

Land Use Change and Driving Force Analysis in Xizang Based on the PLUS Model

Yujie Ma Weiyi Wang Jinyuan Yu*

School of Ecological Environment, Xizang University, Lhasa, Xizang, 850000, China

Abstract

This study uses Xizang as a case to analyze the dynamic changes and driving mechanisms of land use in Xizang from 2000 to 2020 with the PLUS model. Results show : grassland, forest and unused land were the main types, accounting for over 90% of the total land area. Grassland decreased by about $27.43 \times 10^4 \text{ km}^2$, while construction land and water areas grew by $3.88 \times 10^2 \text{ km}^2$ and $2.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ respectively, with other land types showing diverse changes and significant spatiotemporal differences; The land use transition was complex, mainly between forest, grassland and unused land; Multiple factors influenced land use changes in Xizang. Natural factors dominated the expansion of farmland, forest and unused land. Grassland expansion was affected by annual precipitation, GDP and distance to railway. Elevation was the main contributor to water area expansion, and socio-economic factors limited construction land expansion.

Keywords

PLUS model; Land use; Driving factors; Xizang

基于 PLUS 模型的西藏土地利用变化及驱动力分析

马钰杰 王尉懿 于金媛*

西藏大学生态环境学院, 中国·西藏 拉萨 850000

摘要

本研究以西藏为例,借助PLUS模型,对2000-2020年间西藏土地利用的动态变化及其驱动机制进行深入剖析。结果表明:2000—2020年,西藏土地利用类型主要为草地、林地及未利用地,三者面积之和占研究区土地总面积的90%以上,在此期间草地面积缩减了约 $27.43 \times 10^4 \text{ km}^2$,建设用地和水域则持续增长,分别增加了 $3.88 \times 10^2 \text{ km}^2$ 、 $2.48 \times 10^4 \text{ km}^2$,其余地类变化趋势各异,且在时空分布上呈现出显著差异;土地利用转换复杂,主要集中在林地、草地与未利用地三大类之间;西藏地区土地利用类型的变化受到诸多因素的综合作用,耕地、林地和未利用地的扩张中自然环境因子占据主导地位;草地的扩张不仅受年平均降水的影响,还受到GDP和距铁路距离等因子的制约;水域面积扩张的主要贡献因素是高程;而建设用地的扩张主要受社会经济因子限制。

关键词

PLUS模型; 土地利用; 驱动力; 西藏

1 引言

土地资源作为人类生存与发展的根本保障,其利用方式的合理性直接影响生态环境的稳定和经济社会的持续发展。在全球范围内,土地利用和覆盖变化已成为一个不容忽视的重大议题。青藏高原作为地球上最为独特的自然地理单

元之一,被誉为“世界屋脊”和“亚洲水塔”,其生态环境对全球气候和生态平衡具有深远影响。西藏作为青藏高原的核心区域,其土地利用变化不仅关系到区域生态系统的稳定与可持续发展,还对周边地区的生态安全和社会经济发展产生重要影响。随着生态环境的变迁和人类活动的不断加剧,西藏地区的土地利用状况发生了显著变化。深入探究这些变化及其背后的驱动力,对于实现区域资源的可持续利用和生态环境的有效保护具有至关重要的意义。

目前,国内外学者在土地利用变化领域展开了广泛研究,借助多种模型揭示土地利用变化的规律。常见的模型包括元胞自动机模型(CA)、人工神经网络(ANN)、灰色预测模型(GPM)、系统动力学模型(SD)、CLUE-S模型等。然而,这些模型在实际应用中各有局限,难以全面且精准地模拟土地利用变化的复杂过程。PLUS模型以其创新机制为土地利

【项目名称】“两江四河”流域植树造林天空地遥感立体监测及生态环境效应评估模拟研究,项目编号:CGZH2023000150。

【作者简介】马钰杰(2002-),女,苗族,中国重庆人,在读本科生,从事土地利用、碳存储研究。

【通讯作者】于金媛。

用变化研究提供了新视角，该模型融合了多类型随机斑块种子的 CA 模型 (CARS) 和土地扩张分析策略 (LEAS)，不仅能深入剖析土地利用变化的内在动因，还通过随机种子生成和阈值递减机制，在区域尺度土地利用时空动态变化模拟方面展现出显著优势。

