

# 青藏高原建设用地的适宜性与适应性及 后备潜力评价

杨 华<sup>1,2</sup>, 徐 勇<sup>1,2</sup>, 周 侃<sup>1,2</sup>, 王丽佳<sup>1,2</sup>, 徐 琳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 青藏高原是重要的生态安全屏障区,厘清青藏高原建设用地的适宜空间对于协调生态保护与人类活动的关系,促进人口与产业的空间优化布局具有重要意义。基于建设用地适宜性评价模型,通过构建基于模型的建设用地适宜性评价“格局—过程”耦合分析框架,评价了青藏高原全域的建设用地适宜性,使用实际建设用地适应性指数和垂直梯度指数解析了1990—2020年实际建设用地对适宜性评价结果的适应性过程及其内部限制因素,测算了后备适宜建设用地潜力。结果表明:① 青藏高原建设用地适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜等级面积占比分别为0.13%、4.04%、7.00%、9.34%和79.50%,青藏高原建设用地适宜性以不适宜等级为主;② 1990—2020年青藏高原实际建设用地对适宜性评价结果的平均适应性在80%以上,实际建设用地总体适应建设用地适宜空间的分布特点,但具有显著的空间差异性;③ 1990—2020年青藏高原对适宜性评价结果低适应的实际建设用地以农村居民点、交通运输用地和特殊用地为主,城镇建设用地和其他建设用地的占比快速升高,青南高原、川西高山峡谷区和祁连山区的建设用地受到高程和坡度的双重限制,而藏北高原、冈底斯山区和喜马拉雅山区的主要限制因素是海拔;④ 青藏高原后备适宜建设用地潜力面积为12.41万km<sup>2</sup>,占土地总面积的4.81%,人均后备适宜建设用地面积为9928 m<sup>2</sup>/人,柴达木盆地的后备适宜建设用地资源最为丰富。本文的研究结论可为青藏高原生态移民搬迁和生产力的空间布局优化提供决策参考。

**关键词:** 土地资源;建设用地适宜性;实际建设用地适应性;人类活动;青藏高原

DOI: 10.11821/dlxb202309002

## 1 引言

青藏高原有“世界屋脊”和“地球第三极”之称,是中国乃至亚洲重要的生态安全屏障。现代考古学证据表明,至少5.2 ka前人类就已经永久定居在青藏高原东北部的河湟谷地区,并缓慢向高原东南部和南部的河谷及高海拔地区扩张<sup>[1]</sup>。特别是进入21世纪以后,亚洲23%的人类活动扩张发生在以青藏高原为主体的高地,其中建设用地扩张的贡献率超过20%<sup>[2]</sup>,青藏高原的人类活动强度显著上升<sup>[3]</sup>。由于高海拔地区的氧分压和大气含氧量较低,人体长期暴露于低压低氧环境下诱发的高原性心脏病、高血压等慢性高山病和高原肺水肿、高原脑水肿等急性高山病严重影响着青藏高原短居和世居人群的身

收稿日期: 2023-04-06; 修订日期: 2023-08-20

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0406) [Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK0406]

作者简介: 杨华(1995-), 男, 四川达州人, 博士生, 主要从事土地利用与人地关系机理模拟、地域功能类型与区划研究。  
E-mail: yanghua0678@igsrr.ac.cn

通讯作者: 徐勇(1964-), 男, 陕西榆林人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土地利用与人地关系机理模拟、农业与乡村发展、资源环境承载力评价研究。E-mail: xuy@igsrr.ac.cn

2128-2146 页

体健康和生活质量<sup>[4-6]</sup>。在过去较长时期内, 青藏高原的人均预期寿命明显低于全国平均水平<sup>[7]</sup>, 因病致贫也是导致青藏高原成为中国贫困人口和贫困地区分布最集中区域的重要因素之一<sup>[8]</sup>。为了提高青藏高原居民福祉, 从20世纪90年代开始, 中国先后采取了游牧民定居工程、精准扶贫异地搬迁和极高海拔地区生态移民搬迁等人类活动空间布局优化举措, 但覆盖范围小, 惠及人口数量有限。当前, 中国正在推动青藏高原生态安全屏障建设和区域高质量发展, 预计未来生态友好型旅游业和清洁能源开发等产业将会呈现规模性发展趋势, 人口数量和城镇化率会有较大幅度上升, 稳边固边型重点城镇和村庄建设被提到更加重要的位置<sup>[9]</sup>, 对新增建设用地的需求更加迫切。建设用地作为承载生产和生活等人类活动的核心空间载体, 评价青藏高原的建设用地适宜性进而明确适宜开发建设的用地潜力及其空间分布, 对于合理安排人类活动空间, 优化国土空间开发保护格局, 进而统筹协调青藏高原生态保护与人类活动具有重要意义。

