引文格式：刘琰洁,曾渝,王灿辉,等. 若尔盖高原水源涵养功能时空变化特征与未来情景预测[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 55-62. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.011

若尔盖高原水源涵养功能时空变化特征与未来情景预测

刘琰洁[1]，曾　渝[1]，王灿辉[1]，丁骑兵[1]，张梦婷[2*]，计博文[1]
（1. 四川省地质调查研究院测绘地理信息中心，四川 成都 610072；2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 611132）

摘　要：基于InVEST模型，评估了2000年、2010年和2020年若尔盖高原不同土地利用类型的水源涵养功能，并利用CA-Markov模型预测和评估了若尔盖高原2030年的水源涵养功能。结果表明：2000年、2010年和2020年若尔盖高原的平均水源涵养量分别为97.54、122.20、211.84 mm，水源涵养总量分别为41.56×10^8、52.07×10^8、90.25×10^8 m^3；在空间分布上，水源涵养量呈由西北向东南逐步增加趋势，低值区主要位于若尔盖县东北部和红原县南部地区。2000—2020年各地类水源涵养量均随时间呈增加趋势，单位面积水源涵养量排序为草地＞沼泽湿地＞耕地＞林地＞水体。预测结果表明，2030年若尔盖高原水源涵养量较2020年略有提升，平均水源涵养量和水源涵养总量分别为222.04 mm和94.18×10^8 m^3。2030年水源涵养能力较好的仍是草地，沼泽湿地水源涵养功能有所退化。相较于2000年，2030年水源涵养量200 mm以上的高值区增加了61.05%，受降水分布影响，高值区向西部转移。研究结果揭示了未来气候情景下若尔盖高原水源涵养与土地利用类型的分布格局，为该区域水资源管理工作提供了科学依据。

关键词：InVEST模型；水源涵养；CA-Markov模型；未来情景预测；高原生态系统
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0055-08

Spatio-temporal Change Characteristics of Water Conservation Function and Future Scenarios Prediction in the Zoige Plateau

LIU Yanjie[1], ZENG Yu[1], WANG Canhui[1], DING Qibing[1], ZHANG Mengting[2], JI Bowen[1]
(1. Surveying and Mapping Geographic Information Center, Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610072, China;
2. PowerChina Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu 611132, China)

Abstract: Based on the InVEST model, we evaluated the water conservation function of different land-use types of the Zoige Plateau in 2000, 2010, and 2020, and used CA-Markov model to predict and evaluate the water conservation function of the Zoige Plateau in 2030. The results showed that the average water conservation amounts of the Zoige Plateau in 2000, 2010 and 2020 were 97.54, 122.20 and 211.84 mm, respectively, with the total water conservation amounts of 41.56×10^8、52.07×10^8 and 90.25×10^8 m^3. In terms of spatial distribution, the water conservation amount showed a gradually increasing trend from northwest to southeast, with low value areas mainly located in the northeast of Zoige County and the south of Hongyuan County. From 2000 to 2020, the water conservation amounts of various land-use types showed an increasing trend over time. The water conservation amount per unit area of various land-use types showed grassland>swamp wetland>cultivated land>forest>water body. The prediction results show that the water conservation amount of the Zoige Plateau in 2030 is slightly higher than that in 2020, the average water conservation amount and total water conservation amount are 222.04 mm and 94.18×10^8 m^3, respectively. The water conservation amount in 2030 is still better in grassland, while the water conservation function of swampy wetland is degraded. Compared with 2000, the high value areas with water conservation of more than 200 mm in 2030 increased by 61.05%, and the high value areas shift to the west due to the precipitation distribution. The results reveal the distribution pattern of water conservation and land-use types in the Zoige Plateau under future climate scenarios, which can provide scientific basis for water resources management in the region.

Key words: InVEST model, water conservation, CA-Markov model, future scenario prediction, plateau ecosystem

水源涵养功能是指生态系统在一定时空条件下保持水分的能力[1]，主要反映植物、枯落物和土壤在降雨再分配过程中拦蓄水分和调节径流的作用[2-4]。若尔盖高原位于长江和黄河的源头区，是重要的水源涵养调节区和生物多样性集中区，其草地、湿地资源不仅对生态和社会经济发展影响深远，而且能维持高寒地区生态系统格局和功能[5-6]。20世纪60年代以来，受地理条件、自然环境、人类活动等因素干扰，若尔盖高原出现湿地水位下降、沼泽旱化、草地退化和土壤沙化等一系列生态问题[7-11]。水源涵养功能作为生态系

第一作者简介：刘琰洁（1987—），硕士，高级工程师，从事资源环境遥感工作，E-mail：350362746@qq.com。
通信作者：张梦婷（1996—），硕士，助理工程师，从事智慧水务工作，E-mail：zmt15828639941@163.com。

统服务功能评价的重要组成部分，对维持区域生物多样性具有极为重要的作用[12]。开展若尔盖高原水源涵养功能现状和未来变化研究，对于揭示高原生态系统功能变化及其生态风险评估具有重要意义。

