孟姝含,刘子刚.若尔盖高原生态系统碳储量变化及驱动因素分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):1084-1098.
Meng S H, Liu Z G. Analysis of carbon storage changes and driving factors in the ecosystem of the Zoige Plateau [J]. China Environmental Science, 2026,46(2): 1084-1098.

若尔盖高原生态系统碳储量变化及驱动因素分析

孟姝含,刘子刚* (中国人民大学生态环境学院,北京 100872)

摘要：基于 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用数据,利用 PLUS 模型模拟若尔盖高原 2030 年自然发展、生态恢复和经济发展 3 种情景下的土地利用变化,并通过 InVEST 模型估算 1980~2030 年生态系统碳储量,采用地理探测器模型分析碳储量空间分异的驱动因素.结果表明:若尔盖高原主要土地利用类型是草地、林地和湿地,1980~2020 年,该区草地面积较少,湿地和林地面积增加.若尔盖高原 1980~2020 年生态系统碳储量在 12.40~12.91 亿 t 之间,草地和湿地是若尔盖高原的主要储碳生态系统类型,40a 来碳储量增加的区域主要在若尔盖县、玛曲县和红原县的湿地集中区.2030 年生态恢复情景下碳储量与 2020 年相比碳储量增加 414.43 万 t,自然发展情景下碳储量减少 445.67 万 t,经济发展情景下碳储量减少 1159.58 万 t.若尔盖高原生态系统碳储量的空间分异主要受自然因素作用,其中,高程、年平均气温、土壤类型和坡度均为重要驱动因素,交互作用探测表明土壤类型与坡度的交互作用影响最大.

关键词：若尔盖高原；碳储量；PLUS 模型；InVEST 模型；驱动因素
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-1084-15

Analysis of carbon storage changes and driving factors in the ecosystem of the Zoige Plateau. MENG Shu-han, LIU Zi-gang*, (School of Ecology and Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：1084~1098

Abstract：Based on land use data from 1980, 1990, 2000, 2010, and 2020, the PLUS model was used to simulate land use changes in the Zoige Plateau by 2030 under three scenarios: natural development, ecological restoration, and economic development. The InVEST model was further employed to estimate the ecosystem carbon storage from 1980 to 2030. Finally, the Geographic Detector model was used to analyze the driving factors of spatial differentiation of carbon storage. The results showed that: (1) The major land use types in the Zoige Plateau were grassland, woodland, and wetland. From 1980 to 2020, the area of grassland in the region decreased, while the area of wetland and woodland increased. (2) The carbon storage of the Zoige Plateau ecosystem ranged from 1.240 billion tons to 1.291 billion tons from 1980 to 2020. Grassland and wetland were the main carbon storage ecosystem types in the Zoige Plateau. The areas with increased carbon storage over the last 40 years were mainly concentrated in the wetland areas of Zoige County, Maqu County, and Hongyuan County. (3) Carbon storage in 2030increased by 4.1443 million tons compared to 2020 under the ecological restoration scenario, decreased by 4.4567 million tons under natural development scenario, and decreased by 11.5958 million tons under economic development scenario. (4) The spatial differentiation of carbon storage in the Zoige Plateau ecosystem was primarily influenced by natural factors, of which elevation, annual mean temperature, soil type, and slope were all important drivers. Interaction detection indicates that the interaction between soil type and slope had the greatest impact.

Key words：Zoige Plateau；carbon storage；PLUS model；InVEST model；driving factors

若尔盖高原是我国面积最大的高原泥炭沼泽分布区,是一个巨大的碳储存库,在全球及区域碳循环中起到重要作用[1].土地利用变化是陆地生态系统碳储量变化的重要影响因素[2].在人类活动和气候变化的双重压力下,近几十年若尔盖高原的土地利用格局发生了显著变化[3],其生态系统碳储量也随之改变.土地利用变化对生态系统碳储量的影响主要取决于生态系统类型及土地利用转移方式[4],因而当前较多陆地生态系统碳储量的预测研究是基于研究区域内土地利用变化开展的.土地利用模拟模型可以分为数量预测和空间预测两大类[5],数量预测模型有马尔科夫(CA-Markov)[6]、回归分析[7]、系统动力学[8]、灰色预测[9]和人工神经网络[10]等模型,空间预测模型包括元胞自动机(CA)[11]、CLUE-S[12]和 FLUS[13-14]等模型.上述模型虽然能在空间上模拟土地利用变化,但仍存在难以动态捕捉各种土

收稿日期：2025-07-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(41371504);云南省院士专家工作站项目(2019IC012)
* 责任作者, 副教授, zigangliu@163.com

地利用类型斑块的演化[15]、在较大尺度模拟中无法使用或效果较差[16]等问题.PLUS 模型基于栅格数据斑块生成土地利用变化模拟,可以更好地挖掘各类土地利用变化的诱因,模拟多种土地利用类型斑块级的变化[17-18].

目前陆地生态系统碳储量估算主要采用实地调查、遥感和模型模拟等方法[19].实地调查法主要通过野外采样和实验室检测得到的数据估算生态系统碳储量,估算的精确度较高,但在长时间序列和大尺度研究中存在一定缺陷[20].遥感方法通过分析卫星影像或激光雷达等遥感数据估算区域碳储量[21],与传统的实地监测相比能够在短时间内捕获更大面积以及人类难以接近的区域信息[22],大大提高了清查效率,但该方法只能估算植被碳储量,且受限于数据空间分辨率和监测站点数量及分布情况[23].近年来模型模拟法被广泛应用于评估及预测不同尺度下的生态系统碳储量,常见的有“簿记(Bookkeeping)模型”、CASA 模型、CENTURY 模型等,但目前模型结构、参数以及驱动因子仍存在较大不确定性,不同模型预测的碳汇强度存在较大差异[19,24].相比之下,生态系统服务与权衡综合评估模型(简称 InVEST 模型)基于土地利用和碳密度数据对碳储量进行核算,具有数据可得性较好、空间表达明晰[25]等优点.近年来,国内外很多研究基于 InVEST 模型探究不同空间尺度土地利用变化对森林[26]、农田[27]、湿地[28]等各类生态系统碳储量的影响[19-20,29-33].

当前若尔盖高原碳储量研究主要聚焦于湿地土壤碳储量方面[34-39],主要采用的是实地调查的方法,对其他类型生态系统碳储量研究相对较少,缺乏长时间序列的年际动态变化分析,难以反映气候变化与人类活动对碳储量变化的叠加效应.因此,本文基于 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用数据,运用 PLUS 模型和 InVEST 模型耦合估算若尔盖高原生态系统碳储量,采用地理探测器分析其驱动因素,预测 2030 年不同情景下若尔盖高原碳储量的变化,旨在为优化国土空间规划和提升区域生态系统碳汇功能提供科学依据.

1　数据与方法

1.1　研究区概况

若尔盖高原位于青藏高原东缘,地理位置 101°36′E~103°25′E 和 33°10′N~34°06′N,行政区划包括四川省阿坝藏族羌族自治州的若尔盖县、红原县、阿坝县以及甘肃省的碌曲县和玛曲县(图 1).主要地貌类型有低山、丘陵、阶地、河漫滩、宽谷和湖滨洼地等[40],平均海拔 3700m,是一个起伏平缓的丘状高原.该区属于高原亚寒带大陆季风气候,年平均气温 1.1~3.6℃,年平均降水量 612~770mm[41].区内河流主要有黄河及其支流黑河和白河.植被类型以高寒草甸和沼泽为主.

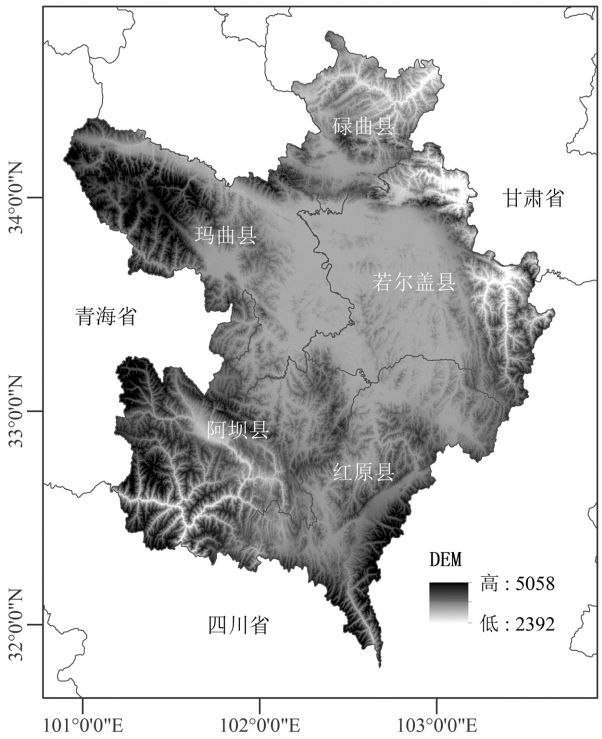


图 1　研究区位置

Fig.1　Location of the research area

1.2　数据来源与处理

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)的“中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)”的 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 5 期空间分辨率为 30m×30m 的栅格数据.运用 ArcGIS10.8 将土地利用数据进行投影转换、裁剪和重采样,参照白军红等[42]的研究对研究区涉及的 24 个二级土地类型进行重分类,土地利用一级分类包括耕地、林地、草地、湿地、建设用地和未利用土地 6 类,其中湿地包括河渠、湖泊、沼泽地、水田和水库坑塘 5 个二级类.