现阶段，针对西藏地区土地利用变化及驱动力分析的相关研究较少，尤其是缺乏对多类型斑块动态反演和各类驱动力因素的深入挖掘。因此，本文聚焦西藏地区，引入 PLUS 模型，结合地区实际情况，基于 2000 年、2010 年、2020 年三期土地利用数据，深入分析土地利用时空变化格局。同时，综合自然、经济等 13 项驱动力因子，深入剖析各因子对土地利用的贡献程度，为西藏地区土地资源的合理配置与可持续发展提供坚实的科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

西藏自治区位于中国西南边陲 (26°50'~36°53' N, 78°25'~99°06' E)，地处青藏高原西南部，是中国面积第二大的省级行政区，总面积达 120.223 万平方公里。其地势由西北向东南倾斜，地形复杂多样，平均海拔超过 4000 米，是世界上平均海拔最高的地区之一。独特的地理位置和复杂的地形造就了西藏复杂多样的气候类型，从高原寒带到热带

季风气候，从干旱气候到湿润气候，这种气候的多样性使得西藏在不同区域呈现出截然不同的自然景观和生态系统，为各类生物提供了丰富的生存空间，使其成为全球生物多样性保护的关键区域之一。同时，西藏地区土地利用类型多样，主要包括草原、林地、水域、耕地及未利用土地等。草原作为该地区主要的土地利用类型之一，其广阔面积为畜牧业的发展提供了坚实的基础，林地是构成国家生态安全屏障的重要组成部分，耕地资源则相对稀少且分布分散，此外，众多河流、湖泊及冰川等水域资源，在调节区域生态平衡方面发挥着关键作用。

2.2 数据源

2.2.1 土地利用数据

本文 2000 年、2010 年、2020 年三期的土地利用类型数据来源于资源与环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)，利用 ArcGIS 软件将其空间分辨率重采样为 300m × 300m，并通过重分类将其分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地六类。

2.2.2 驱动因子数据

考虑到土地利用变化会受到多重驱动因子的共同作用，基于驱动因子的可获取性、及时性和重要性的原则^[1]，本文从自然环境和社会经济条件两方面，选择了人口、GDP、高程、坡度等 13 个驱动因子，具体数据来源见表 1。

表 1 数据来源

| 数据类型 | 数据名称 | 时间 | 数据来源 |
|---------|---------|--------|--|
| 社会经济数据 | 人口 | 2020 年 | Open Spatial Demographic Data and Research (https://www.worldpop.org/) |
| | GDP | 2020 年 | 中国科学院资源环境科学数据平台 (https://www.resdc.cn/) |
| | 到铁路距离 | 2020 年 | OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/) |
| | 到高速公路距离 | 2020 年 | |
| | 到主干道距离 | 2020 年 | |
| | 到一级道路距离 | 2020 年 | |
| | 到二级道路距离 | 2020 年 | |
| 到三级道路距离 | 2020 年 | | |
| 自然环境数据 | 到水域距离 | 2020 年 | OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/) |
| | 年平均温度 | 2020 年 | 国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/) |
| | 年平均降雨 | 2020 年 | |
| | 高程 | 2020 年 | NASA SRTM (https://www.earthdata.nasa.gov/) |
| | 坡度 | 2020 年 | |

2.3 研究方法

2.3.1 土地利用转移矩阵

该矩阵不仅能够定量描述在特定时间序列中土地利用类型的数量变化，还能展现其结构特征及其变化动向。表达式为：

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式 (1) 中：n 为土地利用类型数量；i, j 分别为研究时段土地转移始末的土地利用类型 (i, j=1,2,⋯,n)； S_{ij} 为 i, j 地

类的转换面积量。

2.3.2 PLUS 模型

(1) 模型介绍。PLUS (Patch-level Land Use Simulation Model) 模型是由中国地质大学 (武汉) 高性能空间计算智能实验室在 FLUS 模型的基础上所研发出来的^[2]。该模型是一种基于栅格数据的斑块级土地利用变化预测模型，由用地扩张分析策略 (LEAS) 模块和基于多类随机斑块种子的 CA 模型 (CARS) 两大核心构成^[3]。LEAS 模块可以对 LUCC 进行采样，并使用随机森林算法来计算不同类型土地的扩展概率和驱动因子的贡献率。然后，基于 CARS 模块，