受区域气候、地形、土壤、海拔等因素的共同作用，水源涵养功能具有空间异质性和动态复杂性[13-15]。水源涵养功能评估需要根据评估区的生态系统类型、时空尺度等特点，选择合适的评估方法。传统评估方法主要包括林冠截留剩余量法、蓄水能力法（土壤或综合）、水量平衡法、年径流量法、降雨储存量法、地下径流增长法等[16-17]。目前的研究主要集中于模拟区域尺度下的水源涵养功能空间格局变化[18]，且评估方式逐渐倾向于使用模型进行评价[19]。InVEST模型的产水量模块，基于水量平衡原理分析不同土地利用类型下的土壤渗透性差异以及地表粗糙度、地形因子等对地表径流的影响，适用于定量分析大尺度下生态系统水源涵养功能的时空分布特征及其影响因素[1,12,20]。InVEST模型具有操作简单、参数易获取、空间数据量化、情景模拟预测功能、可在高分辨率和不同尺度下估算生态系统服务等优点[21-23]，目前已在国内外得到广泛应用并取得了很多可靠的研究成果[1,21,24-25]；但针对高原生态系统水源涵养的研究较少，且以单一功能和价值评估为主[20]，时间较早[24]，缺乏与其他技术手段相结合的综合性研究。在全球气候变化的背景下，开展未来情景模式下高原生态系统的水源涵养能力评估与预测，对于揭示高原生态系统服务功能的变化规律，保障高原水资源可持续发展具有重要意义。本文基于InVEST模型的产水量模块，利用2000—2020年的土地利用、气象、地形和土壤等数据，定量评估了若尔盖高原水源涵养功能的时空变化特征，并结合CA-Markov模型，以土地利用预测为切入点，在中等辐射强迫情景模式下，模拟了若尔盖高原未来水源涵养功能的变化趋势，以期为高原生态系统水源涵养功能的科学保护、系统修复和区域规划提供方法和技术支持。

1 数据来源与研究方法

若尔盖高原位于青藏高原东北缘，行政区涉及若尔盖县、阿坝县、红原县、碌曲县和玛曲县；四周群山环抱，北临西倾山、南抵邛崃山、西起巴颜喀拉山、东至岷山，总面积约为4.28×10^4 km^2；平均海拔约为3 500 m，以宽谷、缓丘为主；地势南高北低，是黄河、长江上游众多支流的源头地与汇流处[26-27]；属大陆性高原寒温带湿润半湿润季风气候，年均气温为0.6~1.2℃，气温年较差约为21.4℃，年均相对湿度较高；降雨充沛，主要集中在5—10月；植被类型以草地、林地和沼泽植物为主；土壤类型以草甸土为主，泥炭土、沼泽土和风沙土[28]少量分布，是我国西部的重点水源涵养区[15]。

1.1 数据来源与预处理

1）DEM数据。从地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn）下载30 m空间分辨率ASTER GDEM数据。对DEM数据进行镶嵌、裁剪等预处理，再进行坡度提取和水文分析，从而获取流域数据和地形指数。

2）气象数据。气象数据来源于国家气象科学数据中心（http://data.cma.cn）。选取若尔盖高原内部及其周边的26个气象站，统计各气象站点2000—2020年的日降水量、日平均气温、日平均日照时长、日平均风速和日平均水汽压。剔除少数不可用数据后，考虑到高程对插值的影响，以DEM为协变量，利用协同克里金插值法[29]获得年累积降水量、潜在蒸散量（ET_0）栅格数据，并将空间分辨率统一为30 m×30 m，地理参考统一为WGS84-UTM 47N。2030年逐月降水量数据和逐月平均气温数据来源于国家地球系统科学数据中心2021—2100年中国1 km分辨率多情景多模式数据集[30]（http://www.geodata.cn）。情景模式采用IPCC报告中提出的共享社会经济路径（SSPs）与典型浓度路径（RCPs）相结合的预估情景[31]。每个情景包含3个GCMs（EC-Earth3、GFDL-ESM4和MRI-ESM2-0）气候数据，其中MRI-ESM2-0数据具有情景齐全[32]、降水模拟（青藏高原地区）结果较好[33]、对最低气温空间模态的模拟效果与观测一致性较高[34]等特点。SSP1-1.9、SSP2-4.5、SSP5-8.5是MRI-ESM2-0数据中3种常用的情景模式，SSP1-1.9为中低辐射强迫情景，SSP5-8.5为最高辐射强迫情景，SSP2-4.5为中间路径。本文采用SSP2-4.5下的MRI-ESM2-0数据集。2030年最高、最低气温数据来源于CMIP6官网（https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6）。

3）土地利用数据。土地利用数据为全球地表覆盖数据GlobeLand30（http://www.globallandcover.com），采用的遥感影像主要包括TM5、ETM+、OLI和HJ-1，分辨率为30 m。2010版数据的总体精度为83.50%，Kappa系数为0.78，2020版数据新增了GF-1号影像，总体精度达到85.72%，Kappa系数为0.82。其中划分了耕地、林地、草地、湿地、水体、灌木、苔原、裸地、人造地表、冰川和永久积雪10种土地利用类型。

