

引用格式:李佩君,左德鹏,徐宗学,高晓曦.基于地形梯度的雅鲁藏布江流域土地利用及景观格局分析[J].山地学报,2022,40(1):136-150.  
LI Peijun, ZUO Depeng, XU Zongxue, GAO Xiaoxi. Land use/cover and landscape patterns based on terrain in the Yarlung Tsangpo River basin, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(1):136-150.

## 基于地形梯度的雅鲁藏布江流域土地利用及景观格局分析

李佩君<sup>1a,1b,2</sup>, 左德鹏<sup>1\*</sup>, 徐宗学<sup>1</sup>, 高晓曦<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 a. 水科学研究院, b. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 100875, 北京;

2. 上海市水利管理事务中心, 200002, 上海)

**摘要:** 研究不同地形梯度下高寒山区土地利用演变和景观破碎化, 是对生态脆弱区保护与恢复精准施策的基础。雅鲁藏布江流域空间异质性明显, 但现有研究多集中在子流域尺度, 缺少像元尺度的深度探讨, 无法对流域精细化管理提供足够的数据支持。本文选取高程、坡度、地形起伏度 3 个地形要素, 分析 1980—2015 年雅鲁藏布江流域土地利用/覆被时空分布特征, 并借助分布指数计算各地类在不同地形分级的优势度, 基于冗余分析定量计算地形要素与景观格局指数相关关系。结果表明: (1) 流域近 30 年土地利用/覆被结构变化较小, 但空间异质性明显。草地为主要土地利用/覆被类型, 林地和永久性冰川积雪大部分位于下游地区, 耕地与城乡用地分布集中于中游; (2) 自上游至下游平均海拔逐渐降低, 坡度、地形起伏度逐渐增大。耕地、水体、城乡用地对地形要素依赖性最强, 林地、未利用地、永久冰川积雪适应性较强。3000~4000 m 高程带、6°~15°坡度带、小起伏山地带是由人类活动频繁区向自然生态系统的过渡带, 可作为土地利用变异转折点; (3) 由上游至下游景观格局破碎化程度逐渐增大、景观多样性逐渐提高。高程与景观聚集度呈较弱负相关关系。坡度和地形起伏度与景观聚集程度呈明显负相关, 与景观丰富程度呈正相关。本研究可为不同地形梯度下生态脆弱区研究与保护提供科学依据, 也可为高寒流域土地利用/覆被规划与保护及综合开发利用精准施策、一地一策提供理论基础。

**关键词:** 土地利用/覆被; 景观指数; 地形要素; 分布指数; 冗余分析; 雅鲁藏布江

**中图分类号:** P901

**文献标志码:** A

山地丘陵区复杂生态系统在垂直方向蕴藏诸多生物地理信息, 受地形影响显著<sup>[1-2]</sup>。高程和坡度等地形要素通过改变植被水热供给及土壤理化条件, 使地类分布和景观构成呈现规律性<sup>[3-6]</sup>。不同地类时间转移趋势与变化强度受地形分异性约束较大<sup>[7]</sup>, 导致区域土地功能规划与保护受到限制<sup>[8-9]</sup>。青藏高原的土地利用与景观格局因其影响因素多、涉及范围广, 成为学者和政府共同关注的热点问题。

随着全球气候变暖, 青藏高原植被覆盖呈现整体趋好、局部恶化的状况<sup>[10]</sup>, 其中高原草地的退化使地下生物量减少趋势较地上更为显著<sup>[11]</sup>。受温度、降水和植被覆盖影响, 该区域冻融侵蚀问题日趋严重<sup>[12]</sup>。雅鲁藏布江作为西南重要的跨境河流, 是青藏高原高寒山区重点生态保护和恢复区域。流域内地形复杂、地貌各异, 面临土地退化和景观破碎化的困境<sup>[13]</sup>, 利用景观指数方法能定量分析区域景观格

**收稿日期** (Received date): 2020-10-09; **改回日期** (Accepted date): 2022-02-25

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金 (9164720019); 国家重点研发计划 (2017YFC1502703); 北京市自然科学基金 (8202030)。  
[ National Natural Science Foundation of China (9164720019); National Key Research and Development Program of China (2017YFC1502703); Beijing Natural Science Foundation (8202030) ]

**作者简介** (Biography): 李佩君 (1996-), 女, 山东青岛人, 硕士, 主要研究方向: 水文与水资源。[ LI Peijun (1996-), female, born in Qingdao, Shandong province, M. Sc., research on hydrology and water resource ] E-mail: lipeij@foxmail.com

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 左德鹏 (1985-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 水文水资源与水环境。[ ZUO Depeng (1985-), male, Ph. D., associate professor, research on hydrology, water resource and water environment ] E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

局合理性,这是建设“山水林田湖草”生命共同体的数据基础。综合评价区域土地利用及景观格局,指导高寒山区生态恢复政策的实施,对促进流域生态发展具有重要现实意义。

当前研究对土地利用/覆被和景观格局在不同地形梯度的分析主要采用非参数相关分析<sup>[14]</sup>、趋势典范对应分析(DCCA)<sup>[15]</sup>和多元统计<sup>[16]</sup>等方法。雅鲁藏布江流域空间异质性明显,但现有成果往往仅在上下游层面进行简单划分<sup>[17]</sup>,缺少像元尺度的统计研究,导致无法为精细化决策提供足够的数据支持。除统计模型外,动态过程模型与综合模型也有一定应用<sup>[18-20]</sup>,但由于其对基础数据要求较高,在雅鲁藏布江流域这类无资料流域应用困难。

本文选取高程、坡度、地形起伏度三个地形要素,分析1980—2015年雅鲁藏布江流域土地利用/覆被时空演变特征,借助分布指数计算各地类在不同地形梯度下的优势性,并对基于移动窗口法的六个景观格局指数与地形要素相关性进行冗余分析(RDA),以深入探究雅鲁藏布江流域地形要素对于土地利用/覆被结构及景观格局的空间限制性。本研究可以为不同地形梯度下生态系统脆弱区研究与保护提供科学依据,也可以为高寒流域整体土地利用/覆被规划保护及综合开发利用精准施策、一地一策提供理论基础。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

雅鲁藏布江位于青藏高原,平均海拔4000 m以上,是世界上海拔最高的河流,位于北纬27°8′~31°2′N,东经82°0′~97°1′E(图1),地域辽阔,流域

总面积达24.05万km<sup>2</sup>;地形复杂、海拔差异较大,是西南生态保护极重要区<sup>[21]</sup>。通过文献查阅及专家咨询,雅鲁藏布江上游包括日喀则市拉孜县以上的宽谷区,中游为河谷区,米林县派镇以下为下游峡谷,面积占比分别为55.9%、22.5%和21.6%。流域降雨时空分布不均,上游地区谷地年降水量不足300 mm;中游地区年降水量多在300~600 mm;下游地区高温多雨,个别地区年降水量达5000 mm,是中国降水量最多地区,全年降水主要集中在7—9月,占全年降水量50%~80%。流域水能资源丰富、可开发程度高,单位面积天然水能蕴藏量是长江三倍,居全国之首<sup>[22]</sup>。流域占西藏自治区总面积的1/5,但人口、耕地、工农牧业产值均占西藏一半以上,是西藏政治、经济与文化中心地带。

### 1.2 数据获取及处理

本文使用雅鲁藏布江流域1980—2015年1 km土地利用数据和1:250000 DEM数据集,来源于中国科学院资源与环境科学数据中心。其中,1980年数据实际为1970年代末期(1980年)中国土地利用现状遥感监测数据。本文选取1980、2000、2015三期土地利用数据来代表研究区在自然阶段、过渡阶段和当前发展阶段的不同土地利用/覆被状态。参照土地利用分类标准,考虑到永久冰川积雪在高原山区对土地利用/覆被及景观格局有较大影响,因此将其从水体中提取单独作为一类。按照耕地、林地、草地、水体、城乡用地、未利用地和永久性冰川积雪将土地利用/覆被类型分为7类(图2)。

本文选取高程、坡度、地形起伏度三个地形要素,根据DEM计算得到坡度、地形起伏度数据(图3)。重采样使其与土地利用/覆被数据分辨率相同,方便后期空间叠加分析。为探寻研究区地形