此外,青藏高原边界范围矢量数据来自青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/),土地利用限制区数据来自中国自然保护区标本资源共享平台(http://cnpapc.zrbhq.cn/).

驱动因素数据中(表 1),高程数据来自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/),并进一步计算出坡度和坡向数据.土壤类型、年平均气温、年平均降水、GDP 和人口密度数据均来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn);年平均蒸散发数据来自青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/);NDVI 数据来自国家科技资源共享服务平台(https://www.escience.org.cn);放牧强度数据来自地球资源数据云(http://gis5g.com/home);区位数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn)的“1:25 万全国基础地理数据库”,在 ArcGIS 中通过欧氏距离计算,生成距公路距离、距水域距离等数据.由于驱动因素数据和土地利用数据分辨率存在差异,且数据量过大会大幅降低 PLUS 模型运行速度,故将土地利用变化模拟所选取的数据全部通过 ArcGIS10.8 进行重采样,统一分辨率至 60m.

表 1 土地利用驱动因素数据来源

Table 1 Driving factors and data sources of land use

因素名称	分辨率(m)	数据来源
高程 坡度 坡向	30	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)
土壤类型	1000	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
年平均气温 年平均降水	1000	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)
年平均蒸散发	1000	青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)
NDVI	30	国家科技资源共享服务平台 (https://www.escience.org.cn)
GDP	1000	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn)
人口密度	1000	
放牧强度	1000	地球资源数据云 (http://gis5g.com/home)
距公路距离 距区县中心距离 距水域距离	30	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型估算生态系统碳储量 采用 InVEST 模型模拟分析若尔盖高原生态系统碳储量进行时空演变,其 Carbon 模块将生态系统碳储量划分为 4 个基本碳库[19]:地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳,通过计算区域内各种土地利用类型碳库的碳储量总和得出区域总碳储量,计算公式为:

$$C_i = C_{i_\text{above}} + C_{i_\text{below}} + C_{i_\text{soil}} + C_{i_\text{dead}} \quad (1)$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} C_i \cdot S_i \quad (2)$$

式中:C_i 为第 i 种土地利用类型的总碳密度;C_{i_above} 为第 i 种土地利用类型的地上生物碳密度; C_{i_below} 为第 i 种土地利用类型的地下生物碳密度;C_{i_soil} 为第 i 种土地利用类型的土壤碳密度; C_{i_dead} 为第 i 种土地利用类型的死亡有机碳密度; C_{i_soil} 为陆地生态系统中各土地利用类型四种碳库的碳储量之总和;S_i 为第 i 种土地利用类型的面积.

由于全国水平上的碳密度与若尔盖高原碳密度之间存在差异,参照已有研究的方法[23,43-44],采用气温与降水数据对全国碳密度数据进行修正.考虑到生物碳密度(地上与地下)和土壤碳密度与气温和降水密切相关[45],其中与降水量呈强相关关系,与气温呈弱相关关系,结合气温和降水因子,采用 Alam 等[46]研究中的公式修正年平均降水量与生物和土壤碳密度的关系(式(3)和(4)),采用 Giardina 等[47]和陈光水等[48]研究中的公式修正年平均气温与生物碳密度的关系(式(5)).

$$C_{\text{SP}} = 3.3968 \times \text{MAP} + 3996.1 \quad (3)$$

$$C_{\text{BP}} = 6.789 \times e^{0.0054 \times \text{MAP}} \quad (4)$$

$$C_{\text{BT}} = 28 \times \text{MAT} + 398 \quad (5)$$

式中:C_{SP} 为根据年平均降水量修正的土壤碳密度,kg/m^2;C_{BP} 和 C_{BT} 分别为根据年平均降水量和年平均气温修正的生物碳密度, kg/m^2;MAP 为年平均降水量,mm;MAT 为年平均气温,℃.

将若尔盖高原和全国的年平均气温和年平均降水量分别代入公式(6)~(9),二者之比即修正系数:

$$K_{\text{S}} = C_{\text{SP}_{\text{Z}}} / C_{\text{SP}_{\text{n}}} \quad (6)$$

$$K_{\text{BP}} = C_{\text{BP}_{\text{Z}}} / C_{\text{BP}_{\text{n}}} \quad (7)$$

$$K_{\text{BT}} = C_{\text{BT}_{\text{Z}}} / C_{\text{BT}_{\text{n}}} \quad (8)$$

$$K_{\text{B}} = K_{\text{BP}} \times K_{\text{BT}} \quad (9)$$

式中:$C_{\text{SP}_{\text{Z}}}$ 为根据年平均降水量估算的若尔盖高原土壤碳密度;$C_{\text{SP}_{\text{n}}}$ 为根据年平均降水量估算的全国土壤碳密度;$C_{\text{BP}_{\text{Z}}}$ 和 $C_{\text{BT}_{\text{Z}}}$ 分别为根据年平均降水量

与年平均气温估算的若尔盖高原生物碳密度; C_{BP_n} 和 C_{BT_n} 分别为根据年平均降水量与年平均气温估算的全国生物碳密度;K_{BP} 和 K_{BT} 分别为根据年平均降水量与年平均气温估算的生物碳密度修正系数;K_S 为土壤碳密度修正系数;K_B 为生物碳密度修正系数.

此外,由于死亡有机碳储量相对较小且难以估测[49],故将湿地、建设用地和未利用土地的死亡有机碳密度数据取值为 0,由此得到若尔盖高原各土地利用类型碳密度数据(表 2).

表 2　若尔盖高原不同土地利用类型碳密度(kg C/m^2)

Table 2　Carbon density of different land use types in the Zoige Plateau (kg C/m^2)

土地利用类型	地上生物碳密度		地下生物碳密度		土壤碳密度		死亡有机碳密度	
	数值	来源	数值	来源	数值	来源	数值	来源
耕地	0.7795	①	0.039	①	14.296	①	0.028	①
林地	4.0052	①	0.7254	①	17.4956	①	0.9984	①
草地	0.1197	②	0.3747	②	21.2455	②	0.0828	①
湿地	0.1807	②	2.4707	②	96.1963	①	0	
建设用地	0		0		0		0	
未利用土地	0	②	0.5216	②	5.9629	②	0	

注:①为数据来源于已有文献研究[50];②为来源于2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[51];C_{soil}为0~100cm深度土壤碳密度数据.

1.3.2　PLUS 模型模拟土地利用变化　采用中国地质大学(武汉)Liang 等[17]研发的 PLUS(Patch-generating Land Use Simulation)模型开展土地利用变化的研究.PLUS 是一种基于栅格数据的高精度土地利用变化模拟模型,包含用地扩张分析策略(LEAS)和基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CARS)两大模块.LEAS 模块分析土地利用变化过程,运用随机森林算法分析不同土地利用类型变化原因和增长之间的关系,并计算各种土地利用变化的概率;CARS 模块利用从 LEAS 获得的各种地类的发展概率进行模拟,得到土地利用分布格局,计算公式见文献[17].

根据研究区的实际情况及相关文献,选取表征若尔盖高原土地利用变化驱动因素的指标,包括地形(高程、坡度、坡向、土壤类型)、气候(年平均气温、年平均降水)、社会经济(GDP、人口密度、放牧强度)、区位(距公路距离、距区县中心距离、距水域距离)四大类.首先,将选取的 12 个驱动因素指标输入 LEAS 模块,分析若尔盖高原 2010~2020 年的用地扩张情况;其次,用 Markov 链计算 2030 年的各类用地的需求;最后,用 CARS 模块模拟 2030 年若尔盖高原土地利用变化情况.通过改变邻域权重和转移矩阵等方法设置了以下 3 种未来发展情景(表 3),预测未来不同情景下的研究区的土地利用格局.

自然发展情景(Q1):不考虑政策调控和自然灾害的影响,按照土地利用历史变化趋势,遵循土地利用结构变化规律正常发展.即不考虑政策限制,基于 2010~2020 年土地利用变化趋势,运用马尔科夫链模型预测 2030 年的土地利用需求.该情景是其他情景设定的基础.

生态恢复情景(Q2):将生态环境保护作为首要目标,限制城镇空间扩张,严格管控禁止开发区,设置有利于环境保护和生态文明建设的空间用途管控措施.通过采取一系列生态保护和修复措施,使得草地、林地、湿地等生态用地面积增加,增强区域生态系统碳汇功能.根据《全国湿地保护规划(2022~2030 年)》,若尔盖湿地—甘南黄河湿地作为重点区域之一,将“开展泥炭沼泽湿地保护和退化湿地修复”.因此,该情景严格控制湿地向其他地类的转换,限制林地和草地的转换.将建设用地和未利用土地向林地、草地和湿地转移的概率增加 10%,耕地向建设用地转移的概率降低 30%,林地、草地和湿地向建设用地转移的概率降低 50%[52],同时将研究区内的各级自然保护区作为限制区,限制该区内土地利用类型的转换.

经济发展情景(Q3):该情景将经济发展作为首要目标.一方面,随着人口增长和旅游业发展,基础设施日益完善,建设用地面积增加;另一方面,大力发展畜牧业,强化湿地排水渠建设,草地面积增加.因此,将其他土地利用类型向建设用地转换的概率提高 20%,建设用地向其他土地利用类型转换的概率下降 60%[53],林地、湿地和未利用土地向草地转换的概率提高 20%.

采用 Kappa 系数对模拟结果的精确性进行评估,基于研究区 2010 年土地利用数据模拟 2020 年土地利用格局,与 2020 年实际土地利用数据进行对比,结果显示 Kappa 系数为 0.84,整体精度为 92.06%,表明模型计算结果与实际情况具有高度的一致性[54],可用于未来土地利用分布的预测.