结合不同土地类型的像素值和邻域权重，可以对未来的土地利用类型进行精确模拟和预测。邻域权重是根据 2010 年至 2020 年西藏每种土地利用类型的扩展面积相对于总扩张面积的比例来确定的，计算公式如下：

$$X_i = \frac{T_{a,i} - T_{a,min}}{T_{a,max} - T_{a,min}} \quad (2)$$

式 (2) 中： X_i 为研究区某地类 i 的邻域权重参数； $T_{a,i}$ 为研究时段内该地类面积的变化量； $T_{a,max}$ 、 $T_{a,min}$ 分别为研究时段内面积的最大、最小变化量。

为了获得最优的模拟结果，对权重值分别微调为如下：耕地 0.624、林地 0.633、草地 0.765、水域 0.1、建设用地 0.516、未利用地 0.9。

(2) 模型精度验证。PLUS 软件提供了 kappa 统计工具，用于评估模拟结果和实际土地利用分布之间的一致性^[4]，精度判断标准见表 2。计算公式如下：

$$Kappa = \frac{P_a - P_c}{P_p - P_c} \quad (3)$$

式 (3) 中： P_a 为模拟正确的栅格占比； P_p 为理想状态下模拟正确比例； P_c 为随机状态下模拟正确比例。

表 2 Kappa 系数模拟效果对应表

| Kappa 系数 | 0~0.2 | 0.2~0.4 | 0.4~0.6 | 0.6~0.8 | 0.8~1 |
|----------|-------|---------|---------|---------|-------|
| 模拟效果 | 极低 | 一般 | 中等 | 较高 | 高 |

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征分析

由表 3 可知，2000—2020 年，西藏的土地利用类型以

草地、林地和未利用地为主，三者面积之和占研究区土地总面积的 90% 以上，这与陈伊多等^[5]人的研究结果相一致；其中草地占比最多，平均占比 54.22%，其次是未利用地，平均占比 26.98%；而与生产生活关系最密切的建设用地，平均占比仅为 0.02%。耕地基本上是沿着水域分布；建设用地具有明显的空间分异性，主要分布在河谷平原地区；受降水、气温等气候因素的影响，林地主要分布在藏东南地区。2000—2020 年西藏地区土地利用变化总体趋势为：草地持续减少，总计减少了 $27.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；建设用地和水域则持续增长，分别增加了 $3.88 \times 10^2 \text{ km}^2$ 、 $2.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；耕地、林地和未利用地先大幅增加后小幅度减少，分别为 $7.05 \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $15.36 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $37.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；其中，未利用地的增幅最为显著，达到了 18.38%；而草地的降幅最为明显，高达 24.14%。2000—2010 年，草地覆盖面积呈现显著下降趋势，累计减少量达 273545.28 km^2 ；2010—2020 年，水域覆盖面积变化最大，累计增量达 2324.70 km^2 。

利用 PLUS 模型中的 Makov Chain 分析西藏 2000—2020 年土地利用数据，得到了土地利用转移矩阵（表 4）。由表 4 可知，2000—2020 年，土地利用转出主要集中在林地、草地与未利用地三大类之间，其中草地向林地、未利用地转出最多，分别转换了 55249.11 km^2 、 285415.29 km^2 ；主要的转入地类依然为林地、草地及未利用地，分别占据转入面积的 13.66%、19.18% 和 57.87%。具体来看，70.81% 的耕地转入面积源自草地，23.36% 则来自林地；在建设用地的转入面积中，57.60% 来自草地，28.60% 来自耕地；转入水域的面积则一半以上源自草地，约三分之一来自未利用地。

表 3 2000—2020 年西藏土地利用面积占比

| | 2000 年 | | 2010 年 | | 2020 年 | |
|------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| | 土地利用面积 / km^2 | 占比 /% | 土地利用面积 / km^2 | 占比 /% | 土地利用面积 / km^2 | 占比 /% |
| 耕地 | 4351.32 | 0.38 | 7182.81 | 0.63 | 7048.53 | 0.62 |
| 林地 | 115421.94 | 10.13 | 153798.93 | 13.47 | 153628.29 | 13.46 |
| 草地 | 801205.56 | 70.30 | 527660.28 | 46.20 | 526954.95 | 46.16 |
| 水域 | 51404.04 | 4.51 | 73863.27 | 6.47 | 76187.97 | 6.67 |
| 建设用地 | 119.79 | 0.01 | 215.19 | 0.02 | 507.42 | 0.04 |
| 未利用地 | 167256.45 | 14.67 | 379353.24 | 33.22 | 377363.25 | 33.05 |