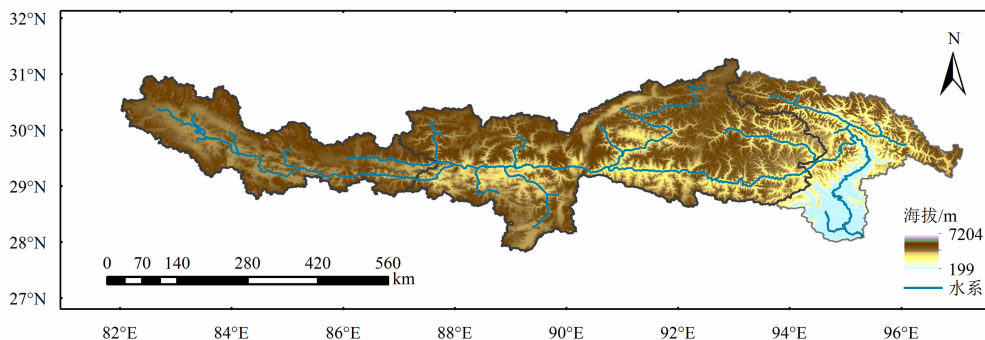


图1 研究区区位图

Fig. 1 Location of Yarlung Tsangpo River basin (YTRB), China

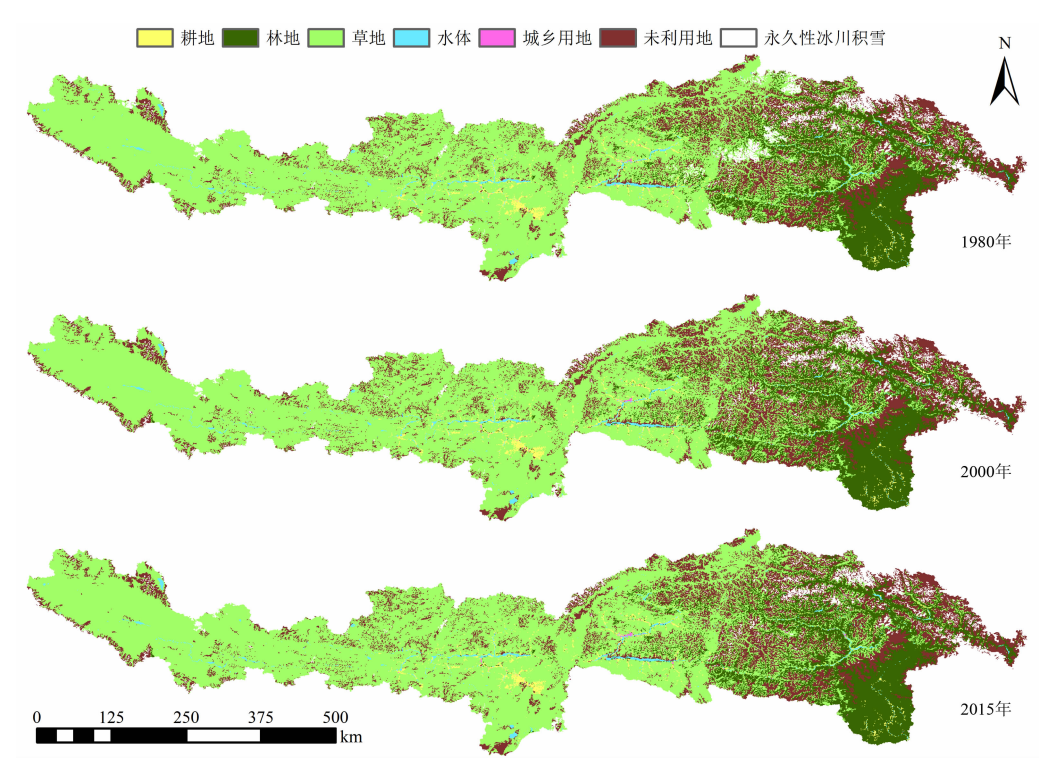


图 2 雅鲁藏布江流域 1980—2015 年土地利用/覆被类型空间分布  
Fig. 2 Land use types of the YTRB from 1980 to 2015

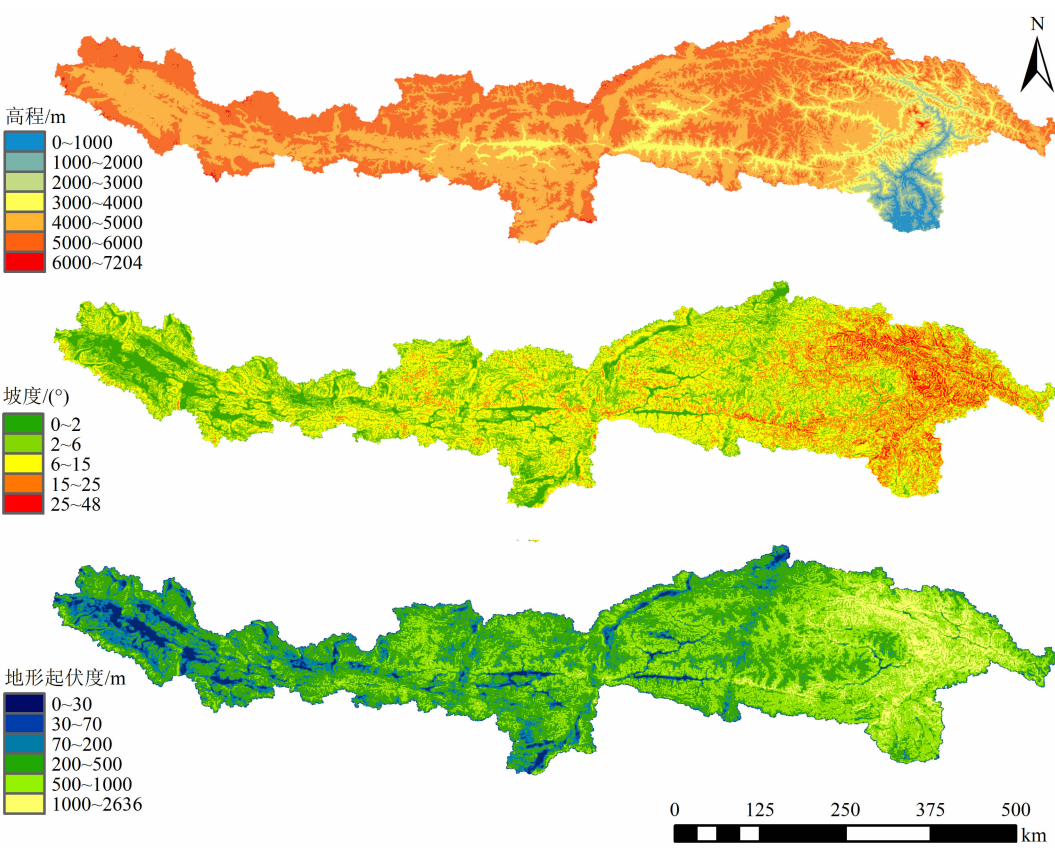


图 3 研究区高程、坡度、地形起伏度分级图  
Fig. 3 Hierarchical of elevation, slope and relief of research area

梯度与土地利用/覆被分布规律,对地形要素进行等级划分。由于流域地形复杂、上下游海拔变化剧烈,高程分级步长过小会使数据稳定性降低。对比发现步长为 1000 m 时分级能较好体现流域高程梯度性,故按照 Equal interval 法将研究区高程划分为 7 个级别。坡度分级标准按照临界坡度分级法<sup>[23]</sup>,参考 1984 年中国农业区划委员会颁发的《土地利用现状调查技术规程》将坡度分为 5 级:0°~2°、2°~6°、6°~15°、15°~25°及 25°以上。地形起伏度应根据区域环境、地貌特征、应用目的科学分级,参照前人研究<sup>[24]</sup>并结合本数据分辨率,基于变点分析法计算得到地形起伏度统计单元最佳分析窗口为 9 km × 9 km;根据国家数字地貌制图规范,将研究区划分为 6 个级别:平原(0~30 m)、台地(30~70 m)、丘陵(70~200 m)、小起伏山地(200~500 m)、中起伏山地(500~1000 m)和大起伏山地(1000 m 以上)。

## 2 研究方法

### 2.1 分布指数

为消除研究区各地形面积大小差异在各地类分布中的影响,使用标准化、无量纲的分布指数表示不同地形上各地类分布情况<sup>[25]</sup>。分布指数  $P$  计算公式如下:

$$P = \left( \frac{S_{ie}}{S_i} \right) \div \left( \frac{S_e}{S} \right) = \left( \frac{S_{ie}}{S_i} \right) \times \left( \frac{S}{S_e} \right) \quad (1)$$

式中, $S$  为研究区总面积( $\text{km}^2$ ); $S_e$  为研究区  $e$  地形要素的土地总面积( $\text{km}^2$ ); $S_i$  为  $i$  类土地总面积( $\text{km}^2$ ); $S_{ie}$  为  $e$  地形要素下  $i$  类土地面积( $\text{km}^2$ )。分布指数曲线越平缓,表明该地类分布与研究区地形标准分布越相近,即对地形差异适宜性越强;反之,则说明对地形选择性强。当  $P > 1$  时,表明某地类在该地形上比重大于该地类总面积在研究区比重,因此若  $P > 1$  则视为该地类在此地形区间上为优势位<sup>[26]</sup>。

### 2.2 景观指数与移动窗口法

为在较少冗余信息下充分反映流域景观格局特点<sup>[27]</sup>,本研究采用移动窗口法对斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、平均斑块面积(AREA\_MN)、聚集度(AI)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI) 6 个景观指数进行景观水平分析(表 1)。移动窗口法是在 Fragstat 4.3 程序中窗口从研究区左上角开始移动,每次移一栅格,计算当前窗口内上

述景观格局指数并赋予其中心栅格,最终获得各景观指数空间分布特征图。参考相关研究<sup>[28]</sup>,本研究采用 9 km 作为研究区移动窗口尺寸。

表 1 景观格局指数定义及单位

Tab. 1 Landscape metrics in Fragstats

景观指数	描述
斑块密度 (/100 ha)	景观中包括全部异质景观要素斑块的单位面积斑块数
最大斑块指数/%	最大斑块面积占总景观面积百分比
平均斑块面积/ha	景观中某类景观要素斑块面积的算术平均值
聚集度/%	反映景观聚集程度,取值越大,代表景观由少数团聚的大斑块组成
香农多样性指数	景观中只有一种类型斑块时,值为 0;随斑块类型增加或不同类型斑块比例接近,值变大
香农均匀度指数	反映景观中各斑块类型在面积上分布均匀程度趋于 1 时,景观斑块类型分布均匀程度也趋于最大