表 3 不同情景下的土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix under different scenarios

地类	自然发展情景(Q1)						生态恢复情景(Q2)						经济发展情景(Q3)					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
b	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
c	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
d	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
e	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注: 矩阵内行表示转出,列表示转入; a、b、c、d、e 和 f 分别表示耕地、林地、草地、湿地、建设用地和未利用土地; 0表示不允许发生转换,1表示允许发生转换.

1.3.3 地理探测器分析碳储量驱动因素 采用中国科学院地理与资源研究所王劲峰等[55]开发的地理探测器(Excel-GeoDetector)软件分析所选取的自然因素和人为因素对若尔盖高原生态系统碳储量的影响.地理探测器能够探测变量的空间分异性,近年来被广泛应用于土地利用驱动机制分析[56].该方法将连续性变量进行离散化处理后,通过建立自变量与因变量之间的模型,分别计算和比较自变量的 q 值及两个自变量叠加后的 q 值,判断每个因变量对自变量的影响程度、变量间是否存在交互作用,及其强弱[56].这一工具主要包括四部分:因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测.因子探测部分的公式为(式(10)和(11)):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \tag{10}$$

$$\mathrm{SSW} = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2, \mathrm{SST} = N\sigma^2 \tag{11}$$

式中:h 为因子的分层;N_h 和 N 分别为层 h 和全区 Y 值单元数;σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区方差;SSW 和 SST 分别为层内方差和总方差;q 为因子的解释力,取值范围为[0,1],q 值越大,驱动因子对 Y 时空分异的解释力越强.

2 结果与分析

2.1 若尔盖高原土地利用时空演变分析

2.1.1 1980~2020 年土地利用变化 如图 2 所示,若尔盖高原主要土地利用类型是草地、林地和湿地.2020 年,草地、林地和湿地总面积占若尔盖高原总面积的 96.53%,耕地、建设用地和未利用土地面积占比很小.其中,草地面积为 29691.26km^2,占研究区总面积的 69.50%,广泛分布于若尔盖高原的大部地区,只有在若尔盖县东部边缘、碌曲县北部和玛曲县西部以及阿坝县东南部边缘地区分布较少[57].林地面积为 6809.35km^2,占研究区总面积的 15.94%,主要分布在若尔盖高原的西南部即阿坝县南部高、中山河谷,以及东北部即岷山西麓.湿地面积为 4739.12km^2,占研究区总面积的 11.09%,主要分布在若尔盖高原中部的若尔盖县、玛曲县和红原县.耕地主要分布于阿坝县.

从各土地利用类型面积占比变化来看(表 4),相较于 1980 年,2020 年若尔盖高原草地面积减少了 1373.18km^2,下降了 4.42%,占研究区面积的百分比从 72.72%降低至 69.50%.其他土地利用类型面积总体增加,其中,湿地面积增加 609.85km^2,增幅为 14.77%,占比从 14.73%增加至 15.94%;林地面积增加 517.87km^2,增幅为 8.23%,占比从 9.67%增加至 11.09%.

基于已有研究的公式[58]计算土地利用动态度,2000~2010 年若尔盖高原综合土地利用动态度最大,为 0.33%;其余时间段综合土地利用动态度均近乎为 0,这表明 2000~2010 年若尔盖高原土地利用变化的总体速度高于其他时间段,是土地利用出现大幅变动的时间段.

使用 ArcGIS10.8 软件对不同时期的土地利用类型图进行空间叠加运算,得到若尔盖高原 1980~2020 年各时间段的土地利用转移矩阵(图 3).可见,1980~2020 年,草地的转出和转入面积均为最大,转出面积为 2974.93km^2,主要转为湿地和林地;转入面积为 1601.76km^2,主要由林地和湿地转入.林地转出面积为 853.66km^2,主要转为草地和耕地;转入面积为 1371.53km^2,主要由草地转入.湿地转出面积为 753.78km^2,主要转为草地和林地;转入面积为

1363.62km^2,主要由草地转入.建设用地的转出面积较小,转入面积 77.64km^2,主要由草地和耕地转入.

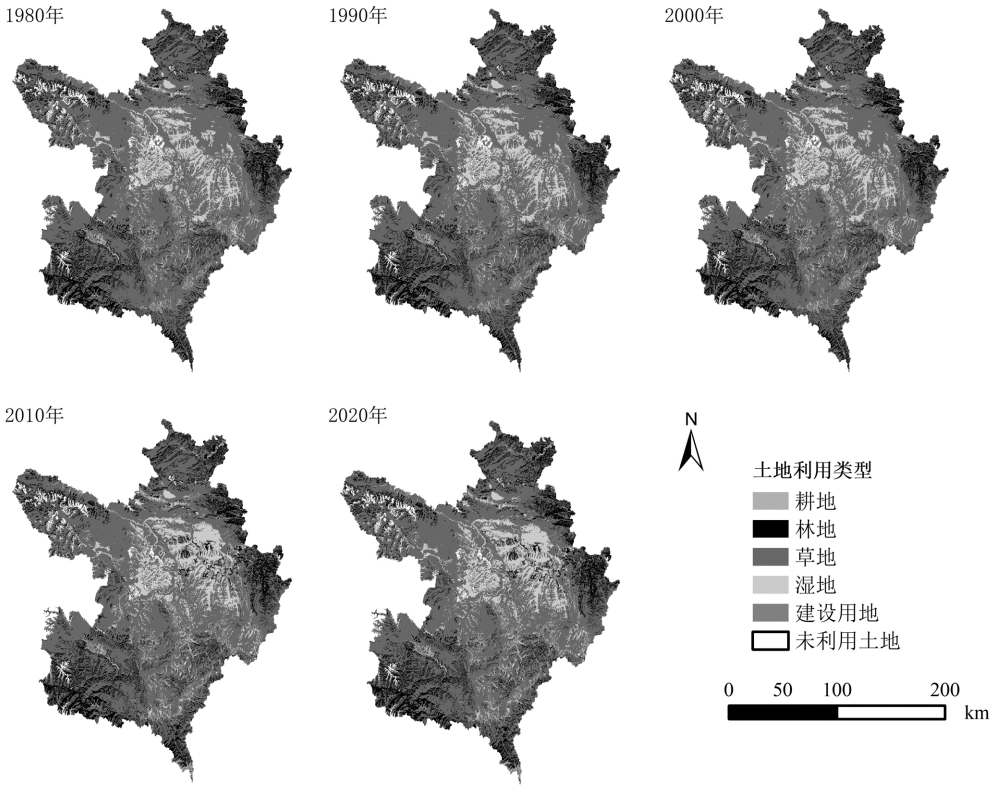


图 2　1980~2020 年若尔盖高原土地利用类型

Fig.2　Land use types of the Zoige Plateau from 1980 to 2020

表 4　1980~2020 年若尔盖高原不同土地利用类型面积及比例

Table 4　Area and proportion of different land use types in the Zoige Plateau from 1980 to 2020

土地利用类型	1980 年		1990 年		2000 年		2010 年		2020 年		1980~2020 年总体变化(km^2)
	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	
耕地	202.42	0.47	202.47	0.4	215.54	0.50	279.82	0.65	267.19	0.63	64.77
林地	6291.48	14.73	6304.20	14.76	6290.02	14.72	6805.70	15.93	6809.35	15.94	517.87
草地	31064.43	72.72	31061.85	72.71	31067.31	72.72	29647.35	69.40	29691.26	69.50	−1373.18
湿地	4129.27	9.67	4123.98	9.65	4108.08	9.62	4799.31	11.23	4739.12	11.0	609.85
建设用地	30.56	0.07	30.69	0.07	34.08	0.08	73.54	0.17	101.67	0.24	71.10
未利用土地	1002.59	2.35	997.56	2.34	1005.72	2.35	1115.03	2.61%	1112.17	2.60	109.59

2.1.2　2030 年土地利用变化模拟　根据 PLUS 模型模拟结果,与 2020 年相比,2030 年自然发展情景(Q1)下建设用地、草地和林地面积将增加,耕地、湿地和未利用土地面积将减少.建设用地面积增加 21.19km^2,增幅最大,为 20.84%;耕地面积减少 9.88km^2,降幅最大,为−3.70%.生态恢复情景(Q2)下,湿地和林地面积将有所增加,其中湿地面积增加 50.32km^2,增幅最大,为 1.06%;林地面积增加 6.70km^2,增幅为 0.10%;其余土地利用类型面积减少.经济发展情景(Q3)下,建设用地面积将增加 44.77km^2,增幅最大,为 44.04%;草地面积增加 271.39km^2,增幅为 0.91%;其余土地利用类型面积减少.

2.2　若尔盖高原生态系统碳储量时空演变分析

2.2.1　1980~2020 年生态系统碳储量变化　基于土地利用数据,利用 InVEST 模型分别计算若尔盖高原 1980~2020 年共 5 期的碳储量(表 5).1980~2020 年若尔盖高原生态系统碳储量在 12.3992~12.9091 亿 t 之间,2020 年若尔盖高原生态系统碳储量为 12.8580 亿 t,与 1980 年相比增加了 4403.42 万 t.从时间变化来看,1980~2000 年碳储量逐渐下降,2000 年达到最

小值.2000~2010 年碳储量又大幅上升,2010 年碳储量则达到最大值.2010~2020 年碳储量又略有下降.不同类型生态系统碳储量差异较大,草地、湿地和林地碳储量分别约占区域生态系统碳储量的 50.39%、36.43%和 12.30%,合计为 99.12%,是该区域的主要储碳生态系统类型.其他生态系统类型碳储量均占比很小,如未利用土地(0.56%)、耕地(0.31%)和建设用地(0.01%).