涉及建设用地的土地利用适宜性分析(Land-use Suitability Analysis, LUSA)起源于联合国粮农组织1976年提出的土地评估框架(Framework For Land Evaluation, FLE)<sup>[10]</sup>, 旨在根据特定人类活动的需求和偏好来确定特定类型土地用途最适当的空间分布模式, 是应用最广泛的土地利用适宜性评估与制图工具箱<sup>[11-12]</sup>, 但其关注的重点是农、林、牧用地, 建设用途的评价工作相对薄弱<sup>[13]</sup>。21世纪以来, 伴随大规模工业化、城镇化导致的优质耕地锐减和生态环境问题凸显, 建设用地适宜性评价成为新的热点, 并已逐步拓展到城镇建设用地<sup>[14-15]</sup>、乡村居民点用地<sup>[16-17]</sup>、工矿用地<sup>[18]</sup>以及光伏电场<sup>[19]</sup>和风能电场<sup>[20]</sup>等建设选址的适宜性等方面, 评价要素选取和技术方法也得到较大改进。多准则决策分析(Multi-criteria Decision Analysis, MCDA)是应用最广泛的建设用地适宜性评价方法和分析框架<sup>[21-22]</sup>, 其基本流程为基于不同分析目标构建包含地形地貌、气候条件、地质条件、用水条件和社会经济条件等评价指标体系, 采用层次分析法、熵值法和模糊数学等方法确定指标权重, 使用加权线性组合法<sup>[23]</sup>(Weighted Linear Combination, WLC)和有序加权平均法<sup>[24]</sup>(Ordered Weighted Averaging, OWA)等方法对评价指标进行加权组合, 最后通过适宜性综合指数划分建设功能指向的适宜性等级<sup>[25-27]</sup>。随着空间分析技术的发展, 人工神经网络和元胞自动机等机器学习方法也被用于建设用地适宜性评价建模, 其评价结果相较MCDA法更为客观<sup>[28-29]</sup>。总的来看, 现有建设用地适宜性评价研究的尺度较小, 缺乏更大尺度区域的适宜性建模, 同时研究方法和分析框架也存在固有的缺陷: 如MCDA法受到研究尺度, 数据可获得性、有效性和数学转换, 评价指标的权重确定存在主观性等限制, 其分析框架更适合小尺度的精细化评价, 难以扩展到更大尺度区域<sup>[30]</sup>; MCDA分析框架下多种指标输入是否存在重叠和共线性进而导致评价结果偏误等问题有待进一步检验。现有研究多聚焦评价方法模型的改进和评价结果的格局解析, 缺乏对土地利用响应适宜性评价结果的演变过程及其影响机理的探讨, 尚未形成基于模型的土地利用适宜性评价“格局—过程”耦合分析框架<sup>[31]</sup>。此外, 青藏高原普遍存在基础数据缺失和难获取等问题, 采用数据驱动型的适宜性分析框架很难直接应用于青藏高原的建设用地适宜性评价工作中。

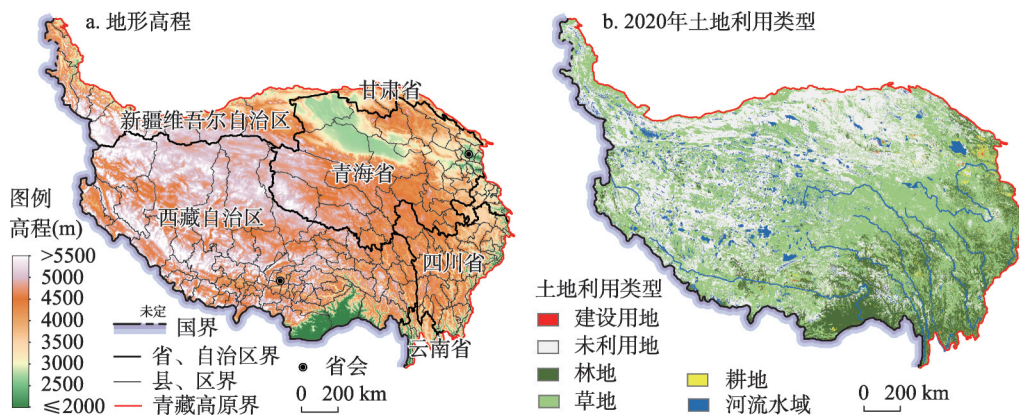
2008年汶川地震灾后恢复重建资源环境承载力评价工作中提出了一种基于高程和坡度分级组合优选可利用土地资源的建设用地适宜性评价方法, 该方法具有可操作性强、不依赖大量指标输入和能够快速应用于大尺度区域等优点, 是一种能满足基本工程建设需求, 兼顾一定人体生理适宜性的基础性土地适宜性评价方法<sup>[32-34]</sup>, 被广泛应用于全国和省区尺度主体功能区规划和国土空间规划资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”)中的土地资源评价<sup>[35-36]</sup>。徐勇等基于该方法的学术思想开发了能够反