### 2.3 冗余分析

冗余分析(Redundancy analysis, RDA)是基于线性数据模型的约束性直接梯度排序分析方法,能结合多个解释变量和响应变量进行多元回归分析,被广泛应用于土地利用与水质分析、生物群落分布驱动因素分析和景观格局演变分析等领域<sup>[29-31]</sup>。本文采用 Canoco 4.5 及相关插件对流域景观格局因子与地形要素相关性进行分析。首先使用网格法以 2015 年地形数据与景观数据为样本,将流域地形景观数据建立联系,提取样点属性构建数据库。为避免数据量纲不同对数据结果造成影响,分别对地形要素和景观因子矩阵进行 max-min 标准化处理,使变量取值均为 0~1。

对景观格局指数进行降级趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA),当各轴中最长梯度值大于 4 时,选择单峰模型(如经典对应分析 Canonical Correspondence Analysis, CCA);当最长梯度值小于 3 时,适用于线性模型(如冗余分析 RDA);若最长梯度值位于 3~4,则两种模型都适用。通过 DCA 分析,得到三个排序轴梯度长度分别为 1.336、0.789 和 0.334,皆小于 3,故研究区选择 RDA 分析更为合适。将 RDA 结果绘图时,箭头矢量表示景观格局指数和地形要素,当变量间箭头角度为锐



角时为正相关关系,为钝角时为负相关关系<sup>[32]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 地形要素与土地利用/覆被空间分布特征

流域地形复杂,空间异质性明显,坡度与地形起伏度空间分布较为相似(图3)。上游海拔较高,均在4000 m以上;但坡度较小,多在第1、2级别区( $0^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 和 $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ );地形起伏度偏小,是流域平坦地带集中区。中游除雅鲁藏布江干流及拉萨河干流海拔在第四级别区(3000~4000 m)外,其余地区海拔仍在4000 m以上;坡度较上游有明显增加,大部分区域分布在 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 级别区,局部地区坡度达到 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ,呈零碎斑点状分布;地形起伏度以河道为中心向两侧先增大再减小,大部分地区集中在第4、5级别区(200~1000 m)。下游地形变化剧烈,尤其由帕隆藏布地区至林芝地区海拔骤降、横跨七个高程带,坡度大都在 $15^{\circ}$ 以上、高坡度地区成片状分布,地形起伏度在500 m以上,以大、中起伏山地为主。

1980—2015年流域土地利用/覆被空间分布如图2所示,研究区以自然生态系统为主,草地占流域总面积61%以上,未利用地次之。草地上中游地区呈大面积片状分布;未利用地和永久性冰川积雪主要分布在中下游尼洋河流域、帕隆藏布地区,以零散斑块分布居多。永久性冰川积雪与其他地类相比变化最为明显,相较1980年减少22.72%,消融地区主要集中于流域中下游尼洋河、拉萨河流域。雅鲁藏布江流域高原河湖水体零散分布,水资源总量较为充沛;森林集中于降水丰沛气候湿润的下游林芝地区,近40年来增加了123 km<sup>2</sup>,变化面积主要分

布于尼洋河流域、拉萨河下游以及雅鲁藏布江下游段干流。耕地与城乡用地大多靠近水体,中游日喀则、拉萨是西藏重要的城市集聚区。整体来看,流域在1980—2015年水平方向整体结构比较稳定,未发生较大变化。受全球气候变暖等因素的影响,雅鲁藏布江流域近年来气温明显升高,对永久性冰川积雪和高原水体构成威胁。已有研究发现<sup>[33]</sup>该流域积雪面积、积雪深度、冰川面积均显著减少,这与本文研究结果较为一致。

雅鲁藏布江流域土地利用/覆被空间分异明显。以2015年为例,对比各地类在上中下游分布(图4),城乡用地(94%)、耕地(86%)大部分位于中游,林地、永久性冰川积雪在下游分布较多,均达到64%。分区域统计(图5),上游草地占比最大,达到88.74%;未利用地次之,为8.75%,其余地类仅占上游总面积的2.51%,地类构成较为单调。中游草

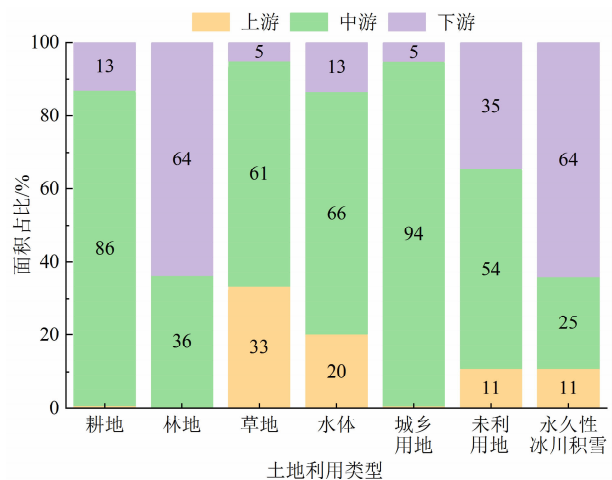


图4 雅鲁藏布江流域2015年各地类分布比例

Fig. 4 Distribution of each land use in the YTRB in 2015

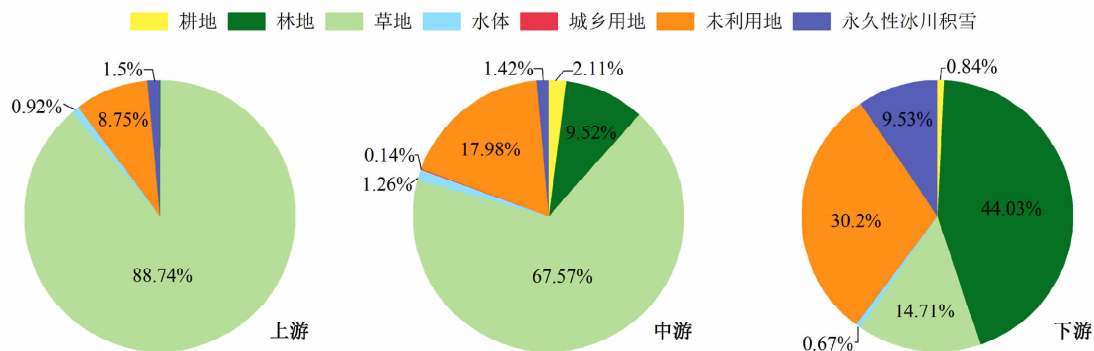


图5 雅鲁藏布江流域2015年土地利用结构图

Fig. 5 Land use structure of the YTRB in 2015

地面积占比下降,但仍占据 67.57%;未利用地占比扩大至 17.98%,林地占比上升近 10%。下游土地利用/覆被结构最为复杂,林地(44.03%)取代草地(14.71%)成为占比最大的地类,未利用地占比达到 30.2%,是下游第二大地类。永久性冰川积雪在下游广泛分布,占比由上中游 1.5% 左右增长至 9.53。

### 3.2 地形要素与土地利用/覆被时空格局的关系

#### 3.2.1 高程与土地利用/覆被时空格局的关系

为进一步了解土地利用/覆被类型在不同高程上的分布形态,将土地利用/覆被类型与 DEM 叠加,统计高程每增加 100 m 各地类面积,得到图 6。林地在海拔 1000~3000 m 分布较为平均,峰值出现在海拔 4500 m 左右,反映出森林明显适合在中低海拔区域生长。城乡用地和耕地线型陡峭,分别集中分布于海拔 3500 m 和 4000 m 处。其中 1980—2015 年间城乡用地在 3500 m 处面积增幅达 124%,说明高程对其约束性十分强烈。永久性冰川积雪主要分布于海拔 4000~6000 m 区域,1980—2015 年间海拔 5200 m 处冰川积雪面积突降 42.4%,转化为未利用地。水体主要包括河流及高原湖泊,分布不连续且受高程影响有限。草地及未利用地线型与高程面积曲线类似,峰值出现在海拔 5000 m 处,说明高程变化对其分布影响较小。

由于流域绝大部分地区土地利用/覆被年际变化小,选取 2015 年作为代表年对各地类占比及优势度进一步分析。由图 7 可知,随高程升高,林地占比由 96% 下降至 0,在 3000 m 以下区域占绝对优势。海拔过高,降水减少、气温降低,无法支撑乔木正常生长。据白皮书统计数据,1996—2012 年间中央政府投资西藏生态建设近 3.7 亿元,天然林建设、退耕还草、拉萨造林绿化等工程相继开展并取得明显成果,较建国初期,2012 年植被覆盖率提升近 5%。林地面积增加、绿化成果明显且受人类活动影响较大。与此同时,未利用地和永久性冰川积雪由 0 分别上升至 37% 和 55%,高程对这两种地类限制性较为明显。对于这三种地类,降水及温度为主要影响因素。耕地与水体占比趋势变化相同,在下游气候湿润、海拔较低处占比偏高。草地、城乡用地变化趋势为先增加后减少,前者由于其高程适应性较好,随森林占比减小在海拔较高处占比增大;后者虽整体占比较低,但在 3000~4000 m 处占比明显增加,反映出该高程带人类活动较为频繁。虽然 3000~4000 m 高程带面积仅占流域总面积 11%,但各地类分布最丰富全面,受人类活动影响最大。其中,林地、草地占比达 38% 和 35%,未利用地占比 14%,耕地、水体占比 7% 和 5%,城市用地占比最小。