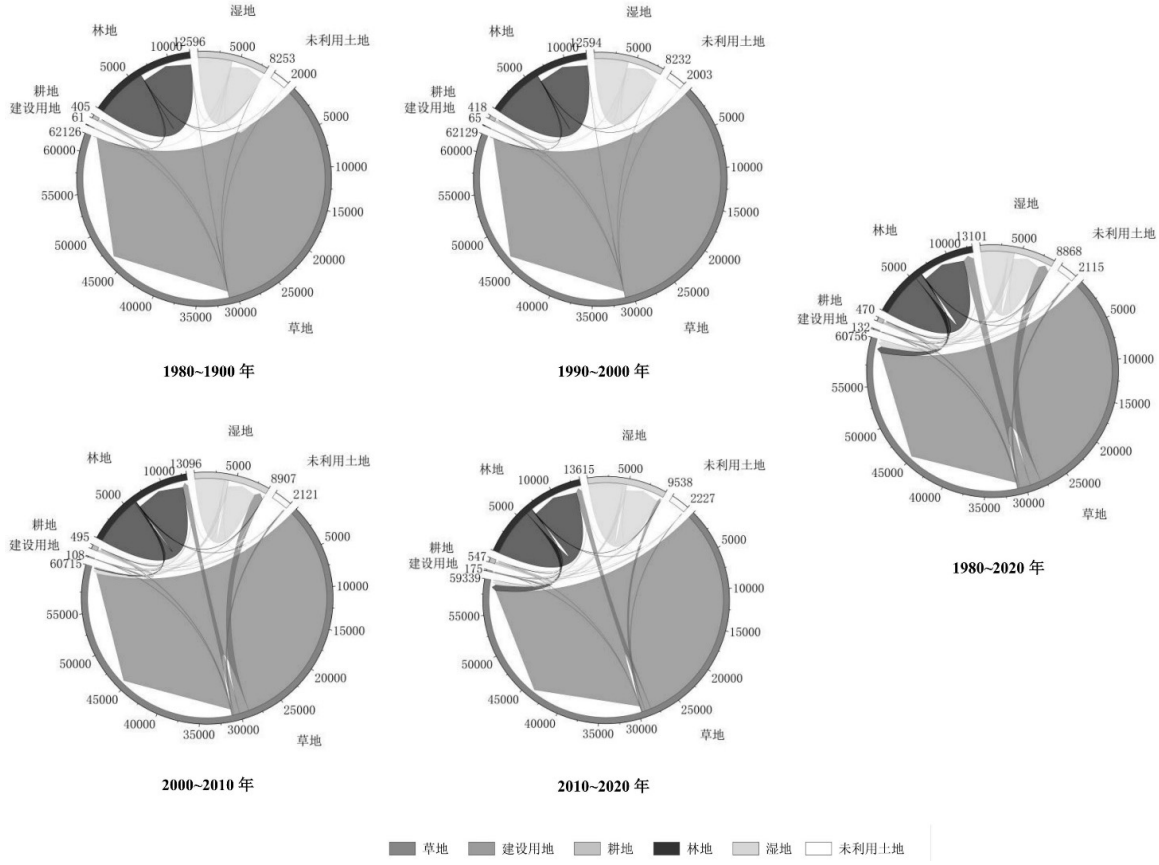


图 3 1980~2020 年各时段若尔盖高原土地利用转移矩阵弦图

Fig.3 Chord plot of land use transfer matrix in the Zoige Plateau during different periods from 1980 to 2020

表 5 1980~2030 年若尔盖高原生态系统碳储量

Table 5 Ecosystem carbon storage of the Zoige Plateau from 1980 to 2030

土地利用类型		1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年		
							Q1	Q2	Q3
耕地	碳储量(亿 t)	0.0307	0.0307	0.0326	0.0424	0.0405	0.0390	0.0392	0.0386
	占比(%)	0.25	0.25	0.26	0.33	0.31	0.30	0.30	0.30
林地	碳储量(亿 t)	1.4612	1.4641	1.4608	1.5806	1.5814	1.5823	1.5830	1.5469
	占比(%)	11.77	11.79	11.78	12.24	12.30	12.35	12.27	12.14
草地	碳储量(亿 t)	6.7791	6.7785	6.7797	6.4699	6.4794	6.4883	6.4716	6.5387
	占比(%)	54.59	54.60	54.68	50.12	50.39	50.64	50.17	51.32
湿地	碳储量(亿 t)	4.0817	4.0765	4.0607	4.7440	4.6845	4.6318	4.7342	4.5467
	占比(%)	32.87	32.84	32.75	36.75	36.43	36.15	36.70	35.68
建设用地	碳储量(亿 t)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	占比(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用土地	碳储量(亿 t)	0.0650	0.0647	0.0652	0.0723	0.0721	0.0720	0.0714	0.0711
	占比(%)	0.52	0.52	0.53	0.56	0.56	0.56	0.55	0.56
合计	碳储量(亿 t)	12.4176	12.4145	12.3992	12.9091	12.8580	12.8134	12.8994	12.7420

对 1980 年和 2020 年两个时期的碳储量分布进行栅格减法运算,将碳储量变化分为增加、不变

和减少三类区域(图 4).若尔盖高原生态系统碳储量空间分布特征是中部的湿地集中分布区碳储量较高,面积较小的耕地及分散的建设用地区域碳储量较低.与 1980 年相比,2020 年若尔盖高原生态系统碳储量增加的区域主要在若尔盖县、玛曲县和红原县的湿地集中区,草地转换为湿地是碳储量增加的主要原因.碳储量减少的区域主要在阿坝县西北角,其原因是 2000 年后该区域有较大面积草地转换成未利用土地;若尔盖县中部、红原县北部和南部也出现碳储量减少,主要原因是湿地的转出,或者林地转换为耕地、草地转换为建设用地等.

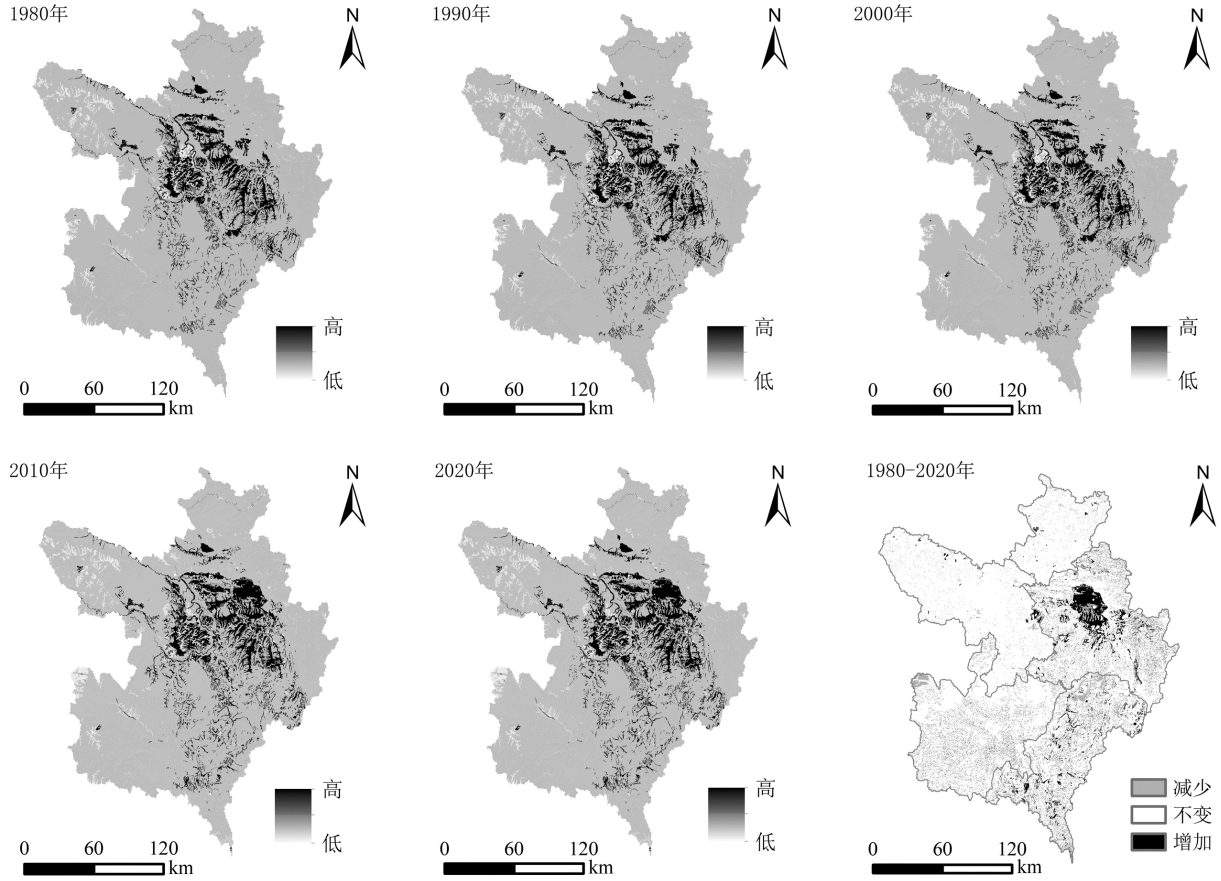


图 4　1980~2020 年若尔盖高原碳储量空间分布及其变化

Fig.4　Spatial distribution and changes of carbon storage in the Zoige Plateau from 1980 to 2020

2.2.2　2030 年不同情景生态系统碳储量预测　基于 PLUS 模型模拟的土地利用数据,利用 InVSET 模型计算 2030 年 3 种情景下若尔盖高原生态系统碳储量(表 5),绘制碳储量变化(图 5).

