域北部环断陷盆地山区等土地利用类型以林草为主的地区, 三期数据测算得到的平均水源涵养率均达到 10% 以上, 而低水源涵养区域则主要分布在城镇和农田等人类活动密集的坝区, 历史期平均水源涵养率仅 2.89%。

(2) 尽管洱海流域环断陷盆地山区的水源涵养功能较好, 但未来期预测表明, 在不限限制城镇扩张以

及林地退化的自然惯性发展情景中, 洱海流域的水源涵养量较 2022 年历史期水源涵养量减少 9.92%, 在生态保护修复情景中, 水源涵养量较 2022 年历史期水源涵养量减少了 2.46%, 水源涵养率分别为 6.38%、7.34%。受降雨总量减少的影响, 2030 年多个情境的水源涵养量随均有所下降, 但生态修复情景下水源涵养量的减损量远小于自然惯性发展情景, 且水源涵养率有所增长。在不限限制城镇扩张以及林地退化的自然惯性发展情景中, 存在受土地利用变化以及降雨减少导致的水源涵养退化风险, 而在生态保护修复情景中通过模拟限制城镇扩张、保护现有林地、提高森林质量、实施天然林管护等措施, 可有效提升流域的水源涵养量, 降低水源涵养功能的退化风险。

(3) 洱海流域的产水及水源涵养功能具有显著的空间相关性, 其空间分布与气候、地形地貌等自然因素及土地利用结构密切相关。针对洱海流域存在水源涵养功能退化的情况, 研究评价了山水工程分区策略和水源涵养提升子工程措施, 并特别关注了苍山山脉北部的高水源涵养率区域及东南部山区水源涵养退化高风险区, 提出了在该区域开展详细的生态现状评估、建立长期的生态监测点、增加工程性补水措施等, 这些措施将有助于提升洱海流域的水源涵养功能, 维护生态系统的稳定与健康, 促进洱海流域的可持续发展。

参考文献

- [1] 生态环境部. 全国生态状况调查评估技术规范: 生态系统服务功能评估 HJ 1173—2021[S]. 2021.
Ministry of Ecology and Environment. Technical specification for investigation and assessment of national ecological status: Ecosystem services assessment HJ 1173—2021[S]. 2021.
- [2] 杨峰霖, 闫强, 王金满, 周治平, 刘彪. 国土空间生态修复中的水平衡研究进展[J/OL]. 生态学杂志, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20240315.1057.007>.
YANG Fengji, YAN Qiang, WANG Jinman, ZHOU Zhiping, LIU Biao. Water balance analysis of territory spatial ecological restoration: A review[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20240315.1057.007>.
- [3] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 李宗省, 缪驰远, 狄振华, 龚伟. 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, LI Zongxing, MIAO Chiyuan, DI Zhenhua, GONG Wei. Review on connotation and estimation method of water conservation[J]. South-to-North

- Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1041-1071.
- [4] 左其亭, 王娇阳, 杨峰, 宋全香. 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, SONG Quanxiang. 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.
- [5] 张乐开, 左其亭, 钟涛, 张羽, 吴青松. 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析 & 预测[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2023, 21(5): 862-872. ZHANG Lekai, ZUO Qiting, ZHONG Tao, ZHANG Yu, WU Qingsong. Analysis and prediction of water conservation capacity in Qinhe river basin based on SWAT[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 862-872.
- [6] Anand J, Gosain A K, Khosa R. Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 503-519.
- [7] Chen Y, Xu C Y, Chen X W, Xu Y P, Yin Y X, Gao L, Liu M B. Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 486-500.
- [8] Marhaento H, Booi M J, Rientjes T H M, Hoekstra Arjen Y. Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(11): 2029-2040.
- [9] Belete M, Deng J S, Zhou M M, Wang K, You S X, Hong Y, Weston M. A new approach to modeling water balance in Nile river basin, Africa[J]. Sustainability, 2018, 10(3): 810.
- [10] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 宋瑜. 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, SONG Yu. A review on principle and application of the InVEST model[J]. Ecological Science, 2015, 34(3): 204-208.
- [11] Bai Y, Ochuodho T O, Yang J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 51-64.
- [12] 刘友存, 邹杰平, 尹小玲, 孟丽红, 陈明, 曾金凤, 乔丽潘古丽·吐尔洪. HSPF 模型在流域水文与水环境研究中的进展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 225-232. LIU Youcun, ZOU Jieping, YIN Xiaoling, MENG Lihong, CHEN Ming, ZENG Jinfeng, Jolipanguli Turkhon. Review on HSPF model in watershed hydrology and water environment research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 225-232.
- [13] 李芹, 王宇, 李笠, 张华, 王波. 喀斯特高原湖泊流域基于自然解决的生态修复方案: 以云南九大高原湖泊为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 391-401. LI Qin, WANG Yu, LI Li, ZHANG Hua, WANG Bo. Ecological restoration scheme of lake basins on the karst plateau based on natural solution: Take nine lakes on the Yunnan Plateau as example[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 391-401.
- [14] Chen Z, Zhang C H, Raza S T. Evaluation of forest ecological security and its influencing factors in multi-climatic zones: A case study of Yunnan Province[J]. Applied Sciences, 2023, 13(22): 12345.
- [15] 刘佳, 肖玉, 张昌顺, 黄孟冬. 基于地表水与地下水分割校正的漓江流域水供给服务时空格局研究[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6099-6116. LIU Jia, XIAO Yu, ZHANG Changshun, HUANG Mengdong. Spatio-temporal patterns of water supply service in the Li river basin based on correction method of surface water and groundwater partitioning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6099-6116.
- [16] Qin H X, Li S, Sun J W, Cheng J H. Scale-dependent responses of ecosystem service trade-offs to urbanization in Erhai lake basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(57): 120663-120682.
- [17] 刘浩, 孙丽慧, 吕文魁, 舒昶, 张惠远. 基于土地利用变化的洱海流域生态系统服务价值评估与变化分析[J]. 生态经济, 2022, 38(1): 147-152. LIU Hao, SUN Lihui, LYU Wenkui, SHU Chang, ZHANG Huiyuan. Evaluation and change analysis of ecosystem service value in Erhai lake basin based on land use change[J]. Ecological Economy, 2022, 38(1): 147-152.
- [18] 董亚坤, 郭羽鑫, 吴碧兰, 曾维军. 基于土地利用动态变化的洱海流域上游生态系统服务价值分析[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(1): 16-24. DONG Yakun, GUO Yuxin, WU Bilan, ZENG Weijun. Analysis of ecosystem service values in the upper Erhai lake basin based on dynamic changes in land-use[J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44(1): 16-24.
- [19] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 302-314. FO Baopu. The effects of topography and elevation on precipitation[J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(4): 302-314.
- [20] 贾洋, 崔鹏. 高山区多时间尺度 Anusplin 气温插值精度对比分析[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 757-766. JIA Yang, CUI Peng. Contrastive analysis of temperature interpolation at different time scales in the alpine region by Anusplin[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(3): 757-766.
- [21] 张仁平, 张云玲, 郭靖, 冯琦胜, 梁天刚. 新疆地区降水分布的空间插值方法比较[J]. 草业科学, 2018, 35(3): 521-529. ZHANG Renping, ZHANG Yunling, GUO Jing, FENG Qisheng, LIANG Tiangang. Comparison of spatial interpolation methods for precipitation distribution in Xinjiang region[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(3): 521-529.
- [22] 石雅馨. 云南典型低丘缓坡项目区水源涵养功能变化研究