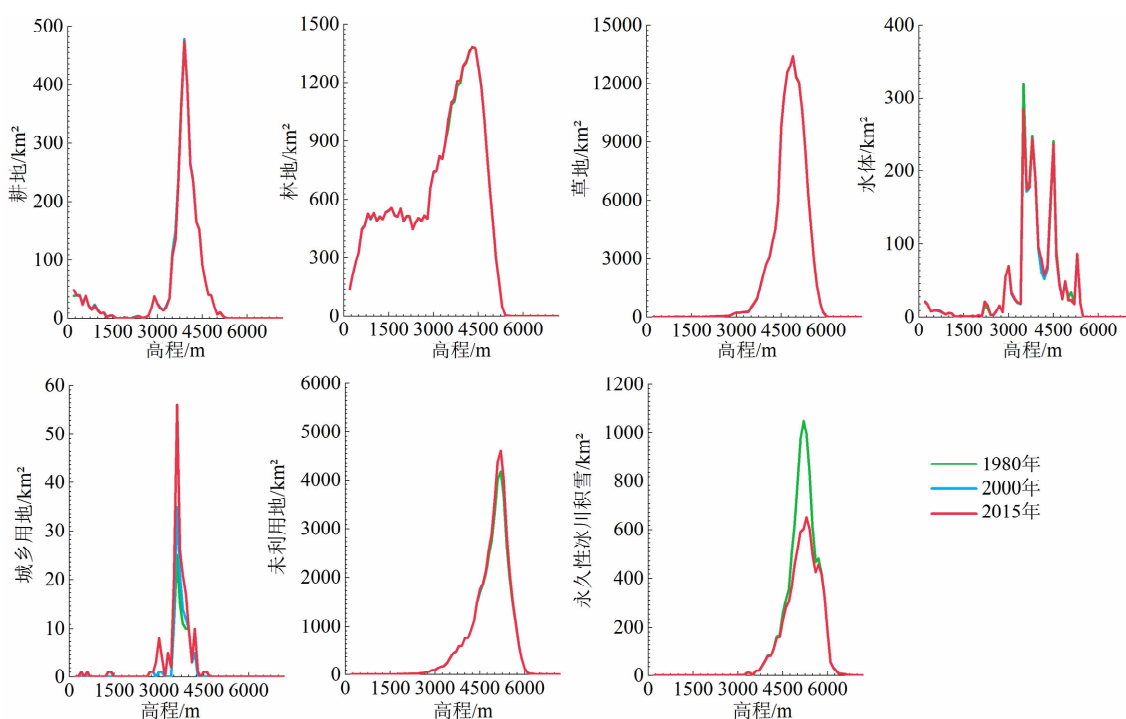


图 6 各地类在不同高程面积分布

Fig. 6 Distribution of land types at different elevation

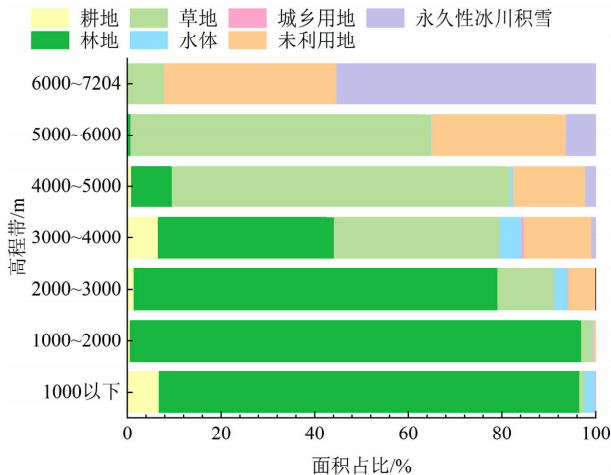


图 7 各地类在不同高程带面积占比

Fig. 7 Proportion of land types at different elevation levels

不同高程带各地类分布指数(图 8)显示优势地位类变化较大,城乡用地、耕地和水体分布指数线型类似,都经历急剧增长和降低。随高程增大,森林分布指数持续降低,未利用地与永久性冰川积雪分布指数持续增加,草地分布指数变化相对平缓。在 1000 m 高程带,城市用地分布指数略低于 1;林地在 1000 ~ 2000 m 高程带占绝对优势 ( $P = 6.58$ ); 2000 ~ 3000 m 高程带林地优势度下降,城乡用地、耕地、水体分布指数逐渐增大,说明该高程带由自然生态系统向人类活动频繁区域过渡。3000 ~ 4000 m 高程带城乡用地、耕地、水体分布指数达到峰值,分别为 7.41、4.89 和 4.44,林地降至 2.57,耕地与城乡用地优势度增加明显。4000 ~ 5000 m 高程带,仅草地分布指数略大于 1,城乡用地骤降至 0。当高程达到

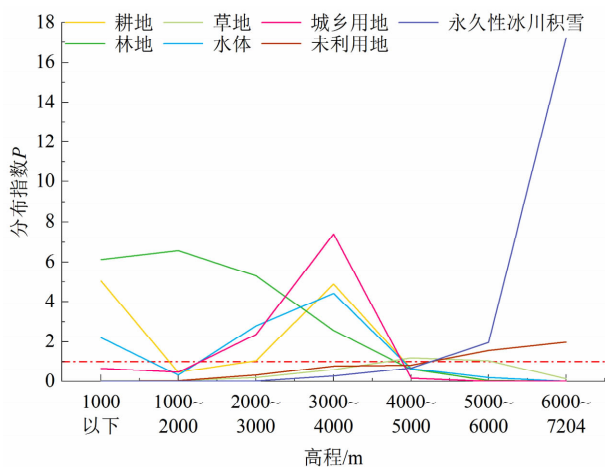


图 8 各地类在不同高程带分布指数

Fig. 8 Distribution index of land types at different elevation levels

6000 ~ 7000 m,永久性冰川积雪分布指数突增,占绝对优势地位 ( $P = 17.24$ ),未利用地次之 ( $P = 1.98$ )。

### 3.2.2 坡度与土地利用/覆被时空格局的关系

坡度作为光热系统的主要地形影响因素,对植被形成及分布、冰川积雪能量吸收消融有重要作用,将土地利用/覆被类型与坡度叠加,统计坡度每增加  $1^\circ$  各地类面积,得到图 9。各地类按面积变化趋势可分为两类:持续降低型,如与人类活动密切程度较高的耕地、水体和城乡用地;先增后减型,如林地、草地、未利用地和永久性冰川积雪。耕地面积在坡度  $1^\circ \sim 10^\circ$  区域变化较平稳,适应性要明显优于水体与城乡用地,水体的坡度限制性尤为明显。2015 年城乡用地在坡度为  $0^\circ$  处面积较 1980 年增加一倍,  $3^\circ$  与  $7^\circ$  处增长率分别为 88.9% 与 166.7%。随着基建水平进步,城乡区域有逐渐向高坡度扩张趋势。根据 2000 年、2010 年人口普查资料可知,2010 年雅鲁藏布江流域总人口较 2000 年增加 21.76 万人,增幅达到 13.5%,非农业人口占比扩大 2.5%。据西藏统计年鉴可知,2015 年人均农业产值是 1980 年的 13 倍,人均工业产值是 1980 年的 42 倍。人口增加、经济发展使土地利用流转模式发生改变。林地广泛分布于坡度  $15^\circ \sim 25^\circ$  区域,面积最大值出现在  $15^\circ$ ,表明该地类对不同坡度适应能力较强。未利用地线型较为狭长、分布更为集中,2015 年坡度  $6^\circ$  处面积达到 3437  $\text{km}^2$ ,较 1980 年增加 196  $\text{km}^2$ 。永久性冰川积雪在坡度  $5^\circ \sim 9^\circ$  处分布较多,该坡度带永久性冰川积雪面积在 1980—2015 年共减少 917  $\text{km}^2$ ,占该地类减少面积的 40%。草地面积峰值出现在坡度  $4^\circ$  处,线型与流域坡度面积曲线形状完全相同,说明坡度对草地限制性较小。

不同坡度下各地类面积占比见图 10。随坡度增大,草地、耕地、水体、城乡用地面积占比逐渐减少,林地、未利用地、永久性冰川积雪面积不断增加。草地在坡度较低地区占比下降速度较慢,坡度  $15^\circ$  为分界值,占比最高达 76%,而在  $15^\circ \sim 25^\circ$  区间骤降 32%。耕地、水体与城乡用地恰好相反,坡度较低地区占比下降速度极快,对  $0^\circ \sim 2^\circ$  区间表现出较强依赖性,坡度过高不适宜进行建设和耕作等人类活动。林地随坡度增大占比由 3% 提升至 46%,坡度为  $15^\circ \sim 25^\circ$  处突增 26%,在坡度较高地区占绝对优势。未利用地与永久冰川积雪随坡度增大稳定增长,前者由 14% 增长至 30%,后者由 1% 增长至