自然发展情景下,2030 年若尔盖高原生态系统碳储量预测值为 12.81 亿 t,与 2020 年相比减少 445.67 万 t,减少 40.35%.空间分布方面,2030 年自然发展情景下若尔盖高原生态系统碳储量空间分布特征与 2020 年基本一致,各地区的碳储量增减变动基本保持不变.从土地利用类型转换导致的生态系统碳储量变化来看,有 55.52km^2 的湿地转换为其他土地利用类型,导致碳储量减少了 460.08 万 t,这是自然发展情景下若尔盖高原生态系统碳储量减少的主要原因.建设用地和未利用土地向其他土地利用类型的转变是碳储量增加的来源,但由于二者面积占比较小,面积变动所导致的碳储量变化也较小.

生态恢复情景下,2030 年若尔盖高原生态系统碳储量预测值为 12.90 亿 t,与 2020 年相比增加 414.43 万 t,增幅为 0.32%.相较于自然发展情景,生态恢复情景下的碳储量增加了 860.10 万 t,主要原因是该情景下生态用地尤其是林地和湿地的面积发生了较大改变.一方面,其他土地利用类型向林地和湿地转移的规模增大;另一方面,控制了林地和湿地向其他低碳密度土地利用类型的转移,森林植被和泥炭沼泽碳库得以保

存,产生了明显的生态效应.空间分布方面,碳储量增加区域在原高储碳区的基础上向外扩散,且若尔盖县和红原县的碳储量增加区域较多,碌曲县较少.各土地利用类型的转移对碳储量的影响整体上均表现为增加.其中,有 26.91km^2 草地转换为湿地,增加 207.25 万 t 碳储量,是草地转出引起碳储量增加的主要来源,也是生态恢复情景下若尔盖高原碳储量增量的主要来源,占碳储量总增加值的比重超过 50%.

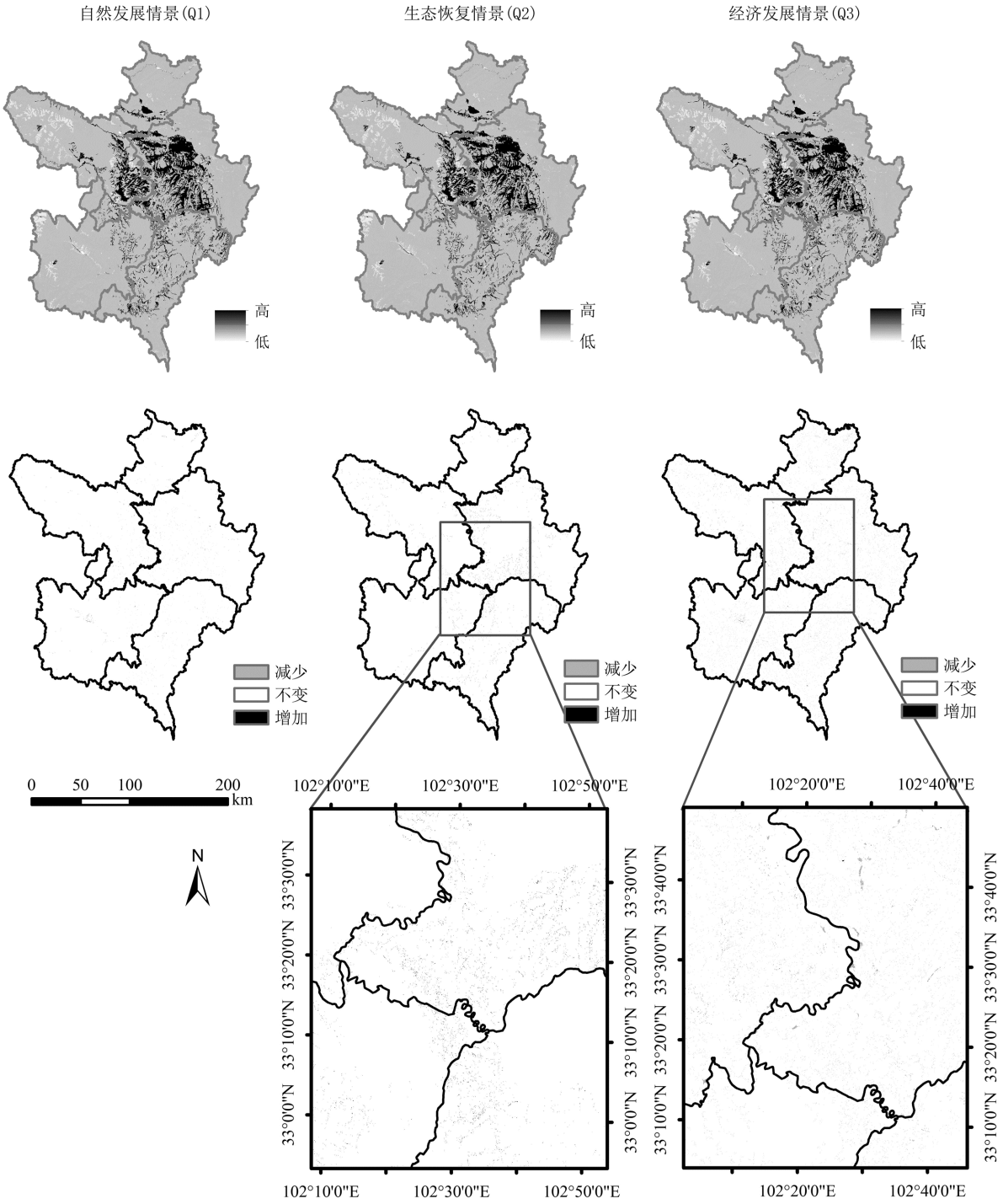


图 5 2030 年不同情景下若尔盖高原碳储量空间分布及其变化

Fig.5 Spatial distribution and changes of carbon storage in the Zoige Plateau under different scenarios in 2030

经济发展情景下,2030 年若尔盖高原生态系统碳储量预测值为 12.74 亿 t,与 2020 年相比减少 1159.58 万 t,减少 0.90%.该情景下的生态系统碳储量比自然发展情景低 713.92 万 t,与 2020 年相

比的减少量也更大,主要原因是生态用地面积发生了较大改变,大面积林地和湿地转换为碳密度更低的草地,同时湿地向建设用地转换造成的碳储量减少也较为显著.空间分布方面,若尔盖高原5 县均出现碳储量减少区且分布广泛,其中玛曲县和若尔盖县及其交界出现几处明显的减少集中区.绝大部分土地利用类型转变都导致了碳储量减少.有 142.70km^2 的湿地转为其他土地利用类型,导致碳储量减少了 1186.80 万 t,这是经济发展情景下若尔盖高原生态系统碳储量减少的主要原因.

2.3　若尔盖高原生态系统碳储量驱动因素分析

2.3.1　单因子探测　以 2020 年为研究年份,将若尔盖高原生态系统碳储量设为因变量 Y,选取 11 个自变量 X 探究若尔盖高原生态系统碳储量的驱动因素,包括表征自然因素的高程、坡度、坡向、年平均气温、年平均降水、年平均蒸散发、土壤类型及植被覆盖度(NDVI),以及表征社会经济因素的 GDP、人口密度及放牧强度.单因子探测结果显示(表 6),除坡向(X_3)在 5%水平(P=0.028)显著外,其余因子均通过了 1%水平的显著性检验,且不同驱动因素对碳储量变化的解释力存在显著差异.2020 年碳储量驱动因素影响力大小依次为:高程(0.1676)>年平均气温(0.1658)>土壤类型(0.1485)>坡度(0.1400)>年平均蒸散发(0.0923)>年平均降水(0.0678)>人口密度(0.0610)>GDP(0.0186)>放牧强度(0.0157)>NDVI(0.0121)>坡向(0.0016).可见,高程对若尔盖高原生态系统碳储量的影响程度最大,其次是年平均气温、土壤类型和坡度,四者的解释度均大于 0.1,为核心影响因素;其余因素的解释度均小于 0.1,为次级影响因素[2].由单因子探测结果可以看出,若尔盖高原生态系统碳储量空间分布的驱动因素以自然因素为主.

2.3.2　交互作用探测　影响碳储量空间分布的驱动因素并不是简单的线性叠加效应,而应该全面考虑多种因素之间的交互影响,分析各因素间的共同作用,以及它们之间的相互影响与协同效应[59].根据交互作用探测结果(图 6),任意两个驱动因素间的交互作用均大于单个驱动因素的影响,两两驱动因素之间交互作用主要表现为双因子增强和非线性增强,说明若尔盖高原碳储量空间分异是不同驱动因素共同作用的结果.其中,土壤类型(X_7)与坡度(X_2)交互解释力最大,为 0.2489;之后按解释力排序依次为土壤类型(X_7)与高程(X_1),为 0.2441;土壤类型(X_7)与年平均气温(X_4),为 0.2381;年平均降水(X_5)与年平均气温(X_4),为 0.2362;年平均气温(X_4)与坡度(X_2),为 0.2338.其余交互作用中,年平均气温(X_4)与高程(X_1)、人口密度(X_{10})与高程(X_1)、年平均降水(X_5)与高程(X_1)、土壤类型(X_7)与年平均降水(X_5)等 11 组交互因素的解释力均超过 0.2,呈双因子增强和非线性增强效果.