- [D]. 昆明: 云南财经大学, 2020.
- SHI Yaxin. Study on the change of water conservation function in typical gentle hillside project area in Yunnan[D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2020.
- [23] 陈武, 张山江, 侯春华, 陈尘, 曾李晨. 二次指数平滑预测模型回归系数计算方法探讨[J]. 统计与决策, 2016(19): 11-12.
- [24] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4106-4118.
- CHU Lin, ZHANG Xinran, WANG Tianwei, LI Zhaoxia, CAI Chongfa. Spatial-temporal evolution and prediction of urban landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [25] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178.
- ZHANG Xueru, ZHOU Jie, LI Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 160-178.
- [26] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [27] 赵兰兰, 闻童, 赵兵, 石朋. 西南地区近 50 年干旱趋势及特征分析[J]. 水文, 2021, 41(6): 91-95, 59.
- ZHAO Lanlan, WEN Tong, ZHAO Bing, SHI Peng. Drought tendency and characteristic analysis in Southwest China during recent 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(6): 91-95, 59.
- [28] 游智文, 李肖肖, 阳勇, 鲁梦格. 基于 GRACE 重力卫星与 SPEI 的云南干旱监测[J]. 节水灌溉, 2024(3): 34-41, 49.
- YOU Zhiwen, LI Xiaoxiao, YANG Yong, LU Mengge. Drought monitoring in Yunnan Province based on GRACE gravity satellite and SPEI[J]. Water Saving Irrigation, 2024(3): 34-41, 49.
- [29] 荣艳淑, 巩琳, 卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 22-29.
- RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29.
- [30] 张强, 邹旭恺, 陈鲜艳, 赵琳, 李婷婷, 钱忠华. 考虑多尺度和蒸散影响的新干旱指数研究: 以云南为例[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 909-920.
- ZHANG Qiang, ZOU Xukai, CHEN Xianyan, ZHAO Lin, LI Tingting, QIAN Zhonghua. A new drought index study that takes into account a multi-timescale and the effects of evapotranspiration: Taking Yunnan as an example[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 909-920.
- [31] 吴绍洪, 潘韬, 曹杰, 何大明, 肖子牛. 西南纵向岭谷地形对季风的“通道—阻隔”作用[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 1-13.
- WU Shaohong, PAN Tao, CAO Jie, HE Daming, XIAO Ziniu. Barrier-corridor effect of longitudinal range-gorge terrain on monsoons in Southwest China[J]. Geographical Research, 2012, 31(1): 1-13.
- [32] 张伟康. 孟加拉湾—青藏高原区域热力配置与云南五月雨量异常[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- ZHANG Weikang. Thermal configuration of the Bay of Bengal-Tibetan Plateau region and the May precipitation anomaly in Yunnan[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.
- [33] 包文, 段安民, 游庆龙, 胡蝶. 青藏高原气候变化及其对水资源影响的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(2): 158-169.
- BAO Wen, DUAN Anming, YOU Qinglong, HU Die. Research progress on climate change and its impact on water resources over the Tibetan Plateau[J]. Climate Change Research, 2024, 20(2): 158-169.

Research on water conservation in karst graben basin from the perspective of ecological restoration of territory space: A case study of the Erhai lake basin

YANG Fengji¹, HE Xiang¹, CHEN Chaowen¹, WANG Jinman^{2,3}, ZHOU Zhiping⁴, ZHANG Hua⁵, LIU Biao²
 (1. Yunnan Gold and Mining Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650299, China; 2. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 4. Yunnan Geology and Mineral Engineering Investigation Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650051, China; 5. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract The Erhai lake basin is an important ecological area outlined in the "14th Five-Year Plan" and the Master Plan on Major Projects for the Conservation and Restoration of National Key Ecosystems (2021–2035). The water conservation function in the Erhai lake basin plays a crucial role in maintaining the balance of water resources and ecology. To formulate effective protection and restoration strategies, methods such as ANUSPLIN meteorological interpolation, regional hydrogeological assessment, and InVEST water yield calculation have been employed to evaluate and predict the water yield and water conservation function of the Erhai lake basin.

The research conclusions are as follows, (1) Through hydrological and geological assessments, it is confirmed that the Erhai basin constitutes a relatively complete hydrogeological unit. Influenced by climate change and land use, there was a 3.6% increase in water yield in 2022 compared to 2006, alongside a 1.65% decrease in water conservation. The areas with high water conservation rates are mainly located in the Cangshan mountain and northern mountainous regions, with an average water conservation rate exceeding 10%. In contrast, the areas with low water conservation rates are primarily found in the graben basin region, where the average water conservation rate is only 2.89%. (2) The prediction results indicate that, due to the decrease of precipitation, both the natural inertia development scenario and the ecological protection and restoration scenario will experience a decline in water source conservation. However, the reduction in water conservation under the ecological restoration scenario is significantly lower than that under the natural inertia development scenario, and the water conservation rate in ecological restoration has increased. There is a risk of local degradation in the natural inertia development scenario, while the ecological protection and restoration scenario can enhance the water conservation capacity through measures, and reduce the risk of degradation. (3) The spatial and temporal distribution of water conservation in the Erhai lake basin is closely related to natural factors such as climate and land use structure. In response to the degradation of water conservation function in the Erhai lake basin, existing sub-projects were studied and evaluated. Special attention was given to the northern Cangshan range and southeastern mountainous area, where measures such as ecological status assessment, and engineering water supplement were proposed to enhance water conservation, maintain ecosystem stability, and promote sustainable development.

Key words graben basin area, ecological protection and restoration of territory space, water conservation, scenario simulation of land use

(编辑 张玲)