4）土壤数据。土壤数据来源于世界土壤数据库HWSD（http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/）。中国境内数据来源于第二次全国土地调查南京土壤所提供的1∶100万土壤数据。统计研究区土壤沙粒含量、粉粒含量、粘粒含量、有机碳含量、土壤容重、土壤深度和根系深度数据，计算植物可利用水量（PAWC）和土壤饱和导水率，并将空间分辨率统一为30 m×30 m，地理参考统一为WGS84-UTM 47N。

1.2　研究方法

1.2.1　产水量评估模型

InVEST模型的产水量评估模块是基于Budyko水热耦合平衡假设[2,35]，通过计算降水量与实际蒸散量的差值得到各栅格单元的产水量。研究区年产水量的计算公式为：

$$Y_x=\left(1-\frac{\mathrm{AET}_x}{P_x}\right)\times P_x \tag{1}$$

式中，AET_x为栅格单元年实际蒸散量；P_x为栅格单元年降水量。

土地利用类型的植被蒸散量通过Budyko水热耦合平衡假设公式计算得到，即

$$\frac{\mathrm{AET}_x}{P_x}=\frac{1+\omega_x R_x}{1+\omega_x R_x+1/R_x} \tag{2}$$

$$R_x=\frac{K_c\times ET_{0x}}{P_x} \tag{3}$$

$$\omega_x=Z\frac{\mathrm{AWC}_x}{P_x} \tag{4}$$

式中，R_x为无量纲干燥指数；ω_x为自然气候条件下土壤性质的一个无量纲非物理参数，定义了与潜在蒸散量相关的曲线形状；K_c为植被蒸散系数；ET_{0x}为参考作物蒸散量，由于潜在蒸散量受诸多因素影响，大范围内实测较困难，因此多利用模型进行计算[36]；Z为经验参数，代表区域降水分布季节性特征，取值范围为[1,10]，当降水主要集中在夏季时，取值接近1，当降水主要集中在冬季（12月至次年4月）时，取值接近10[37-40]，本文通过查阅研究区相关文献[37-38]，并将2020年产水量模拟数据与《2020年阿坝州水资源公报》和《2020年四川省水资源公报》中的实际数据进行对比验证，反复调整测试后确定Z为4.5，产水量相对误差约为5.84%；AWC_x为土壤有效含水量。

本文采用FAO推荐的修正标准Penman-Monteith公式计算ET_0[35]：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\dfrac{900}{T+273}(e_a-e_d)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \tag{5}$$

式中，Δ为饱和水汽压与温度相关曲线的斜率（kPa/℃）；R_n为作物表面的净辐射量（MJ/m^2）；G为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}），在实际计算中数值很小，通常忽略不计；γ为湿度计常数（kPa/℃）；T为平均气温（℃）；U_2为2 m处的风速（m/s）；e_a、e_d为饱和、实测水汽压（kPa）。

$$\mathrm{AWC}_x=\min(\mathrm{Soil_dep\,th},\mathrm{Root_depth})\times \mathrm{PAWC}_x \tag{6}$$

式中，Soil_depth、Root_depth为土壤深度和根系深度，参考相关文献取值[24,40]；PAWC_x为植物可利用水量，即田间持水量与萎蔫点含水量之差，范围为0～1[41-42]。

$$\begin{aligned}\mathrm{FMC}=&0.003\,75\mathrm{Sand}(\%)+0.005\,886\mathrm{Silt}(\%)+\\&0.008\,039\mathrm{Clay}(\%)+0.002\,208\mathrm{OM}(\%)-\\&0.143\,40\mathrm{BD}(\%)\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}WC=&-0.000\,059\mathrm{Sand}(\%)+0.001\,142\mathrm{Silt}(\%)+\\&0.005\,766\mathrm{Clay}(\%)+0.002\,228\mathrm{OM}(\%)+\\&0.026\,71\mathrm{BD}(\%)\end{aligned} \tag{8}$$

式中，Sand(%)、Silt(%)、Clay(%)、OM(%)和BD(%)分别为土壤沙粒含量、粉粒含量、粘粒含量、有机质含量和土壤容重，OM(%)由有机碳含量和Bemmelen系数转换得到[43]。

生物物理系数表中包含各地类的根系深度、蒸散系数等参数。由于不同地区自然、气候条件的差异，本文在参考大量文献后对参数进行本地化修正[25,40]，相关参数见表1。

表1　生物物理系数表

土地利用类型代码	土地利用类型名称	土地利用类型系数	最大根系深度/mm	蒸散系数
1	耕地	1	400	0.65
2	林地	1	5 000	1.00
3	草地	1	500	0.65
4	灌木	1	2 000	0.40
5	沼泽湿地	0	300	0.30
6	水体	0	1	0.90
8	人造地表	0	1	0.30
9	裸地	0	1	0.50
10	冰川和永久积雪	0	1	0.80