表 6　若尔盖高原碳储量驱动因素的单因子探测结果

Table 6　Single factor detection results of driving factors for carbon storage in the Zoige Plateau

代码	变量	q 统计量	P
X_1	高程	0.1676	0.0000
X_4	年平均气温	0.1658	0.0000
X_7	土壤类型	0.1485	0.0000
X_2	坡度	0.1400	0.0000
X_6	年平均蒸散发	0.0923	0.0000
X_5	年平均降水	0.0678	0.0000
X_{10}	人口密度	0.0610	0.0000
X_9	GDP	0.0186	0.0000
X_{11}	放牧强度	0.0157	0.0000
X_8	NDVI	0.0121	0.0000
X_3	坡度	0.0016	0.0284

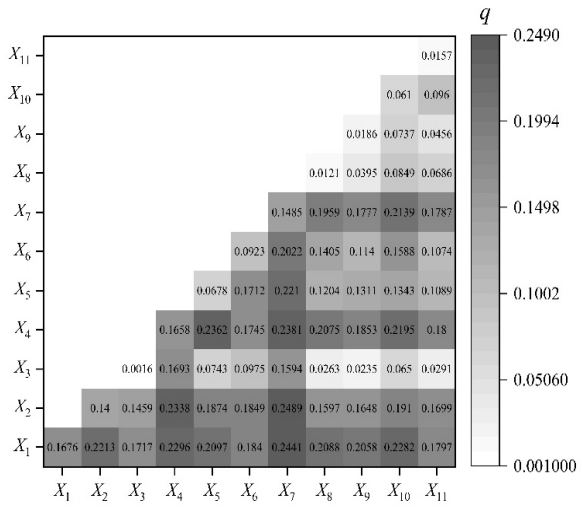


图 6　若尔盖高原碳储量驱动因素交互作用热力图

Fig.6　Thermal map of the interaction between driving factors of carbon storage in the Zoige Plateau

2.3.3　生态探测　生态探测主要用于检验不同自变量对因变量的空间分布是否存在显著差异.探测结果表明(表 7),在 55 组交互因素中,只有 11 组因素

无显著差异,说明不同驱动因素对若尔盖高原生态系统碳储量空间分异的影响存在着显著的差异.

表 7 若尔盖高原碳储量驱动因素的生态探测结果

Table 7 Ecological detection results of driving factors for carbon storage in the Zoige Plateau

因素	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1											
X_2	Y										
X_3	Y	Y									
X_4	N	Y	Y								
X_5	Y	Y	Y	Y							
X_6	Y	Y	Y	Y	Y						
X_7	N	N	Y	N	Y	Y					
X_8	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y				
X_9	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	N			
X_{10}	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y		
X_{11}	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	

注:Y表示两因素对碳储量空间分异的影响存在显著差异,N表示无显著差异.

3 讨论

3.1 土地利用变化及碳储量的响应

本文运用InVEST模型估算得到2020年若尔盖高原生态系统碳储量为 12.8580 亿 t,且碳储量对各类用地变化的敏感性差异显著.该结果与已有研究的估算结果 10.4~17.6 亿 t[35,50,60-61]较为一致.草地和湿地是若尔盖高原的主要储碳生态系统类型,二者碳储量合计约占研究区生态系统总碳储量的87.20%.高寒湿地在长期淹水和低温的环境条件下,微生物活动受抑制,形成厚度不一的泥炭层[62].由于湿地的碳密度较高,尽管若尔盖高原湿地面积只有草地的 15%左右,其生态系统碳储量却达到草地的65%.若尔盖高原泥炭地占我国泥炭地面积约44.1%[37,63],泥炭地作为陆地生态系统的重要碳汇,以 3%的陆地面积储存了约全球三分之一的土壤有机碳[35].因此,保护泥炭地对维持全球碳平衡具有重要意义.

通过分析土地利用类型转换对碳储量的影响,发现草地、林地和湿地之间的转换也是引起若尔盖高原生态系统碳储量大幅变化的主要原因.1980~2020 年若尔盖高原生态系统碳储量增加 4403.42 万 t,主要原因是湿地面积大幅增加.在这一时期,湿地面积增加了 609.85km^2.自 1992 年中国加入《湿地公约》以来,国家和地方出台了一系列湿地保护法律制度和政策文件,在若尔盖高原建立了若尔盖、日干乔、喀哈尔乔等多个湿地自然保护区,实施了《全国湿地保护工程规划》,大力开展湿地保护和修复,使得近年来若尔盖高原生态系统碳储量呈增加趋势.

根据 2030 年 3 种不同情景的若尔盖高原生态系统碳储量模拟结果,自然发展情景下,碳储量的分布和各土地利用类型的碳储量与 2020 年相比变化不大.生态保护情景可以有效地遏制建设用地扩张速度,在保护林地、草地、湿地的同时,有助于进一步改善研究区脆弱的生态环境,该情景具有最强的固碳能力.经济发展情景下,生态用地面积减少,碳储量增幅也明显降低,这与已有研究得出经济社会发展导致生态系统碳储量减少的结论一致[64].在制定国土空间规划时,应当考虑区域差异性,针对生态用地集中分布的高碳储量区域实施较为严格的保护,限制土地开发活动;在碳储量较低但恢复潜力大的区域(如分散的和退化的湿地区)推动生态修复.

3.2 碳储量空间分异的驱动因素

若尔盖高原碳储量时空分异驱动因子探测结果表明,高程、年平均气温、土壤类型和坡度等自然因素是若尔盖高原碳储量空间变化的主要驱动因素.地形和气候对碳储量的显著影响在已有研究已得到较多验证[65-66],由于若尔盖高原海拔高,气温低,冷湿的气候条件下植物有机残体不易分解,十分有利于碳的累积[67].

根据地理探测器结果,相较于自然因素,人口密度、GDP 和放牧强度等社会经济因素对若尔盖高原生态系统碳储量的解释力相对较弱,与孙梅玲[50]的研究成果较为吻合.但已有研究表明,放牧直接影响

植被生产力、群落结构和土壤理化性质,间接影响土地利用方式及生态系统碳循环过程,过度放牧降低了植被总生物量及土壤碳氮养分含量,不利于典型草原生态系统碳平衡的维持和碳汇的增加[68].若尔盖高原上世纪 70 年代为发展畜牧业而进行的大规模开沟排水导致沼泽湿地面积在短时间内大幅下降[69].湿地面积的减少导致较为显著的碳储量损失.因此,在探究影响若尔盖高原生态系统碳储量的社会经济因素时,应考虑放牧的直接和间接影响.

3.3　不确定性分析

首先,由于缺乏高空间密度、高时效性和统一标准的碳密度调查数据,本文所采用的若尔盖高原土地利用碳密度数据引用了已有研究的成果,由于研究数据有限,且不同文献所给出的数据存在较大差异,因此对 2030 年碳储量的预测值可能与实际情况存在差距;其次,由于数据可得性的限制,本文将同一土地利用类型的碳密度简化为固定值进行 InVEST 模型估算,未考虑不同植物群落类型间及同一类型不同覆盖度的空间异质性及其动态变化,可能导致碳储量估算结果的不确定性;再次,土地利用变化以及生态系统碳储量区域差异均会受到政策因素影响[2,4],考虑到相关因素难以量化表达,本研究未将其考虑在内.未来仍需加强高精度、统一标准的碳密度动态监测,构建碳储量长期时空数据集.此外,未来研究可进一步量化并将政策因素引入碳储量预测及驱动因素分析过程,以提升估算准确性.

4　结论

4.1　若尔盖高原主要土地利用类型是草地、林地和湿地,三者合计面积占若尔盖高原总面积的 96.53%.1980~2020 年,草地面积减少了 1373.18km^2;湿地和林地面积分别增加了 609.85km^2 和 517.87km^2.1980~2020 年,转出和转入面积从高到低依次为草地、林地和湿地.40a 间,若尔盖高原土地利用大幅变动主要发生在 2000~2010 年间.

4.2　1980~2020 年若尔盖高原生态系统碳储量在 12.40~12.91 亿 t 之间,草地和湿地生态系统碳储量占区域总碳储量的 87.00%,是主要的储碳生态系统类型.空间分布上,高原中部湿地集中区碳储量较高,40a 间碳储量增加的区域主要在若尔盖县、玛曲县和红原县的湿地集中区.

4.3　2030 年在 3 种发展情景下,与 2020 年相比,自然发展情景下生态系统碳储量减少 445.67 万 t,生态恢复情景下碳储量增加 414.43 万 t,经济发展情景下碳储量减少 1159.58 万 t.生态恢复情景通过对自然保护区及其他土地利用类型间的转换进行限制,保障了生态用地面积的稳定性,具有最强的固碳能力;而经济发展情景下,建设用地扩张和畜牧业发展会导致碳储量减少.

4.4　不同驱动因素对碳储量空间分异的影响存在显著性的差异.若尔盖高原生态系统碳储量的空间分异主要受自然因素作用,高程(0.1676)、年平均气温、(0.1658)、土壤类型(0.1485)和坡度(0.1400)是主要驱动因素.不同驱动因素的交互作用呈双因子增强和非线性增强,且通常比单一因素对储量的影响更为显著,其中土壤类型与坡度的交互作用影响最大.