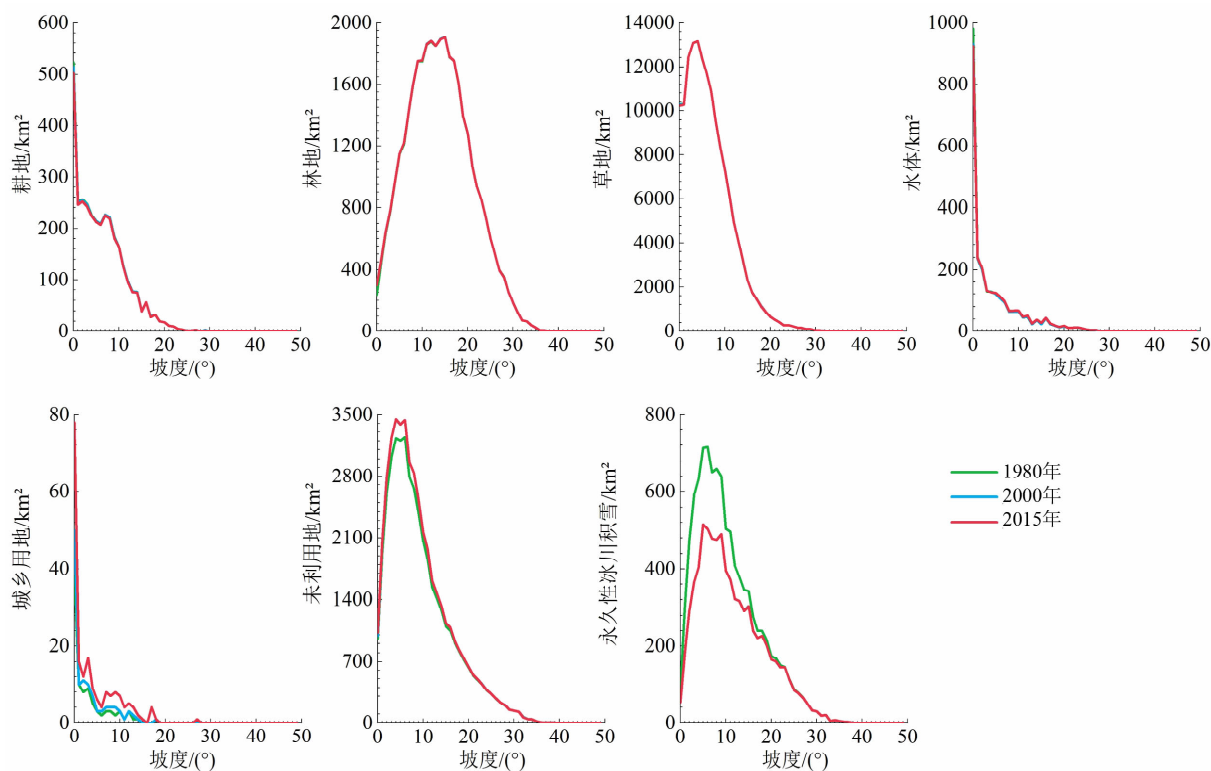


图9 各地类在不同坡度的面积分布

Fig. 9 The distribution of land types at different slope

7%,成为25°以上地区重要组成部分。6°~15°级别区面积95 862 km<sup>2</sup>,占流域总面积39%,是草地—林地—未利用地优势地类组合,其中草地占比59%,林地占比17%,未利用地占19%,土地利用/覆被结构开始显著表现为自然生态化。2°~6°级别区占流域总面积29%,是流域第二大坡度带,0°~2°级别区流域占比18%。

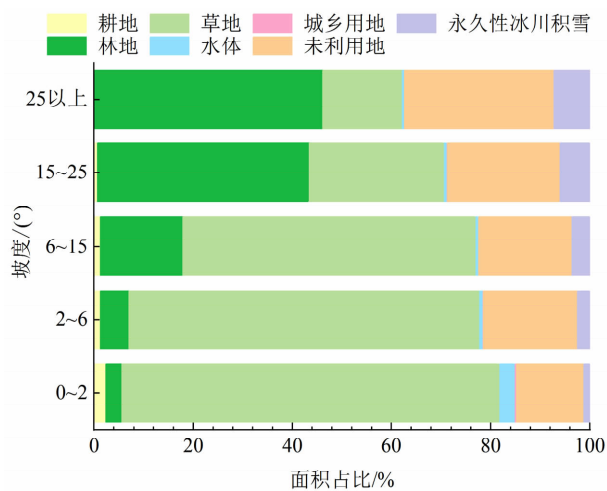


图10 各地类在不同坡度带面积占比

Fig. 10 Proportion of land types at different slope levels

结合分布指数对各地类优势度进行综合分析,由图11可知,随坡度增加各地类分布指数变化趋势与其面积占比变化类似。在0°~2°级别区,林地分布指数最低仅为0.2,城乡用地和水体占据绝对优势,分布指数在3以上,这两种地类受坡度限制较大。耕地与草地分布指数略高于1,但二者在各级别优势度皆不明显,对坡度敏感性略低。耕地分布指数在1.72~0.12内基本呈线性递减,草地分布指数更为稳定,为1.24~0.45。2°~6°级别区,与人类活动密切相关的城乡用地、耕地、水体优势度下降明显,林地、未利用地、永久性冰川积雪分布指数开始上升。坡度在6°~15°时各地类分布指数差别不大,说明人类活动频繁区正向自然状态的生态系统逐渐过渡,可作为土地利用/覆被类型变异转折点。15°~25°级别区中林地分布指数骤增至3,成为绝对优势地类,未利用地与永久性冰川积雪优势度稳步递增达1.22和1.89。坡度为25°以上时,分布指数前三位为林地、永久性冰川积雪、未利用地,其他地类均降至0.5左右。

### 3.2.3 地形起伏度与土地利用/覆被时空格局的关系

地形起伏度是对一定范围内高程差的定量描



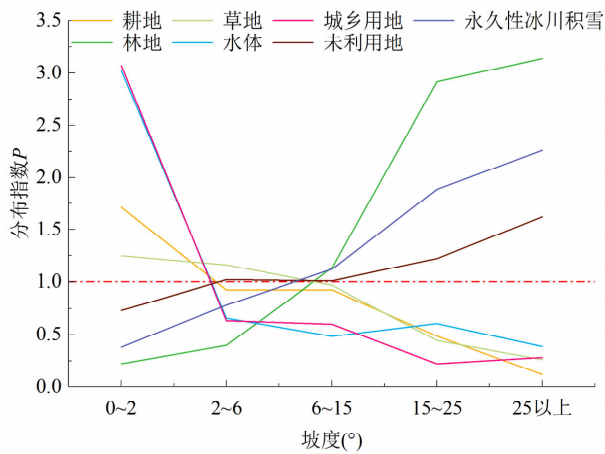


图 11 各地类在不同坡度带分布指数

Fig. 11 Distribution index of land types at different slope levels

述,是结合周围地形条件的综合衡量指标,由点及面对土地利用/覆被进行全面研究。将土地利用/覆被类型与地形起伏度叠加,统计地形起伏度每变化 50 m 各地类面积(图 12)。随地形起伏度增加,耕地面积变化与其他地类不同,呈先减少后增加再减少趋势,两个峰值分别出现在地形起伏度为 50 m 和 350 m 处。流域耕地分布不连续,大多是零星状分布,稳定作物种植区集中在中下游两侧,包括拉萨河

与年楚河下游部分地区<sup>[34]</sup>。中游拉萨、日喀则地区地形起伏度较小,下游林芝地区地形起伏较大,所以耕地在图中显示为双峰曲线。水体与城乡用地变化趋势较为相似,集中分布于地形平缓地区,随地形起伏度增大面积急剧减少,对地形起伏度敏感性较高,但城乡用地有向地形起伏较大地区逐步扩张趋势。草地、林地、未利用地及永久性冰川积雪随地形起伏度增大面积先增后减,不同地类峰值出现位置不同。草地大部分位于地形起伏度较小地区,分布与流域地形起伏度面积曲线类似,峰值出现在地形起伏度 300 m 处,达 14 106 km<sup>2</sup>。林地对地形适宜性较好,大部分位于地形起伏度较大下游地区,峰值相对靠后,位于地形起伏度 700 m 处。未利用地及永久性冰川积雪峰值分别出现在地形起伏度为 400 m 和 500 m 处,其中 450 m 处永久性冰川积雪面积在 1980—2015 年间下降最多,达 286 km<sup>2</sup>,降幅 35%。

各地类在不同地形起伏度级别中面积占比差异较大,随地形起伏变化趋势与坡度变化相似(图 13)。在地形起伏度 200 m 以下区域,各地类占比结构较为稳定,平原、台地和丘陵占总面积 15%,在此级别中草地分布最广,占比均在 83% 以上,为绝对优势地类,其中在丘陵占比最高,达 86%,水体、