1.2.2　水源涵养量计算

首先通过模型计算获得栅格尺度的产水量；再结合地形指数、流速系数和土壤饱和导水率对其进行修正，得到区域水源涵养量[38]，即

$$Q=\min\left(1,\frac{249}{\text{Velocity}}\right)\times\min\left(1,\frac{0.9TI}{3}\right)\times\min\left(1,\frac{K_{\text{sat}}}{300}\right)\times Y_x \tag{9}$$

$$TI=\lg\frac{\text{Drainagearea}}{\text{Soil_depth}\times\text{Percent_slope}} \tag{10}$$

式中，Velocity为流速系数，反映不同下垫面对地表径流的影响[40]；TI为地形指数，利用DEM数据计算得到；K_{sat}为土壤饱和导水率（mm/d），基于土壤的粘粒、粉粒和砂粒含量采用Neuro Theta软件计算得到；Drainagearea为集水区栅格数；Percent_slope为百分比坡度。

1.2.3 CA-Markov模型

Markov模型是基于马尔科夫随机过程系统，用于预测和随机控制而形成的过程理论模型。在土地利用预测中，Markov模型注重预测土地利用的变化量，但无法展示变化的空间分布[44-46]，计算公式为[47]：

$$S_{(t+1)}=\boldsymbol{P}_{ij}\times S_{(t)} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{P}_{ij}=\begin{bmatrix}P_{11} & \cdots & P_{1n}\\ \vdots & & \vdots\\ P_{n1} & \cdots & P_{nn}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中，$S_{(t)}$、$S_{(t+1)}$分别为t、$t+1$时刻的土地利用状态；$\boldsymbol{P}_{ij}$为土地利用类型转移概率矩阵，$0\leqslant\boldsymbol{P}_{ij}<1$且$\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{P}_{ij}=1(i,j=1,2,\cdots,n)$；$n$为土地利用类型。

元胞自动机模型（CA）是一种时间、空间状态均离散的格子动力学模型，具有强大的空间计算模拟功能，能模拟各种情景下土地利用类型的空间变化情况[44]，计算公式为：

$$S_{(t+1)}=f\left[S_{(t)},N\right] \tag{13}$$

式中，S为元胞有限离散的集合状态；N为元胞的领域；f为局部空间的元胞转化规则。结合二者优势的CA-Markov模型能有效推演景观格局的空间变化，弥补土地利用时空同步模拟的短板问题[44]。

利用Kappa系数评估土地利用变化预测精度，计算公式为[47]：

$$\text{Kappa}=(P_0-P_c)/(P_p-P_c) \tag{14}$$

式中，P_0为正确模拟的比例；P_c为模型随机情况下正确预测的比例；P_p为理想情况下正确预测的比例；通常Kappa高于0.80时，模拟结果被认为具有较好的可信度[48]。

1.3 技术路线

本文通过提取土壤深度和植物可利用含水量、年降水量和潜在蒸散发、地形指数和坡度因子，并结合多年土地利用类型数据，利用地形指数、流速系数和土壤饱和导水率修正的InVEST模型模拟若尔盖高原多年水源涵养的空间分布；再通过CA-Markov模型和SSP2-4.5情景模式数据模拟2030年土地利用和气候条件，实现水源涵养量的未来情景预测。

2 研究结果与分析

2.1 土地利用变化特征

由表2可知，2000—2020年若尔盖高原地类以草地和湿地为主，平均面积占比分别为75.23%和11.52%，其余依次为林地、耕地和水体，占比分别为9.76%、2.37%和0.52%。由于裸地、冰川、人造地表和灌木面积的占比太小，统称为其他地类，不作为研究重点。据统计，2000—2020年若尔盖高原各地类发生了不同程度的变化，湿地、耕地和林地面积均有所增加，其中湿地面积增加最多，增加了564.2 km^2，增幅为12.24%；耕地面积增加了517.27 km^2，增幅最大，为78.68%；林地面积增加了219.45 km^2，增幅仅为5.23%。草地与水体面积出现了不同程度的减少，草地面积降幅约为5.49%；水体面积降幅较小，仅为0.85%。

表2 2000—2020年若尔盖高原主要地类面积与占比

土地利用类型	2000年		2010年		2020年	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
草地	33 037.26	77.22	32 299.07	75.49	31 224.38	72.98
湿地	4 609.26	10.77	5 001.99	11.69	5 173.46	12.09
林地	4 196.77	9.81	3 914.63	9.15	4 416.21	10.32
耕地	657.47	1.54	1 207.35	2.82	1 174.74	2.75
水体	239.50	0.56	185.49	0.43	237.46	0.56
其他地类	44.50	0.01	176.23	0.42	558.50	1.30

由表3可知，草地转出面积为转入面积的3.29倍，大面积草地被湿地、耕地和其他地类占据；耕地开垦、人工造林、城镇建设等人类活动是导致草地面积持续退化的原因之一，其中97.29%的林地、95.82%的其他地类、94.62%的耕地、93.20%的湿地和64.18%的水体由草地转入。同时，若尔盖高原水文状况的改变导致水体面积减少，其转出面积是转入面积的1.02倍，有52.99 km^{2}的水体转出为湿地，占总转出面积的46.45%；48.33 km^{2}的水体转出为草地，占总转出面积的42.36%。