参考文献:

[1] 周文昌,崔丽娟,王义飞,等.若尔盖高原沼泽湿地 CO_2 排放时空变化特征 [J]. 生态学报, 2021,41(7):2652-2662.
Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, et al. Temporal and spatial variability of ecosystems CO_2 emissions in the Zoigê Plateau marsh [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(7):2652-2662.

[2] 刘　康,张　寒,张道军,等.黄土高原生态系统碳储量情景模拟与驱动因素——基于 PLUS-InVEST-Geodector 模型的研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2159-2170.
Liu K, Zhang H, Zhang D J, et al. Scenario simulation and driving factors of ecosystem carbon storage in the Loess Plateau: A study based on the PLUS-InVEST-Geodector model [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2159-2170.

[3] Shen G, Yang X, Jin Y, et al. Land use changes in the Zoige Plateau based on the object-oriented method and their effects on landscape patterns [J]. Remote Sensing, 2019,12(1):14.

[4] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例 [J]. 地理学报, 2019,74(3):446-459.
Zhu W B, Zhang J J, Cui Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(3):446-459.

[5] Luo Y Y, Zhang L T, Zhang H. New method for construction land prediction incorporating Genetic Algorithm and Support Vector Machines [J]. Advanced Materials Research, 2011,383-390:1629-1634.

[6] 郭　斌,张　莉,文　雯,等.基于 CA-Markov 模型的黄土高原南部地区土地利用动态模拟 [J]. 干旱区资源与环境, 2014,28(12):14-18.
Guo B, Zhang L, Wen W, et al. Simulation of landscape pattern dynamic in the south region of Loess Plateau based on CA-Markov model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12):14-18.

[7] 徐嘉兴,李　钢,陈国良.基于 logistic 回归模型的矿区土地利用演变

驱动力分析 [J]. 农业工程学报, 2012,28(20):247-255.
Xu J X, Li G, Chen G L. Driving force analysis of land use change based on Logistic regression model in mining area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012,28(20):247-255.

[8] 胡烨婷,李天宏.基于SD-CA模型的快速城市化地区土地利用空间格局变化预测 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022,58(2):372-382.
Hu Y T, Li T H. Forecasting spatial pattern of land use change in rapidly urbanized regions based on SD-CA model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022,58(2):372-382.

[9] 凯吾沙·塔依尔,黎 华,古丽米热·艾尔肯,等.FLUS与灰色预测模型支持下的乌鲁木齐地区碳排放时空演变与预测 [J]. 水土保持学报, 2023,37(4):214-226.
Tayier K, Li H, Aierken G, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon emissions in Urumqi region based on FLUS and Grey Prediction model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):214-226.

[10] 井长青,张永福,杨晓东.耦合神经网络与元胞自动机的城市土地利用动态演化模型 [J]. 干旱区研究, 2010,27(6):854-860.
Jing C Q, Zhang Y F, Yang X D. Approach of dynamic evolution model of urban land use based on the integration of ANN and CA [J]. Arid Zone Research, 2010,27(6):854-860.

[11] 孙玮健,张荣群,艾 东,等.基于元胞自动机模型的土地利用情景模拟与驱动力分析 [J]. 农业机械学报, 2017,48(S1):254-261.
Sun W J, Zhang R Q, Ai D, et al. Driving force analysis and scenarios simulation of land use based on Cell Automata model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017,48(S1):254-261.

[12] 顾汉龙,马天骏,钱凤魁,等.基于CLUE-S模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析 [J]. 农业工程学报, 2022,38(9):288-296.
Gu H L, Ma T J, Qian F K, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022,38(9):288-296.

[13] Hou X Y, Song B Y, Zhang X Y, et al. Multi-scenario simulation and spatial-temporal analysis of LUCC in China's coastal zone based on coupled SD-FLUS model [J]. Chinese Geographical Science. 2024,34(4):579-598.

[14] 邵 壮,陈 然,赵 晶,等.基于FLUS与InVEST模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测 [J]. 生态学报, 2022,42(23):9456-9469.
Shao Z, Chen R, Zhao J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beiing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(23):9456-9469.

[15] 孙冰清.黄河流域陆地生态系统碳储量变化机制及预测研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院, 2023.
Sun B Q. Change mechanism and prediction of terrestrial ecosystems carbon storage in the Yellow River Basin [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2023.

[16] 伍 丹,朱康文,张 晟,等.基于PLUS模型和InVEST模型的成渝经济区碳储量演化分析 [J]. 三峡生态环境监测, 2022,7(2):85-96.
Wu D, Zhu K W, Zhang S, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2022,7(2):85-96.

[17] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. Computers Environment and Urban Systems, 2021,85,101569.

[18] 林 彤,杨木壮,吴大放,等.基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及预测——以广东省为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4827-4839.
Lin T, Yang M Z, Wu D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model- A case study in Guangdong [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4827-4839.

[19] 武爱彬,陈辅国,赵艳霞,等.京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响 [J]. 环境科学, 2024,45(5):2828-2839.
Wu A B, Chen F G, Zhao Y X, et al. Multi-scenario simulation of construction land expansion and its impact on ecosystem carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Environmental Science, 2024,45(5):2828-2839.

[20] 王怀毅,李忠魁.基于LUCC的渭河流域生态系统碳储量动态变化及脆弱性分析 [J]. 水土保持研究, 2024,31(6):252-260,270.
Wang H Y, Li Z K. Dynamic changes and vulnerability analysis of carbon storage in the Weihe river basin ecosystem based on LUCC [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):252-260,270.

[21] 赵苗苗,赵 娜,刘 羽,等.森林碳计量方法研究进展 [J]. 生态学报, 2019,39(11):3797-3807.
Zhao M M, Zhao N, Liu Y, et al. An overview of forest carbon measurement methods [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(11):3797-3807.

[22] Grabska E, Hostert P, Pflugmacher D, et al. Forest stand species mapping using the Sentinel-2time series [J]. Remote Sensing, 2019,11(10).

[23] 吴皓晴,刘子刚.吉林省生态系统碳储量影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1706-1717.
Wu H Q, Liu Z G. Influencing factors of ecosystem carbon storage in Jilin Province [J]. China Environmental Scicence, 2024,44(3):1706-1717.

[24] 杨元合,石 岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献 [J]. 中国科学:生命科学, 2022,52(4):534-574.
Yang Y, Shi Y, Sun W, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. Scientia Sinica (Vitae), 2022,52(4):534-574.

[25] Bagstad K J, Semmens D J, Waage S, et al. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation [J]. Ecosystem Services, 2013.

[26] 高述超,陈毅青,陈宗铸,等.海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征 [J]. 生态学报, 2023,43(9):3558-3570.
Gao S C, Chen Y Q, Chen Z Z, et al. Carbon storage and its spatial distribution characteristics of forest ecosystems in Hainan Island, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3558-3570.

[27] 何青松,蒋 旭.耕地占补面积时空变化对碳储量的影响测度——以湖北省为例 [J]. 生态学报, 2023,43(24):10413-10429.
He Q S, Jiang X. Measuring impacts of temporal and spatial changes of cultivated land on carbon storage: A case study of Hubei Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(24):10413-10429.

[28] 朱明凤,赵克飞,邵 铮,等.基于InVEST模型的粤港澳大湾区湿地碳储量时空变化分析 [J]. 环境科学, 2025,46(4):1964-1973.

Zhu M F, Zhao K F, Shao Z, et al. Spatio-temporal analysis of carbon sequestration of wetlands in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area based on the InVEST model [J]. Environmental Science, 2025,46(4):1964-1973.

[29] 辛培源,田　甜,张美露,等.基于 InVEST 模型和地理探测器的吉林省生境质量变化及驱动因素评估 [J]. 应用生态学报, 2024,35(10): 2853-2860.
Xin P Y, Tian T, Zhang M L, et al. Assessment of habitat quality changes and driving factors in Jilin Province based on InVEST model and geodetector [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(10): 2853-2860.

[30] 张　舟,刘晶晶,张　权,等.基于 PLUS-InVEST-Geodector 模型的苏州市碳储量时空变化及驱动力分析 [J]. 环境科学, 2025,46(5): 2963-2975.
Zhang Z, Liu J J, Zhang Q, et al. Analysis of spatial-temporal variation and driving forces of carbon storage in Suzhou City based on the PLUS-InVEST-Geodector Model [J]. Environmental Science, 2025,46(5):2963-2975.

[31] 陈俊辰,贺淑钰,薛　晶,等.多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置的响应——以湖北省为例 [J]. 生态学报, 2023:43(12): 4835-46.
Chen J C, He S Y, Xue J, et al. Exploring ecosystem service trade-offs and their response to landscape configuration at multi-scales: a case study of Hubei Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(12):4835-4846.

[32] 衣鹏慧,吴会峰,胡保安,等.黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素 [J]. 生态学报, 2023,43(24):10054-64.
Yi P H, Wu H F, Hu B A, et al. Variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon storage after returning farmland to forest on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(24):10054-10064.

[33] 张　爽,高启晨,张　戎,等.基于 PLUS-InVEST 模型碳储量时空演变及驱动因素分析——以纳帕海流域为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(9):5192-5201.
Zhang S, Gao Q C, Zhang R, et al. Evaluating the changes and driving factors of carbon storage using the PLUS-InVEST Model: A case study of Napa Sea Basin [J]. China Environmental Science, 2024,44 (9):5192-5201.