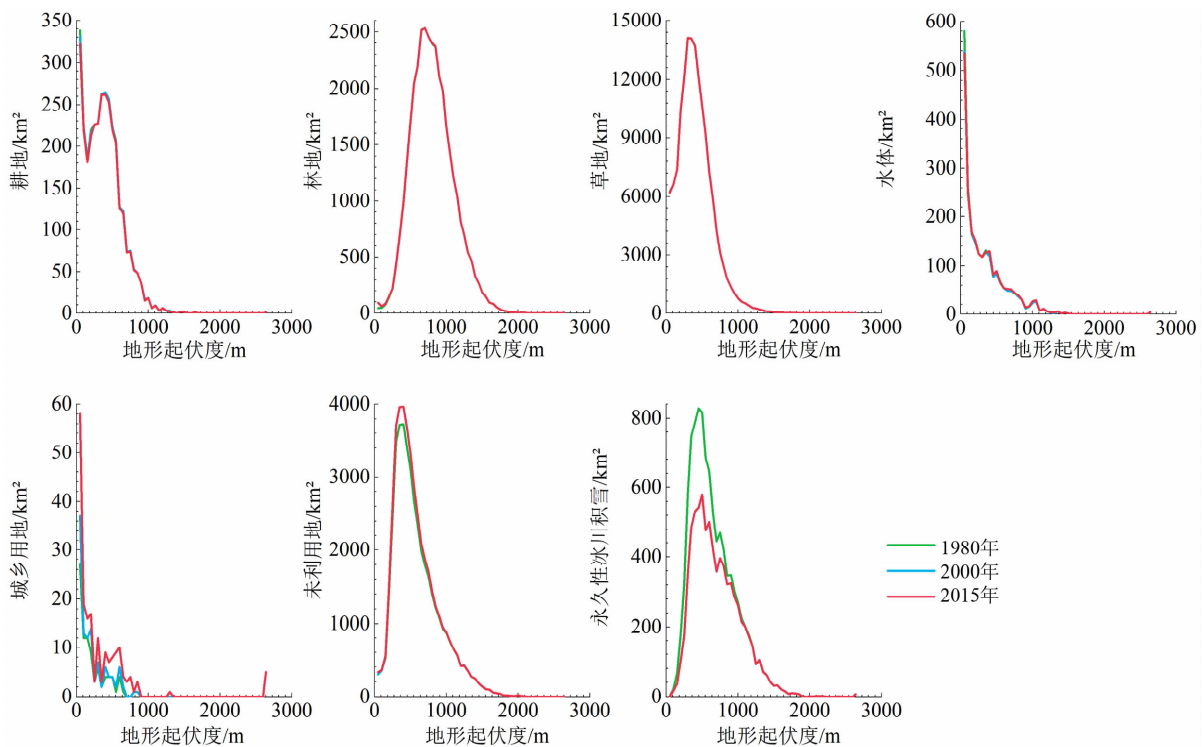


图 12 各地类在不同地形起伏度的面积分布

Fig. 12 The distribution of land types at different relief

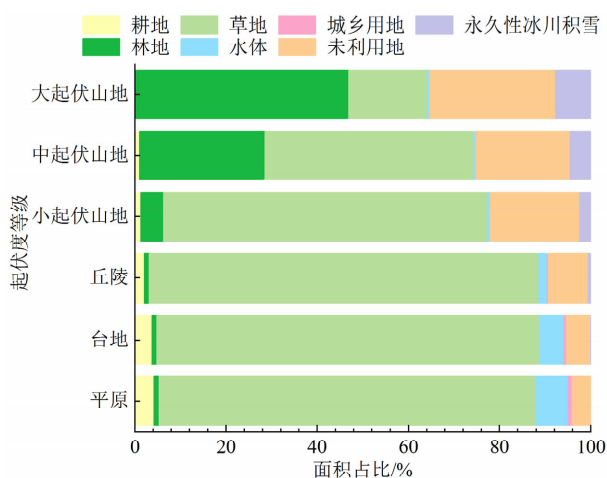


图 13 各地类在不同地形起伏等级面积占比

Fig. 13 Proportion of land types at different relief levels

城乡用地大部分集中在此区域,分别占地类总面积的 49% 和 59%。小起伏山地是流域面积最大级别区,占流域总面积 45%,该级别区森林、未利用地占比增长明显,草地占比明显下降但仍达 71%,占主要地位,耕地、城乡用地占比持续下降,呈由人类影响频繁区向自然生态系统过渡。中起伏山地面积次之,占流域总面积 33%,该级别草地、林地、未利用地和永久性冰川积雪占比分别为 46%、28%、21% 和 5%,林地占比突增、草地占比相应下降。在大起伏山地,林地占比 47%,超过草地成为优势地类,未利用地占比 28%。随地形起伏度增大,水土保持能力下降,林地、未利用地适应性愈发凸显。

各地类在不同地形起伏度级别区分布指数变化如图 12。草地分布指数变化幅度最小,基本稳定在

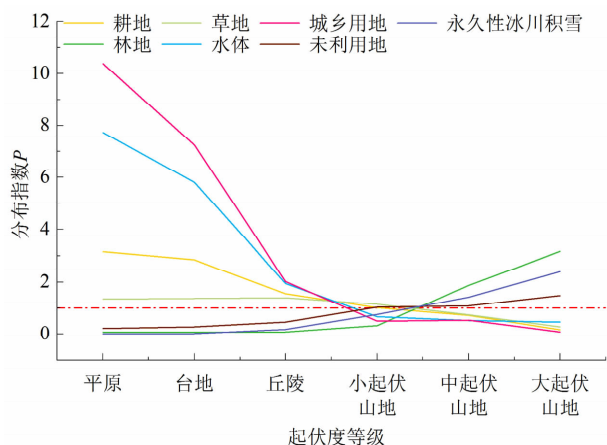


图 14 各地类在不同地形起伏等级分布指数

Fig. 14 Distribution index of land types at different relief levels

$P = 1$  左右,说明草地对地形起伏度敏感性较低。平原区分布指数前三位分别为城乡用地、水体和耕地,对低地形起伏度区域依赖程度较大。随地形起伏度增加至台地、丘陵区,这三个地类优势度持续下降。丘陵区各地类最大优势度约为 2,地类间优势度差距明显缩小、竞争关系逐渐增强。小起伏山地区,城乡用地、水体、耕地分布指数进一步降低,未利用地、永久性冰川积雪与林地分布优势逐渐增大,但整体优势不明显( $P < 1$ ),处于自然生态系统过渡区,与面积占比分析得到结论相同,该级别可作为土地利用/覆被类型变异转折点。中起伏山地与大起伏山地优势地类相似,林地、永久性冰川积雪、未利用地在该区域优势度直线上升,分布指数达 3.16、2.41 与 1.48,说明这三种地类对地形起伏度适应性较强。

### 3.3 基于移动窗口法的景观格局指数与地形要素 RDA 分析

#### 3.3.1 景观水平上的景观指数分布

对景观格局的分析是对雅鲁藏布江流域生态环境整体分析的细化。聚焦于土地利用/覆被斑块空间关系,考虑到雅鲁藏布江流域土地利用/覆被年际变化较小,以 2015 年为代表年,选取六个景观指数进行计算得到景观指数分布如图 15 所示。最大斑块指数与聚集度空间分布相似,具有较强正相关性,共同反映流域景观破碎程度;斑块密度与二者分布相反。斑块密度自上游、中游至下游依次增大,绝大部分地区处于低值区,高值多集中于中游拉萨河及下游帕隆藏布地区。上游斑块密度较小、最大斑块指数大、平均斑块面积大、景观聚集度大,地势相对平坦有利于草地大面积生存,但海拔较高人类活动少,景观主要是大面积高原草地与零散高海拔未利用地,所以格局较为完整、破碎化程度低。中游斑块密度普遍增大、最大斑块指数以河道为中心向南北两侧增大、平均斑块面积明显减小、景观聚集度空间异质性明显。中游是流域经济、政治、文化中心,受人类活动影响较大,绝大部分耕地与城乡用地沿水系分布并集中于此,景观组成复杂、破碎化程度较高。下游大部分区域斑块密度大、最大斑块指数小、平均斑块面积小、景观聚集度小,景观破碎化程度高。林芝南部降水丰沛、气候适宜,林地集中分布使之景观指数与下游其他地区有明显不同,相对而言破碎化程度低。地形是该地区主要影响因素,下游

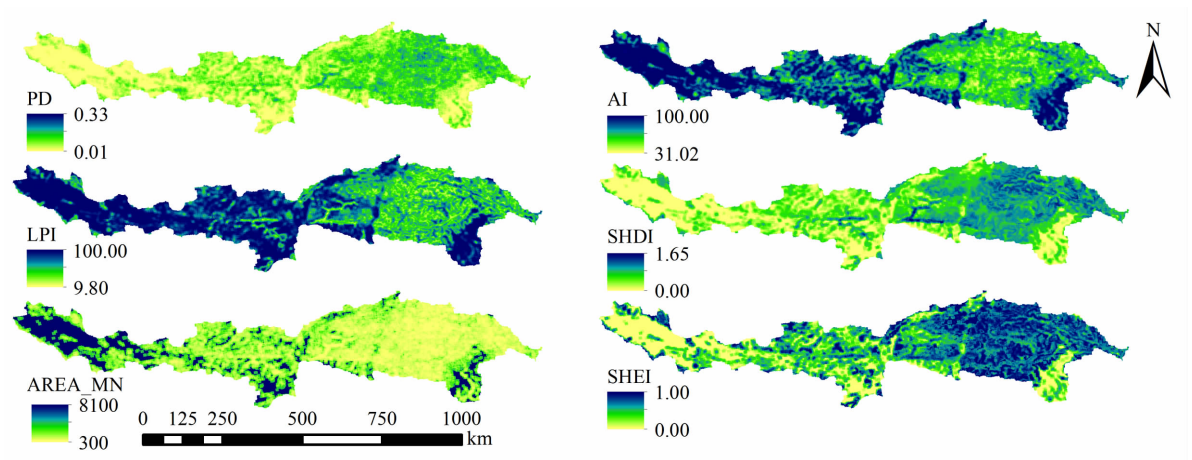


图 15 景观水平上的景观指数分布  
Fig. 15 Spatial distribution of landscape metrics

地形多变,垂直方向景观变化剧烈、组成十分复杂,与前人研究结果相互印证<sup>[35]</sup>。

香农多样性指数、香农均匀度指数共同刻画流域景观多样性,二者呈由上游至下游逐渐增大趋势。香农多样性指数最大值集中于中游受人类活动扰动最大的拉萨和日喀则地区,景观主要为围绕水体存在的耕地与城乡聚落。由于研究区绝大部分为未被开发的自然生态景观,类型较为单一,多样性低。在下游帕隆藏布地区数值相对较大,当地海拔变化较大,未利用地、永久性冰川积雪、森林草地交错分布,景观类型多样。相对而言,香农均匀度指数的空间异质性更强,上游草地占据绝对优势地位使斑块分布较不均匀,而下游由于地势因素,斑块分布均匀度以水系为中心向两侧明显增加。