表 4 2000—2020 年西藏土地利用面积转移矩阵 (km^2)

| 年份 | 利用类型 | 2020 年 | | | | | | | |
|--------|------|---------|-----------|-----------|----------|--------|-----------|------------|-----------|
| | | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 | 总计 | 转出面积 |
| 2000 年 | 耕地 | 1671.03 | 828.63 | 1343.34 | 250.02 | 126.09 | 132.03 | 4351.14 | 2680.11 |
| | 林地 | 1253.7 | 82668.6 | 27611.73 | 845.64 | 22.05 | 3017.97 | 115419.69 | 32751.09 |
| | 草地 | 3799.26 | 55249.11 | 427597.92 | 28869.66 | 253.98 | 285415.29 | 801185.22 | 373587.3 |
| | 水域 | 117.81 | 1218.42 | 6689.25 | 33688.89 | 16.74 | 9665.37 | 51396.48 | 17707.59 |
| | 建设用地 | 28.98 | 4.41 | 12.78 | 4.05 | 66.33 | 3.24 | 119.79 | 53.46 |
| | 未利用地 | 165.78 | 13102.47 | 63202.95 | 12097.98 | 22.05 | 78654.24 | 167245.47 | 88591.23 |
| | 总计 | 7036.56 | 153071.64 | 526457.97 | 75756.24 | 507.24 | 376888.14 | 1139717.79 | 515370.78 |
| | 转入面积 | 5365.53 | 70403.04 | 98860.05 | 42067.35 | 440.91 | 298233.9 | 515370.78 | |

3.2 PLUS 模型精度验证

本文采用西藏 2010 年的土地利用数据作为基线，使用该模型模拟 2020 年的土地利用类型（图 1），将结果与 2020 年的实际数据进行对比，得到的 Kappa 系数为 0.97，总体精度为 0.98，说明该模型具有较高的精度，适用于本研究。

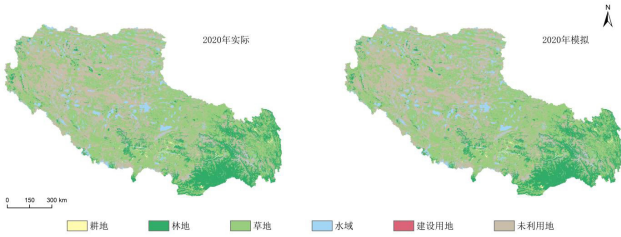


图 1 西藏 2020 年模拟与实际土地利用空间对比

3.3 土地利用变化驱动力分析

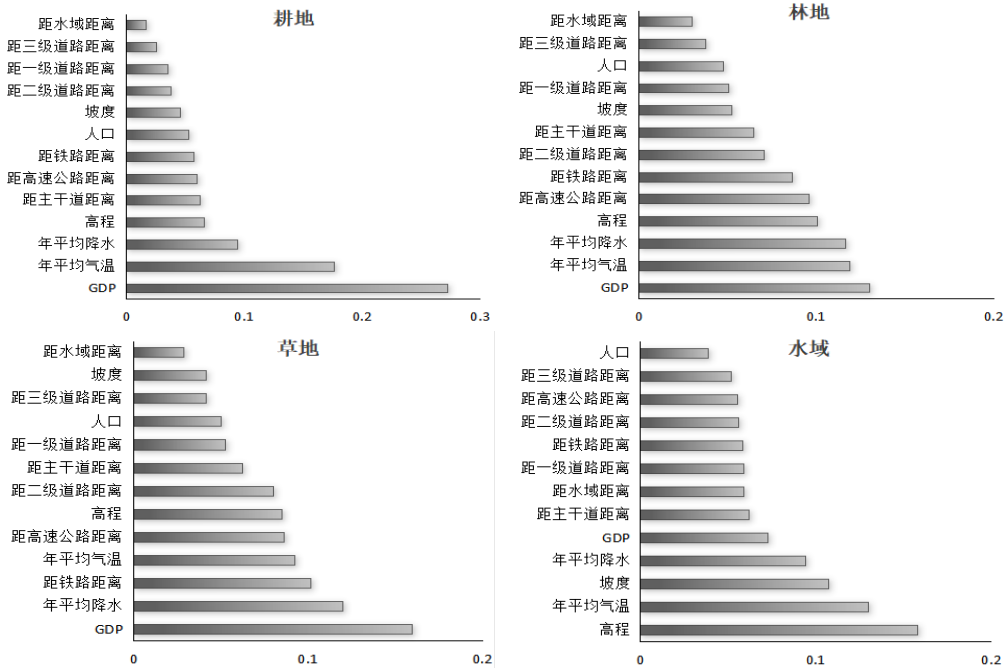
在复杂的地理环境和社会经济发展过程中，西藏土地利用类型的变化受到诸多因素的综合作用，本研究以 2000—2020 年西藏土地利用变化情况为因变量，结合自然环境和社会经济两方面共 13 个驱动因子，运用 PLUS 模型中的 LEAS 模块，深入探究各驱动因子对土地扩张的贡献度（图 2）。