表3　2000—2020年若尔盖高原土地利用转移矩阵/km²

2000年	2020年						
	草地	湿地	林地	耕地	水体	其他地类	转出面积
草地		900.25	558.05	567.44	71.91	505.99	2 603.64
湿地	354.65		2.26	9.07	31.49	4.23	401.70
林地	335.81	0.59		8.23	4.50	5.02	354.15
耕地	43.86	11.91	10.84		3.89	11.96	82.46
水体	48.33	52.99	2.12	9.77		0.88	114.09
其他地类	8.12	0.15	0.33	5.22	0.26		14.08
转入面积	790.77	965.89	573.60	599.73	112.05	528.08	

2.2　水源涵养时空变化特征

2000年、2010年和2020年若尔盖高原年均水源涵养量分别为97.54、122.20、211.84 mm，多年平均值为143.86 mm，呈显著增长趋势；水源涵养总量分别为41.56×10⁸、52.07×10⁸、90.25×10⁸ m³，多年平均值为61.29×10⁸ m³；相较于2000年，2020年水源涵养功能提高了117.18%。在空间分布上，2000—2020年若尔盖高原水源涵养整体表现为由西北向东南逐步增加（图1），低值区位于若尔盖县东北部和红原县南部地区，其中红原县龙日曲和色阿曲一带的水源涵养量较高，其原因在于该区域地势低、植被覆盖度较高。

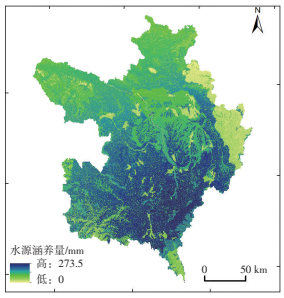


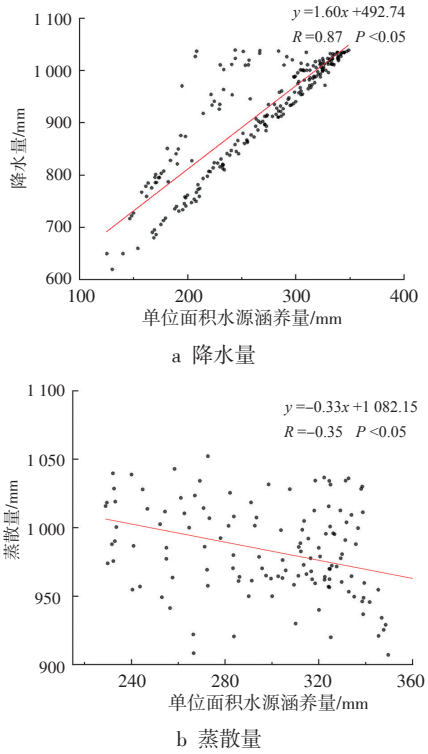
图1　2000—2020年若尔盖高原平均水源涵养量

审图号：GS(2024)4565

水源涵养量的时空变化是多种因素共同作用的结果。由1 km×1 km的格网统计可知（图2），研究区降水量与水源涵养量呈显著正相关关系（$P<0.05$），相关系数为0.87；蒸散量与水源涵养量呈负相关关系（$P<0.05$），相关系数为−0.35。由此可见，降水量可能是若尔盖高原水源涵养功能变化的主要驱动因子，降水量越大、水源涵养量越高；由于受蒸散量影响，植被越茂盛的区域蒸散量越高，不利于形成径流，导致水源涵养量较低。

2.3　不同地类的水源涵养量

2000—2020年各地类的水源涵养量与若尔盖高原整体水源涵养量的变化较一致，呈逐渐增加趋势。虽然草地面积减少了1 812.88 km²，但其水源涵养总量仍处于增长趋势，由3 736.01×10⁶ m³增至7 644.18×10⁶ m³，



a 降水量

b 蒸散量

图2　若尔盖高原水源涵养量与降水量和蒸散量的相关关系

增幅约为104.61%。此外，湿地、林地和耕地分别增加了498.3×10⁶、302.49×10⁶、143.79×10⁶ m³。由于不同地类面积差异较大，除草地（占比75.23%）和湿地外，其他地类占比较小，使得草地的多年水源涵养总量较高，达5 302.40×10⁶ m³；湿地、林地和耕地分别为540.49×10⁶、163.44×10⁶、115.17×10⁶ m³。不同地类单位面积水源涵养量存在显著差异，草地最大，平均单位面积水源涵养总量达149.42 m³，其次为湿地（97.2 m³）、耕地（96.25 m³）和林地（34.18 m³）。

2.4　2030年水源涵养能力预测

2.4.1　土地利用预测分析

基于2000年和2010年的土地利用类型数据，利用CA-Markov模型模拟若尔盖高原2020年的土地利用格局，并将模拟结果与实际数据进行比对，验证其精度。结果表明，Kappa系数为0.90，模拟结果可信度较高。在此基础上，利用2010年、2020年的土地利用类型数据模拟2030年若尔盖高原土地利用类型。由表4可知，与2020年相比，2030年的地类整体变化平缓，湿地面积略有增长，增幅为0.10%；草地、林地、耕地和水体面积则存在不同程度的减少，其中草地面积减少最多（91.37 km²），水体面积降幅最大（3.48%），耕地和林地面积略有下降，降幅较小。人造地表等其他地类明显扩张，表明未来人类活动对若尔盖高原的持续影响，但与2010—2020年相比，