3.3.2 基于 RDA 方法的景观格局指数与地形要素的相关性分析

为定量分析景观格局指数与地形要素的相关关系,提取样点属性构建数据库,采用降维趋势对应分析(DCA)判断使用方法。结果显示,排序轴梯度长度均小于3,因此选用线性模型 RDA 方法分析景观格局指数与地形要素相关性。采用空间网格法对流域采样,获得共3212个样点。将高程、坡度、地形起伏度及景观指数空间分布图与样点图层叠加赋值,建立流域样点数据属性库,进行 RDA 分析,得到流域景观格局指数与地形要素相关性。结果表明,景观格局指数与地形要素对应分析的特征值总和为0.189,RDA 排序第一排序轴累计景观格局指数与地形解释变量为99.47%,说明第一排序轴能集中

反映景观格局指数与地形要素相关性信息。

由各排序轴相关性结果(表2、图16)可知,RDA 排序第一排序轴景观格局指数与地形要素相关性达0.4557(显著相关水平 $P < 0.05$ )。各景观指数向量与高程向量夹角接近直角说明相关度较小,与坡度和地形起伏度相关性较为明显。其中,AI、LPI、AREA\_MN 与坡度、地形起伏度向量间为钝角,呈较明显负相关关系;PD、SHDI、SHEI 与坡度和地形起伏度向量夹角为小于 $30^{\circ}$ 的锐角,呈正相关关系。较其他指数,AI 与高程呈较弱负相关关系,可看出流域景观格局指数与地形要素存在典型相关关系。

表 2 RDA 排序中景观格局指数与地形环境因子相关系数  
Tab. 2 Correlation coefficient of CCA ordination axes  
for the terrain environment variables

排序轴	相关系数					
	TF_1	TF_2	TF_3	高程	坡度	地形起伏度
LP_1	0.4557	0.0000	0.0000	0.0061	0.3390	0.4114
LP_2	0.0000	0.1113	0.0000	-0.1097	0.0446	0.0420
LP_3	0.0000	0.0000	0.0486	-0.0080	-0.0260	-0.0100

注:LP\_1 ~ LP\_3 为前三轴景观格局指数信息,TF\_1 ~ TF\_3 为前三轴地形要素信息。

4 结论

本文基于雅鲁藏布江流域1980—2015年土地利用数据,统计各地类在不同高程、坡度、地形起伏



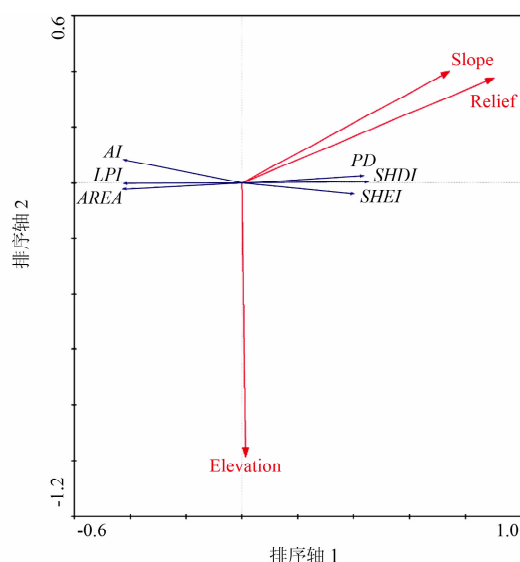


图 16 RDA 分析结果

Fig. 16 The result of RDA

度的土地利用/覆被面积分布,使用分布指数反映各地类优势度。利用移动窗口法分析研究区景观格局特征,通过 RDA 分析景观格局指数与地形要素相关关系。得出结论如下:

(1)流域 1980—2015 年间土地利用/覆被变化较小,但空间异质性明显。草地为研究区主要土地利用/覆被类型,林地和永久性冰川积雪大部分分布在下游地区。耕地与城乡用地分布集中于中游,分布靠近水体。永久性冰川积雪在研究区内面积变化最大,城乡用地增幅最明显。自上游至下游平均海拔逐渐降低,坡度、地形起伏度逐渐增大。

(2)流域土地利用/覆被类型分布有一定地形阶梯性。林地、永久性冰川积雪适应性较强,地形对城乡用地和耕地约束强烈,草地及未利用受地形影响较小。耕地、水体、城乡用地对地形要素依赖性最强,主要分布在海拔 3500~4000 m、坡度  $0^{\circ}$ ~ $2^{\circ}$ 、地形起伏度为平原台地区域。3000~4000 m 高程带、 $6^{\circ}$ ~ $15^{\circ}$  坡度带、小起伏山地带是由人类活动频繁区向自然生态系统过渡带,可作为土地利用变异转折点。

(3)由上游至下游景观格局空间异质性增大,景观组成愈发复杂、破碎化程度变高。地形是下游主要影响因素,垂直方向景观变化剧烈。高程与景观聚集度呈较弱负相关关系。坡度和地形起伏度与景观格局聚集程度呈明显负相关,与景观丰富程度呈正相关。

对于以自然生态系统为主的研究区,地形要素是影响其土地利用/覆被及景观格局的重要因素。本研究可为雅鲁藏布江流域土地利用结构调整配置及生态保护提供参考依据。

## 参考文献 (References)

- [1] KORNER C. The use of 'altitude' in ecological research [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2007, **22**(11): 569–574. DOI: 10.1016/j.tree.2007.09.006
- [2] 哈凯,丁庆龙,门明新,等. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系——以河北省怀来县为例[J]. *地理研究*, 2015, **34**(5): 909–921. [HA Kai, DING Qinglong, MEN Mingxin, et al. Spatial distribution of land use and its relationship with terrain factors in hilly area [J]. *Geographical Research*, 2015, **34**(5): 909–921] DOI: 10.11821/dlyj201505010
- [3] KEBEDE M, KANNINEN M, YIRDAW E, et al. Vegetation structural characteristics and topographic factors in the remnant moist Afromontane forest of Wondo Genet, south central Ethiopia [J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, **24**(3): 419–430. DOI: 10.1007/s11676-013-0374-5
- [4] ZHANG Baoqing, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Changes in vegetation condition in areas with different gradients (1980–2010) on the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(8): 2427–2438. DOI: 10.1007/s12665-012-1927-1
- [5] 赵文武,刘月,冯强,等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务[J]. *地理科学进展*, 2018, **37**(1): 139–151. [ZHAO Wenwu, LIU Yue, FENG Qiang, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems [J]. *Progress in Geography*, 2018, **37**(1): 139–151] DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.015
- [6] LIU Runhong, PAN Yuanfang, BAO Han, et al. Variations in soil physico-chemical properties along slope position gradient in secondary vegetation of the hilly region, Guilin, southwest China [J]. *Sustainability*, 2020, **12**:13034. DOI: 10.3390/su12041303
- [7] 唐荣莉,姚雄,王春萍,等. 基于地形梯度的重庆市近 40 年水田及旱地时空演变特征[J]. *西南农业学报*, 2021, **34**(9): 1939–1949. [TANG Rongli, YAO Xiong, WANG Chunping, et al. Spatial distribution and variation characteristics of paddy fields and dry land in chongqing in past 40 years based on topographic gradient [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, **34**(9): 1939–1949] DOI:10.16213/j.cnki.scjas.2021.9.018
- [8] DAS B, PAUL A, BORDOLOI R, et al. Soil erosion risk assessment of hilly terrain through integrated approach of RUSLE and geospatial technology: A case study of Tirap District, Arunachal Pradesh [J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2018, **4**(1): 373–381. DOI: 10.1007/s40808-018-0435-z