[34] 周文昌,崔丽娟,王义飞,等.若尔盖高原退化湿地土壤有机碳储量 [J]. 水土保持研究, 2017,24(5):27-32.
Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, et al. Soil organic carbon storage in the degraded wetlands in Zoige Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(5):27-32.

[35] 刘利娟,刘欣蔚,鞠佩君,等.15000 年以来若尔盖高原泥炭地发育及其碳动态 [J]. 生态学报, 2018,38(18):6493-501.
Liu L J, Liu X W, Ju P J, et al. Peatland development and carbon dynamics histories of Zoige peatlands for 15000 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(18):6493-6501.

[36] 周文昌,索郎夺尔基,崔丽娟,等.排水对若尔盖高原泥炭地土壤有机碳储量的影响 [J]. 生态学报, 2016,36(8):2123-2132.
Zhou W C, Sudlang D E J, Cui L J, et al. Effects of drainage on soil organic carbon stock in the Zoige peatlands, eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(8):2123-2132.

[37] 周文昌.人类活动对若尔盖高原泥炭地碳通量和碳储量的影响 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2015.
Zhou W C. Effects of human activities on carbon fluxes and storage in the Zoige peatland of the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.

[38] 夏　敏,王　行,刘振亚,等.四川若尔盖高原 3 种湿地生态系统的碳储量及碳汇价值 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(3):392-398.
Xia M, Wang X, Liu Z Y, et al. Carbon stock and its value for 3types of wetland ecosystems on Zoige Plateau, Sichuan Province [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020,49(3):392-398.

[39] 周文昌,崔丽娟,王义飞,等.若尔盖高原泥炭地生态系统碳储量 [J]. 生态学杂志, 2016,35(8):1981-1987.
Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, et al. Carbon storage of the peatland ecosystems in Zoige Plateau, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(8):1981-1987.

[40] 王长科,王跃思,张安定,等.若尔盖高原湿地资源及其保护对策 [J]. 水土保持通报, 2001,20(5):20-22.
Wang Z K, Wang Y S, Zhang A D, et al. Wetland resources and its protection in Zoige Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,20(5):20-22.

[41] 郭　洁,李国平.若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响 [J]. 高原气象, 2007,26(2):422-428.
Guo J, Li G P. Climate change in Zoige Plateau marsh wetland and its impact on wetland degradation [J]. Plateau Meteorology, 2007,26(2): 422-428.

[42] 白军红,欧阳华,崔保山,等.近 40 年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化 [J]. 生态学报, 2008,28(5):2245-2252.
Bai J H, Ou Y H, Cui B S, et al. Changes in landscape pattern of alpine wetlands on the Zoige Plateau in the past four decades [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(5):2245-2252.

[43] 周文强,韩　宇,王金龙,等.洞庭湖流域碳储量的时空异质性及驱动力分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1851-1862.
Zhou W Q, Han Y, Wang J L, et al. Spatiotemporal heterogeneity and driving forces of carbon storage in the Dongting Lake Basin [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1851-1862.

[44] 许澳康,胡梦珺,石　晶,等.石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3365-3375.
Xu A K, Hu M J, Shi J, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem carbon storages and multi-scenario simulation in the Shiyang River basin [J]. China Environmental Science, 2024,44(6): 3365-3375.

[45] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends [J]. Ecology, 1989,70.

[46] Alam S, Starr M, Clark B. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013,89:67-76.

[47] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. Nature, 2000,404(6780):858-861.

[48] 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等.森林地下碳分配(TBCA)研究进展 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2007,2(1):34-42.
Chen G, Yang Y, Liu L, et al. Research review on total belowground

carbon allocation in forest ecosystems [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2007,2(1):34−42.

[49] 李若玮,叶冲冲,王 毅,等.基于 InVEST 模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析 [J]. 草地学报, 2021,29(S1):43−51.
Li R W, Ye C C, Wang Y, et al. Carbon storage estimation and its driving force analysis based on InVEST model in the Tibetan Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021,29(S1):43−51.

[50] 孙梅玲.若尔盖高原生态系统服务时空特征及其权衡与协同关系 [D]. 四川:西南民族大学, 2023.
Sun M L. Spatial−temporal characteristics of ecosystem services and its trade−off and synergy relationships on the Zoige Plateau [D]. Sichuan: Southwest Minzu University, 2023.

[51] 徐 丽,何念鹏,于贵瑞.2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集 [J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2019,4(1):90−96.
Xu L, He N, Yu G. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s) [J]. China Scientific Data, 2019,4(1):90−96.

[52] 赵双红,周冬梅,王得梅,等.基于 PLUS−InVEST 模型的渭河流域生态系统碳储量评估及多情景预测 [J]. 应用生态学报, 2024,35(8):2044−2054.
Zhao S H, Zhou D M, Wang D M, et al. Ecosystem carbon storage assessment and multi−scenario prediction in the Weihe River Basin based on PLUS−InVEST model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(8):2044−2054.

[53] 胡佶熹,勒先文,王卫林,等.基于 PLUS−InVEST 模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测 [J]. 环境科学, 2024,45(6):3284−3296.
Hu J X, Le X W, Wang W L, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiangxi Province based on PLUS−InVEST model [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3284−3296.

[54] Lin W, Sun Y, Nijhuis S, et al. Scenario−based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land−use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study [J]. Science of The Total Environment, 2020,739:139899.

[55] 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 prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116−134.

[56] 杨丽萍,张 静,贡恩军,等.GEE 联合多源数据的西安市土地利用时空格局及驱动力分析 [J]. 农业工程学报, 2022,38(2):279−288.
Yang L P, Zhang J, Gong E J, et al. Analysis of spatio−temporal land−use patterns and the driving forces in Xi'an City using GEE and multi−source data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022,38(2):279−288.

[57] 陈雪玲,孙梅玲,吕一河,等.青藏东缘若尔盖高原土地利用时空变化特征及其驱动因素分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2023,39(3):306−315.
Chen X L, Sun M L, Lu Y H, et al. Spatial−temporal variability characteristics and its driving factors of land use in Zoige Plateau on the eastern edge of Qinghai−Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(3):306−315.

[58] 刘 坤,高 凡,吴 彬,等.2000~2020 年昌吉州东部平原区地下水位埋深对土地利用及干旱时空演变的动态响应 [J]. 水土保持学报, 2022,36(5):150−159.
Liu K, Gao F, Wu B, et al. Dynamic response of groundwater depth to land use and temporal spatial evolution of drought in the eastern plains of Changji Prefecture from 2000 to 2020 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(5):150−159.

[59] 唐文睿,曹玉红.基于 InVEST−PLUS 模型的皖江流域碳储量时空演变及预测 [J]. 环境科学, 2025,46(6):3818−3829.
Tang W R, Cao Y H. Spatial−temporal evolution and prediction of carbon reserves in Wanjiang River Basin with the InVEST−PLUS model [J]. Environmental Science, 2025,46(6):3818−3829.

[60] Liu X, Chen H, Zhu Q, et al. Holocene peatland development and carbon stock of Zoige peatlands, Tibetan Plateau: a modeling approach [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018,18(5):2032−2043.

[61] Wang M, Chen H, Wu N, et al. Carbon dynamics of peatlands in China during the Holocene [J]. Quaternary Science Reviews, 2014,99(9):34−41.

[62] Strack M, Davidson SJ, Hirano T, et al. The potential of peatlands as nature−based climate solutions [J]. Current Climate Change Reports, 2022,8(3):71−82.

[63] 尹善春.中国泥炭资源及其开发利用 [M]. 北京:地质出版社, 1991,185.
Yin S C. Peat resources and their development and utilization in China [M]. Beijing: Geology Press, 1991,185.

[64] 张 梅,杨雨霏,黄贤金,等.新常态下中国城镇建设用地扩张演变的碳效应及其驱动因素研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(10):2212−2224.
Zhang M, Yang Y F, Huang X J, et al. Carbon effects and driving factors of urban construction land expansion in China under the new normal [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(10):2212−2224.

[65] 曾庆雨,孙才志.黄河流域陆地生态系统碳储量测算及其影响因素 [J]. 生态学报, 2024,44(13):5476−5493.
Zeng Q Y, Sun C Z. Estimation and influencing factors of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(13):5476−5493.

[66] Xiang M S, Wang C J, Tan Y X, et al. Spatio−temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Western Sichuan Plateau [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):8114.

[67] 高俊琴,欧阳华,张 锋,等.若尔盖高寒湿地表层土壤有机碳空间分布特征 [J]. 生态环境, 2007,16(6):1723−1727.
Gao J Q, Ouyang H, Zhang F, et al. Characteristics of spatial distribution of soil organic carbon in Zoige wetland [J]. Ecology and Environment, 2007,16(6):1723−1727.

[68] 陈 涛,武会会,耿润哲.放牧对中国天然草地土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 [J]. 草地学报, 2024,32(12):3924−3931.
Chen T, Wu H H, Geng R Z. Meta−analysis of the effects of grazing on soil organic carbon content in natural grasslands of China [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024,32(12):3924−3931.

[69] 白军红,欧阳华,王庆改,等.大规模排水前后若尔盖高原湿地景观格局特征变化 [J]. 农业工程学报, 2009,25(S1):64−68.
Bai J H, Ouyang H, Wang Q G, et al. Changes in landscape patterns of alpine wetlands on Roige plateau before and after drainage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009,25(S1): 64−68.

作者简介：孟姝含(2001−),女,江苏徐州人,中国人民大学硕士研究生,主要从事自然资源管理研究.xsyfxmsh@163.com.