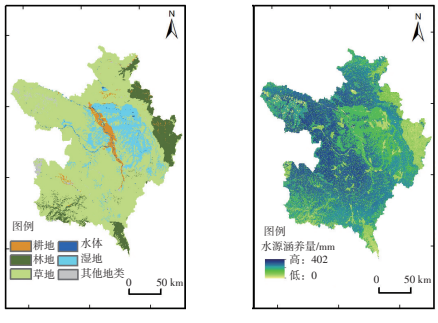
2020—2030年草地面积降幅明显降低。在一系列重大生态保护和生态工程建设背景下，若尔盖高原生态系统逐步得到有效保护，或将进一步减缓人类活动带来的不利影响。

表4 2030年若尔盖高原不同地类面积预测

土地利用类型	面积/km²	占比/%
草地	31 133.01	72.77
湿地	5 178.46	12.10
林地	4 414.55	10.32
耕地	1 154.61	2.70
水体	229.19	0.53
其他地类	674.95	1.59

2.4.2 水源涵养预测分析

本文基于CA-Markov模型模拟的2030年土地利用类型（图3a）和SSP2-4.5下的MRI-ESM2-0数据，对若尔盖高原2030年的水源涵养量进行预测。气候模式预测数据显示，2030年若尔盖高原的年均降水量约为963.36 mm，相较于2000年、2010年和2020年分别提高了59.38%、37.58%和3.60%。2030年预测水源涵养量为0~402 mm，平均水源涵养量为222.04 mm，水源涵养总量为94.18×10^8 m³，比2020年略有提升。从空间分布来看（图3b），水源涵养量低值区位于若尔盖县东北部和红原县南部区域，而高值区转移到西部的玛曲县和阿坝县北部地区，整体表现为由东部向西部逐渐增加。



a 土地利用类型 b 水源涵养量

图3 2030年若尔盖高原土地利用类型和水源涵养量预测图

审图号：GS(2024)4565

由表5可知，2030年若尔盖高原水源涵养高值区面积增加明显，大部分区域的水源涵养功能有所提升，2000年若尔盖高原平均水源涵养量达200 mm以上的区域仅占研究区总面积的0.06%，2010年增至13.84%，2020年达到52.75%，预测结果显示2030年占比达到61.11%；与2020年相比，2030年平均水源涵养量达300 mm以上区域的占比相差不大，而水源涵养量在200~300 mm区域的占比增加了8.6%。

表5 2000—2030年若尔盖高原水源涵养分级统计表

水源涵养量/mm	面积占比/%			
	2000年	2010年	2020年	2030年
0~100	55.04	33.49	15.83	16.65
100~200	44.90	52.67	31.42	22.24
200~300	0.06	13.84	26.25	34.85
300以上	0	0	26.50	26.26

对比2000—2030年不同地类的水源涵养总量可知，2030年水源涵养总量最高的仍是草地，达到$8\ 082.14\times10^6$ m³，其次为湿地、林地和耕地等，分别为814.15×10^6、292.40×10^6、196.50×10^6 m³。相较于2020年，草地、耕地和水体的单位面积水源涵养量有所提升，湿地、林地则略有下降，分别为0.56%、18.13%。

2000—2020年若尔盖高原的平均水源涵养量为97.54~211.84 mm，水源涵养总量为41.56×10^8~90.25×10^8 m³，多年平均值为61.29×10^8 m³，空间分布与苑跃等[15]的研究结果相似，但水源涵养低值区的分布存在差异，可能与研究方法和研究尺度不同有关。若尔盖高原的水源涵养量与降水量呈显著正相关关系，年均水源涵养量（143.86 mm）约占区域年平均降水量的19.31%，其水源涵养能力与都江堰市（21.7%）接近[40]。

若尔盖高原土地利用类型以草地（75.23%）、湿地（11.52%）和林地（9.76%）为主。2000—2020年湿地、林地和耕地面积总体呈上升趋势；而草地和水体呈下降趋势，由于水体总面积不大且受较强的蒸散作用，其变化对水源涵养量影响较小，但草地面积持续减少，转出面积为1 812.88 km²，降幅约为5.49%。受降水分布、土壤性质和蒸发能力等因素影响，不同地类的水源涵养能力差异明显[17]。总体来看，各地类单位面积水源涵养量为草地 > 沼泽湿地 > 耕地 > 林地 > 水体，与Gai等[37]的评估结果基本相似，部分差异可能是由数据源和研究时空尺度不同所致。林地单位面积的水源涵养能力低于耕地等，原因在于气象因素对水源涵养功能影响较大，而林地主要位于若尔盖县东部和红原县南部，降水较少且自身具有较高的蒸散量，单位面积林地比耕地和草地水分流失更多，使得其单位面积产水量较小[37,39]。研究区草地属于高寒草甸生态系统，土壤颗粒细，具有较好的持水能力[25,49]，可能是其水源涵养能力较高的原因之一。