- [9] 陈斌, 李海东, 曹学章, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的雅鲁藏布江流域植被动态变化[J]. 山地学报, 2016, **34**(2): 249 – 256. [CHEN Bin, LI Haidong, CAO Xuezhong, et al. Dynamic changes in vegetation coverage in the Yarlung Zangbo River basin based on SPOT-VGT NDVI [J]. Mountain Research, 2016, **34**(2): 249 – 256] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000125
- [10] 李伟霄, 徐军, 姚雅倩, 等. 全球变暖背景下青藏高原三江源地区植被指数 (NDVI) 时空变化特征探讨[J]. 山地学报, 2021, **39**(4): 473 – 482. [LI Weixiao, XU Jun, YAO Yaqing, et al. Temporal and spatial changes in the vegetation cover (NDVI) in the Three-River headwater region, Tibetan Plateau, China under global warming [J]. Mountain Research, 2021, **39**(4): 473 – 482] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000612
- [11] PENG Fei, XUE Xian, YOU Quangang, et al. Change in the trade-off between aboveground and belowground biomass of alpine grassland: Implications for the land degradation process [J]. Land Degradation and Development, 2020, **31**(1): 105 – 117. DOI: 10.1002/ldr.3432
- [12] 欧阳琰, 沈渭寿, 杨凯, 等. 近 20 a 雅鲁藏布江流域冻融侵蚀演变趋势[J]. 山地学报, 2014, **32**(4): 417 – 422. [OUYANG Yan, SHEN Weishou, YANG Kai, et al. The trend of freeze-thaw erosion in Yarlung Zangbo River basin in nearly twenty years [J]. Mountain Research, 2014, **32**(4): 417 – 422] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2014.04.005
- [13] LI Xilai, GAO Jay, ZHANG Jing. A topographic perspective on the distribution of degraded meadows and their changes on the Qinghai-Tibet Plateau, west China [J]. Land Degradation and Development, 2018, **29**(6): 1574 – 1582. DOI: 10.1002/ldr.2952
- [14] TENDAUPENYU P, MAGADZA C H D, MURWIRA A. Changes in landuse/ landcover patterns and human population growth in the Lake Chivero catchment, Zimbabwe [J]. Geocarto International, 2017, **32**(7): 797 – 811. DOI: 10.1080/10106049.2016.1178815
- [15] 赵志轩, 张彪, 金鑫, 等. 海河流域景观空间梯度格局及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2011, **31**(7): 1925 – 1935. [ZHAO Zhixuan, ZHANG Biao, JIN Xin, et al. Spatial gradients pattern of landscapes and their relations with environmental factors in Haihe River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(7): 1925 – 1935]
- [16] 马士彬, 安裕伦, 杨广斌, 等. 不同地形梯度上的植被变化趋势及原因分析[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(5): 857 – 864. [MA Shibin, AN Yulun, YANG Guangbin, et al. The analysis of distribution characteristics and reasons of NDVI change trends along the terrain gradient [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(5): 857 – 864] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.05.001
- [17] 李文博, 方江平, 赵文涛. 雅鲁藏布江流域林芝段景观指数相关性与其景观格局差异性分析[J]. 高原农业, 2020, **4**(6): 592 – 600 + 622. [LI Wenbo, FANG Jiangping, ZHAO Wentao. Analysis on the correlation of landscape indexes and difference of landscape pattern in Nyingchi section of Yarlung Zangbo River basin [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2020, **4**(6): 592 – 600 + 622] DOI: 10.19707/j.cnki.jp.a.2020.06.009
- [18] SYPHARD A D, CLARKE K C, FRANKLIN J. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in southern California [J]. Ecological Complexity, 2005, **2**(2): 185 – 203. DOI: 10.1016/j.ecocom.2004.11.003
- [19] LIGTENBERG A, WACHOWICZ M, BREGT A K, et al. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning [J]. Journal of Environmental Management, 2004, **72**(1 – 2SI): 43 – 55. DOI: 10.1016/j.jenvman.2004.02.007
- [20] EVANS T P, KELLEY H. Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change [J]. Journal of Environmental Management, 2004, **72**(1 – 2SI): 57 – 72. DOI: 10.1016/j.jenvman.2004.02.008
- [21] 林子雁, 肖焱, 史雪威, 等. 西南地区生态重要性格局研究[J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8667 – 8675. [LIN Ziyang, XIAO Yi, SHI Xuewei, et al. Assessment of the ecological importance patterns in southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(24): 8667 – 8675] DOI: 10.5846/stxb201805241139
- [22] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征[J]. 地理学报, 1999, **54**(S1): 157 – 164. [LIU Tianchou. Hydrological characteristics of Yaluzanbo River [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, **54**(S1): 157 – 164]
- [23] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(2): 157 – 160. [TANG Guoan, SONG Jia. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, **20**(2): 157 – 160] DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2006.02.038
- [24] 韩海辉, 高婷, 易欢, 等. 基于变点分析法提取地势起伏度——以青藏高原为例[J]. 地理科学, 2012, **32**(1): 101 – 104. [HAN Haihui, GAO Ting, YI Huan, et al. Extraction of relief amplitude based on change point method: A case study on the Tibetan Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, **32**(1): 101 – 104] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.01.013
- [25] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学, 2001, **21**(1): 64 – 69. [YU Hong, ZENG Hui, JIANG Ziyang. Study on distribution characteristics of landscape elements along the terrain gradient [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, **21**(1): 64 – 69] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2001.01.012
- [26] 陈利顶, 杨爽, 冯晓明. 土地利用变化的地形梯度特征与空间扩展——以北京市海淀区和延庆县为例[J]. 地理研究, 2008, **27**(6): 1225 – 1234. [CHEN Liding, YANG Shuang,

- FENG Xiaoming. Land use change characteristics along the terrain gradient and the spatial expanding analysis: A case study of Haidian district and Yanqing county, Beijing [J]. *Geographical Research*, 2008, **27**(6): 1225 – 1234. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2008.06.001
- [27] 龚建周, 夏北成. 景观格局指数间相关关系对植被覆盖度等级分类数的响应[J]. *生态学报*, 2007, **27**(10): 4075 – 4085. [GONG Jianzhou, XIA Beicheng. Response to classification numbers of vegetation types on correlative coefficients among landscape metrics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(10): 4075 – 4085] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.10.015
- [28] LI Peijun, ZUO Depeng, XU Zongxue, et al. Dynamic changes of land use/cover and landscape pattern in a typical alpine river basin of the Qinghai – Tibet Plateau, China [J]. *Land Degradation and Development*, 2021, **32**(15): 4327 – 4339. DOI: 10.1002/ldr.4039
- [29] 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2158 – 2165. [LI Yanqing, HUANG Tinglin, ZHANG Haihan, et al. Succession characteristics of algae functional groups and water quality assessment in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2158 – 2165] DOI: 10.13227/j.hjks.201910147
- [30] ZHANG Jing, LI Siyue, JIANG Changsheng. Effects of land use on water quality in a River Basin (Daning) of the Three Gorges Reservoir Area, China: Watershed versus riparian zone [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **113**: 106226. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106226
- [31] WANG Binhao, ZHENG Xiafei, ZHANG Hangjun, et al. Bacterial community responses to tourism development in the Xixi National Wetland Park, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **720**: 137570. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137570
- [32] JIANG Penghui, LI Manchun, LYU Jiancheng. The causes of farmland landscape structural changes in different geographical environments [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 667 – 680. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.383
- [33] CUO Lan, LI Ning, LIU Zhe, et al. Warming and human activities induced changes in the Yarlung Tsangpo Basin of the Tibetan Plateau and their influences on streamflow [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, **25**: 100625. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100625
- [34] 何万华. 气候变化背景下西藏“一江两河”流域作物种植区分布变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 1 – 79. [HE Wanhua. The research on the variety of crop planting area distribution in the Yarlung Zangbo River, Nyangqu River and Lhasa River region, Tibet basin under the background of climate changes [D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 1 – 79]
- [35] 石运杰, 蔡葵, 吴文春, 等. 基于地形特征分异的土地利用分布研究——以珠穆朗玛峰国家级自然保护区为例[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(2): 394 – 400. [SHI Yunjie, CAI Kui, WU Wenchun, et al. Research on land use distribution based on topographic differentiation—a case study of Qomolangma National Nature Reserve [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(2): 394 – 400] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.02.047

## Land Use/cover and Landscape Patterns Based on Terrain in the Yarlung Tsangpo River Basin, China

LI Peijun<sup>1a,1b,2</sup>, ZUO Depeng<sup>1\*</sup>, XU Zongxue<sup>1</sup>, GAO Xiaoxi<sup>1</sup>

(1. a. College of Water Sciences; b. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Shanghai Water Conservancy Management Center, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** A fine understanding of land-use pattern evolution and landscape fragmentation in alpine mountainous areas under different terrain gradients is of great importance to implement targeted protection and restoration strategies in ecological fragile areas, especially in the Yarlung Tsangpo River basin (YTRB), which has pronounced spatial heterogeneity. Past studies concerned more on sub-basin scale in YTRB, but little attention was paid to pixel scale, which could not provide sufficient data support for targeted measures across the basin. In this study, three indexes, including elevation, slope and relief amplitude, which can reveal the dominant effect of land-use types under different terrain gradients by Distribution Index, were selected to analyze land use/cover pattern

characteristics in the YTRB from 1980 to 2015. Redundancy analysis (RDA) was used in correlation analysis between terrain factors and six landscape indices, which was aimed to further explore the spatial constraints of terrain gradients on land use/cover structure and landscape pattern in the YTRB. The results show that: (1) Although land use/cover structure in YTRB generally have kept unchanged for the past 30 years, the heterogeneity in space was evident. Grassland was main land use/cover type, forest land and permanent glacier snow were mostly located in lower reaches, and cultivated land and built-up areas were concentrated in middle reaches; (2) Average elevation gradually decreased from upstream to downstream, whereas the slope and relief amplitude increased accordingly. Cultivated land, water body and built-up areas had the strongest dependence on terrain factor. Forest land, unused land and permanent glacier snow had strong adaptability on terrain factor. The 3000 ~ 4000 m of elevation zone,  $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$  of slope zone and small undulating mountain zone were transition zones from areas of high human activities to natural ecosystems, which can be taken as the turning points of land-use variation; (3) The degree of landscape fragmentation gradually increased from upstream to downstream, whereas the landscape diversity gradually increased. It showed a weak negative correlation between elevation and landscape aggregation. Slope and relief amplitude were significantly and negatively correlated with landscape aggregation, and positively correlated with landscape abundance. This study can provide scientific basis for the research and protection of ecological fragile areas under different terrain gradients, and provide theoretical foundation for targeted land use/cover management, protection, and comprehensive development and utilization in alpine regions.

**Key words:** land use/cover; landscape pattern; terrain factors; distribution index; redundancy analysis (RDA); the Yarlung Tsangpo River Basin (YTRB)