经分析可知，耕地、林地、草地及未利用地的扩张显著受 GDP 影响。2000—2020 年，西藏 GDP 从 117.42 亿元增至 1902.74 亿元，伴随 GDP 的快速增长，耕地的扩张在两江四河流域（雅鲁藏布江、怒江、拉萨河、年楚河、雅砻河、狮泉河）的中游两岸谷地尤为明显，经济增长带动了对农产品的需求增加，进而促使耕地向适宜耕种的区域扩张。同时，农业政策的调整也在一定程度上影响了耕地的利用方

式和规模。

此林草地的面积变化还与年平均气温及年平均降水量密切相关。西藏地区的年平均降水量介于 200—1000mm 之间，其中东南部降水较为丰沛。在降水量丰富且邻近水体的地区，林地更易生长和扩张。此外，林地的增加还受益于西藏在 2002 年推行的退耕还林各项政策，以及后续的植树造林工程，均取得了显著的成效。草地面积的缩减现象主要存在于西藏地区的西部和北部，其一是由于经济的快速增长，藏北高原地区牧业蓬勃发展，长期的过度放牧加之当地生态系统固有的脆弱性，间接导致生态环境遭受一定程度的破坏，环境污染使得大面积草地逐渐退化成未利用地。其二是因西部地区降水有限且气温升高，干旱频率和程度逐渐加剧，导致草地退化，最终转变为未利用地。

水域面积的扩张主要受高程和年平均气温的影响。近年来，随着气候的不断恶化，气温持续攀升，青藏高原作为世界的“第三极”也深受影响，冰川加速融化，大量冰川融水汇入河流，使得河流水量显著增加。此外，多个水利设施的投入使用促进了水域面积的扩展。而建设用地扩张主要受人口、GDP 和距铁路距离等社会经济因子的影响。从经济层面来看，随着西藏旅游业的蓬勃发展，作为热门旅游目的地，西藏吸引了大量投资，基础建设不断推进。酒店、餐饮、娱乐等旅游配套设施的建设，直接推动了建筑用地的扩张。从城镇化角度分析，城镇化进程的加快，使得城镇居民对住房、教育、医疗等公共服务设施的需求急剧增加，这些需求直接转化为对建筑用地的迫切需要，从而推动了研究区建筑用地的持续增加。而距铁路距离则影响着交通便利性，靠近铁路的区域，由于交通便捷，更有利于人员流动和物资运输，吸引了更多的建设项目落地，进而促进了建设用地的扩张。