模拟预测结果显示，与2020年相比，2030年若尔盖高原水源涵养功能总体呈上升趋势，其中草地的水源涵养能力较好，湿地和林地的水源涵养能力略有降低。20世纪60年代以来，若尔盖高原沼泽湿地大

规模挖渠、排水等人为干扰活动对湿地演变存在直接影响[7,50-52]；且在水力侵蚀作用下，若尔盖高原土壤有机质含量下降、部分区域土壤沙化，可能是若尔盖高原沼泽湿地水源涵养能力退化的重要原因[9]。然而可以预见，未来人类活动对生态系统的干扰将趋于平稳，并向有利方向发展[53]。受降水分布影响，2030年水源涵养高值区向西部转移，再次反映了降水量对水源涵养的重要影响。未来在增强水源涵养功能方面，应重点关注东部水源涵养量低值地区；对于西部和南部高值区，应继续维护当前的生态建设水平，增强生态系统稳定性，保持水源涵养能力的持续发展。

CA-Markov模型和InVEST模型在各自应用领域都取得了很好的效果，但将二者相结合的研究较少[54]。受限于评价模型与技术方法，针对不同区域水源涵养功能的研究结果差异较大，可比性较低[37]。但毫无疑问的是，若尔盖高原地区具有巨大的水源涵养价值。近年来，整个青藏高原的气温呈上升态势，陈炜等[34]的研究表明，到21世纪90年代，SSP2-4.5下青藏高原的年均地表气温将上升2.5℃，年降水量将增加12.8%，而在SSP5-8.5下，其年均地表气温和年降水量的增幅将更大。由此可见，气候变化或将对区域水源涵养功能产生持续影响，在定量评估水源涵养功能时空变化的基础上，加入未来情景的模拟预测势在必行。

3　结　论

本文将CA-Markov模型与InVEST模型相结合，评估了若尔盖高原2000—2020年的水源涵养量，并基于SSP2-4.5下的MRI-ESM2-0数据预测了2030年的水源涵养情况，定量分析了不同地类水源涵养量的时空分布特征，主要结论包括：2000年、2010年和2020年若尔盖高原单位面积平均水源涵养量分别为97.54、122.20、211.84 mm，多年平均值为143.86 mm；水源涵养总量分别为41.56×10^8、52.07×10^8、90.25×10^8 m^3，多年平均值为61.29×10^8 m^3。空间上整体表现为由西北向东南逐步增加的趋势，水源涵养低值区主要分布在若尔盖县东北部和红原县南部地区。预测结果显示，2030年水源涵养功能较2020年略有提升，平均水源涵养量为222.04 mm，水源涵养总量为94.18×10^8 m^3，高值区由南部地区转移到了西部的玛曲县和阿坝县北部地区。相关分析表明，若尔盖高原的降水量与水源涵养量呈显著正相关关系，相关系数为0.87，蒸散量与水源涵养量呈负相关关系，相关系数为-0.35。降水量和蒸散量是水源涵养能力的直接影响因子，降水量越大，水源涵养量越高；植被越茂盛的区域蒸散量越高，越不利于形成径流，水源涵养量越低。2000—2020年若尔盖高原各地类面积发生了不同程度的转移，具体表现为湿地、耕地和林地面积增加，草地、水体面积减少，转移特征主要为草地向湿地、耕地和林地转移，反映了开垦耕地、过度放牧、人工造林等人类活动造成的影响。2000—2020年若尔盖高原不同地类单位面积水源涵养量为草地 > 沼泽湿地 > 耕地 > 林地 > 水体。在SSP2-4.5下的模拟预测表明，2030年草地、耕地和水体单位面积水源涵养量较2020年有所提升，而湿地和林地则略有下降，2030年沼泽湿地的水源涵养能力略低于耕地。建议未来应重点考虑如何有效提高湿地和林地的水源涵养能力，保障高原湿地生态系统水资源安全。

参考文献

[1] Hu W, Guo L, Gao Z, et al. Assessment of the Impact of the Poplar Ecological Retreat Project on Water Conservation in the Dongting Lake Wetland Region Using the InVEST Model[J]. Science of the Total Environment, 2020, 733:139 423

[2] Li M, Liang D, Xia J, et al. Evaluation of Water Conservation Function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China Based on InVEST Model[J]. Journal of Environmental Management,2021,286:112 212

[3] Zhang B A, Li W H, Xie G D, et al. Water Conservation of Forest Ecosystem in Beijing and Its Value[J]. Ecological Economics,2010,69(7):1 416-1 426

[4] Vose J M, Sun G, Ford C R, et al. Forest Ecohydrological Research in the 21st Century: What Are the Critical Needs?[J]. Ecohydrology,2011,4(2):146-158

[5] 李晋昌，王文丽，胡光印，等. 若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报，2011，31(12):3 451-3 459

[6] 税伟，白剑平，简小枚，等. 若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能[J]. 生态学报，2017，37(1):277-285

[7] 赵魁义，何池全. 人类活动对若尔盖高原沼泽的影响与对策[J]. 地理科学，2000，20(5):444-449

[8] 刘红玉，白云芳. 若尔盖高原湿地资源变化过程与机制分析[J]. 自然资源学报，2006，21(5):810-818

[9] 熊远清，吴鹏飞，张洪芝，等. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. 生态学报，2011，31(19):5 780-5 788

[10] 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):1 019-1 030

[11] 王京,卓玛姐,阿西,等. 若尔盖高原不同退牧还湿方式下泥炭沼泽表层土壤的水源涵养能力研究[J]. 湿地科学,2022,20(2):188-195

[12] Liu R, Niu X, Wang B, et al. InVEST Model-based Spatio-temporal Analysis of Water Supply Services in the Zhangcheng District [J]. Forests,2021,12(8):1 082

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

[14] 柳冬青,曹二佳,张金茜,等. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素[J]. 自然资源学报,2020,35(7):1 728-1 743

[15] 苑跃,张亮,崔林林. 若尔盖高原生态系统水源涵养功能时空变化特征[J]. 生态学杂志,2020,39(8):2 713-2 723

[16] 张彪,李文华,谢高地,等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志,2009,28(3):529-534

[17] 刘娇,郎学东,苏建荣,等. 基于InVEST模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. 生态学报,2021,41(20):8 099-8 111

[18] 李霞,崔霞,何晓菲,等. 柴达木盆地水源涵养功能时空特征分析[J]. 草业科学,2022,39(4):660-671

[19] 张徐,李云霞,吕春娟,等. 基于InVEST模型的生态系统服务功能应用研究进展[J]. 生态科学,2022,41(1):237-242

[20] 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):6 161-6 170

[21] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical Validation of the InVEST Water Yield Ecosystem Service Model at a National Scale[J]. Science of the Total Environment, 2016(569/570):1 418-1 426

[22] Daneshi A, Brouwer R, Najafinejad A, et al. Modelling the Impacts of Climate and Land Use Change on Water Security in a Semi-arid Forested Watershed Using InVEST[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2021, 593:125 621

[23] Yin G, Wang X, Zhang X, et al. InVEST Model-based Estimation of Water Yield in North China and Its Sensitivities to Climate Variables[J]. Water,2020,12(6):1 692

[24] 包玉斌,李婷,柳辉,等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究,2016,35(4):664-676

[25] 兰翔宇,叶冲冲,王毅,等. 1995—2014年青藏高原水源涵养功能时空演变特征及其驱动力分析[J]. 草地学报,2021,29(增刊1):80-92

[26] 谢家丽,宋翔,颜长珍. 人类干扰对若尔盖高原景观格局变化影响的遥感分析[J]. 北京联合大学学报(自然科学版),2012,26(3):16-20

[27] 蒋桂芹,靖娟,毕黎明. 气候变化和人类活动对若尔盖湿地水源涵养量的影响[C]//中国水利学会. 中国水利学会2021学术年会论文集第一分册,2021

[28] 付琳玉,孙永玉,胥汝宇,等. 若尔盖地区主要覆被类型浅层土壤持水量和有机碳关系研究[J]. 草地学报,2022,30(4):818-824

[29] 朱浩楠,刘晓冉,李永华,等. 考虑地形的空间插值算法在复杂下垫面地区气温和降水精细化插值的评估[J]. 气象,2020,46(5):655-665

[30] Peng S, Ding Y, Wen Z, et al. Spatiotemporal Change and Trend Analysis of Potential Evapotranspiration over the Loess Plateau of China During 2011-2100[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2017,233:183-194

[31] O'neill B C, Kriegler E, Riahi K, et al. A New Scenario Framework for Climate Change Research: the Concept of Shared Socioeconomic Pathways[J]. Climatic Change, 2014,122(3):387-400

[32] 赵梦霞,苏布达,姜彤,等. CMIP6模式对黄河上游降水的模拟及预估[J]. 高原气象,2021,40(3):547-558

[33] 张佳怡,伦玉蕊,刘浏,等. CMIP6多模式在青藏高原的适应性评估及未来气候变化预估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(1):77-89

[34] 陈炜,姜大膀,王晓欣. CMIP6模式对青藏高原气候的模拟能力评估与预估研究[J]. 高原气象,2021,40(6):1 455-1 469

[35] Dehghanisanij H, Yamamoto T, Rasiah V. Assessment of Evapotranspiration Estimation Models for Use in Semi-arid Environments[J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(2):91-106

[36] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 1957—2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报,2015,30(2):315-326

[37] Gai A, Di L, Tang J, et al. Response of Ecological Water Supply Service to Land Cover Change in the Source Area of the Yellow River[J]. Environmental Science and Engineering,2019(34):207-219

[38] 刘菊,傅斌,张成虎,等. 基于InVEST模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(3):577-585

[39] 黄菁,范继辉,何晓蓉. 基于InVEST模型的张家口地区水源涵养功能研究[J]. 山地学报,2021,39(3):327-337

[40] 傅斌,徐佩,王玉宽,等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报,2013,33(3):789-797

[41] 周文佐. 基于GIS的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京:南京农业大学,2003

(下转第75页)