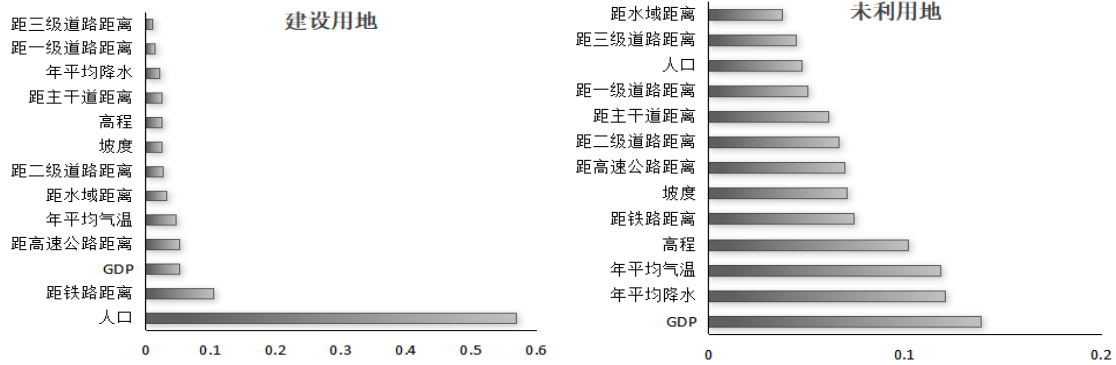


图2 西藏土地利用面积扩张驱动因子贡献度

4 讨论

(1) 与已有研究结论相印证^[6,7], 西藏土地利用变化格局并非单一因素所致, 而是受到社会发展水平和生态环境脆弱性的综合影响。其中, 自然条件对西藏土地利用格局起着决定性作用, 耕地、林地及建设用地的分布大体遵循自然规律, 主要集中在生态环境优良、地势较低的区域。在过去20年间, 西藏的土地利用经历了显著的变化, 呈现出多样化的演变趋势。这一现象与国家政策、自治区规划以及全球变暖等多层次因素密切相关。本文对2000—2020年期间的西藏土地利用情况进行了分析, 深入探讨其变化的驱动因素, 旨在为西藏自治区政府提升生态系统服务价值、构建国土空间规划体系提供科学依据。

(2) 本研究采用的PLUS模型虽然在一些方面具有其独特的优势, 但也存在一定局限性。在模型运用中的参数设置时, 对邻域权重确定主要基于现有数据和经验判断, 驱动因子也仅选用了13个驱动因子, 没有考虑到更多其他因子对土地利用的实际影响, 这可能会在一定程度上影响模拟的准确性。在数据方面, 土地利用数据和驱动因子数据存在空间分辨率限制, 本研究采用的是300m×300m的空间分辨率, 难以精确捕捉小尺度范围内土地利用变化的细节。

5 结论

本研究基于2000、2010、2020年三期土地利用数据和13类驱动因子数据, 结合土地利用转移矩阵和驱动因子贡献图, 深入分析了西藏地区土地利用变化特征及各驱动因子的贡献度。得出以下结论:

(1) 2000—2020年, 西藏土地利用类型主要为草地、林地及未利用地, 三者面积之和占研究区土地总面积的90%以上。草地面积持续缩减, 城乡建设用地和水域不断扩张, 耕地、林地和未利用地呈先后升降的态势, 且各地类在时空

分布上具有一定的差异性。

(2) 2000—2020年, 土地利用转换复杂, 主要集中在林地、草地与未利用地三大类之间。其中草地向林地、未利用地转出最多, 分别转换了55249.11 km²、285415.29 km²; 主要的转入地类依然为林地、草地及未利用地, 分别占据转入面积的13.66%、19.18%和57.87%。

(3) PLUS模型的总体精度达到0.98, 表明其在分析2000—2020年西藏地区各地类扩张驱动力方面有比较好的适用性。耕地、林地和未利用地的扩张主要受GDP、年平均降水和年平均气温等多个因子的影响, 其中自然环境因子占据主导地位; 草地的扩张不仅受年平均降水的影响, 还受到GDP和距铁路距离等因子的制约; 水域面积扩张的主要贡献因素是高程; 而建设用地扩张的主导因素则包括人口、距铁路距离和GDP等社会经济因子。

参考文献

- [1] 尹珂, 廖思雨. 基于InVEST模型和PLUS模型的三峡库区(重庆段)碳储量时空变化及预测[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(09): 60-9.
- [2] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合PLUS-InVEST模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(02): 300-14.
- [3] 刘玉斌. 中国海岸带典型生态系统服务价值评估研究[D], 2021.
- [4] 杜洲, 牛健植, 樊登星, 等. 基于PLUS模型的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化模拟及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(06): 309-18.
- [5] 陈伊多, 杨庆媛. 西藏自治区土地利用/覆被变化时空演变特征及驱动因素[J]. 水土保持学报, 2022, 36(05): 173-80.
- [6] 武爽, 冯险峰, 孔玲玲, 等. 气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J]. 地理研究, 2021, 40(05): 1265-79.
- [7] 闫立娟. 气候变化对西藏湖泊变迁的影响(1973—2017)[J]. 地球学报, 2020, 41(04): 493-503.