映垂直方向上土地资源人类活动适宜性的分析框架,通过将随海拔和坡度变化的空气密度和坡地适建系数分别映射到地形高程和地形坡度上,以反映建设功能指向的人体生理适宜性和工程建设适宜性,有效解决了原方法中适宜性等级判定存在的主观性、缺乏最大高程限制等缺陷,使之能够直接应用到青藏高原等高海拔地区,并在高山峡谷典型地区藏东南米林县的实证应用中取得了很高的精度<sup>[37]</sup>。

厘清人类活动的适宜空间是青藏高原生态安全屏障建设的重要一环,也是第二次青藏高原综合科学考察研究的关键内容。当前关于青藏高原的研究主要关注生态环境变化及其人类活动效应,针对人类活动适宜性的研究成果很少。已有研究评价了青藏高原的耕地适宜性<sup>[38-39]</sup>和气候适宜性<sup>[40]</sup>,尚未有一个针对建设用地适宜性的完整评估,适宜人类定居和开展工矿活动的空间范围尚未得到科学论证。本文将土地资源人类活动适宜性评价方法模型拓展到青藏高原全域,通过构建融合了空间维度下适宜性格局刻画与时间维度下实际建设用地适应性过程分析的耦合研究框架,测算和分析青藏高原全域的建设用地适宜性及其空间分布格局,使用1990年、2000年、2010年和2020年的土地利用数据分析时间维度下实际建设用地对适宜性评价结果的适应性过程,进一步解析低适应建设用地的内部限制因素和影响机理,最后计算后备适宜建设用地潜力,所得结论可为青藏高原生态移民搬迁和生产力空间布局提供科学支撑。

## 2 研究区概况

青藏高原位于 $26^{\circ}00'12''\text{N}\sim 39^{\circ}46'50''\text{N}$ ,  $73^{\circ}18'52''\text{E}\sim 104^{\circ}46'59''\text{E}$ ,包括西藏自治区和青海省全部,四川省、甘肃省、新疆维吾尔自治区和云南省的部分地区,涉及213个县级行政单元,国土面积约258.23万 $\text{km}^2$ ,约占中国陆域总面积的26.9%。青藏高原处于中国地势第一级阶梯,73%的区域处于海拔4000 m以上,地势整体西北高东南低,分布有帕米尔—昆仑山地、藏北—青南高原、冈底斯山地、念青唐古拉山地、喜马拉雅山地、雅鲁藏布江谷地、横断山区、柴达木盆地、祁连山地和河湟谷地等重要地理单元,东南部横断山区地形起伏剧烈、山河相间、山高谷深,西北部藏北高原地势高耸,海拔多在5000 m以上,空气稀薄,地形相对平缓(图1a)。气候总体呈现干冷特征,年平均气温在 $-6\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间,年平均降水量在20~4500 mm之间,东南部的横断山区降水较为丰



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2022)4312号标准地图制作,底图边界无修改,下同。

图1 青藏高原地形高程与2020年土地利用类型空间分布

Fig. 1 Topographic elevation and spatial distribution of land use types on the Qinghai-Tibet Plateau in 2020



富,至西北部降水逐渐递减。植被类型以草地为主,占比超过60%,林地主要分布在藏东南和川西横断山区(图1b)。境内水系发育,湖泊冰川众多,是长江、黄河、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等大江大河的发源地,被誉为“中华水塔”。根据第七次全国人口普查数据,青藏高原常住人口约为1810万人,其中城镇人口约777万人,农村人口约1033万人,城镇化率约57.08%,人口密度约7人/km<sup>2</sup>。产业以牧业为主,青海河湟谷地和西藏“一江两河”地区(雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河)是主要的城镇和农业空间。随着人口增加、超载放牧以及工程建设等人类扰动的强度增大,青藏高原局部区域面临草地退化和动植物栖息地被破坏等生态问题。

### 3 研究方法 with 数据

#### 3.1 建设用地适宜性评价模型

**3.1.1 评价模型与关键参数** 尽管建设用地适宜性受到地质、水文、气候、地形、自然灾害和社会经济条件等诸多因素的影响<sup>[41]</sup>,但建设用地适宜性可归结为人体生理适宜性和开展建设活动的便利与难易程度两个基本方面,尤其是在青藏高原,高海拔带来的生理不适宜是建设活动的直接限制因素。徐勇等<sup>[37]</sup>构建的建设用地适宜性评价方法模型采用空气密度参数和坡地适建系数两个指标,其中空气密度参数由不同海拔高度上的标准化空气密度值与地形高程的一元一次函数拟合关系式计算得出,反映人体在不同海拔高度上的生理适宜性;坡地适建系数由坡地梯级化后实际建设用地面积与坡地垂直投影面积的比值与地形坡度的一元二次函数拟合关系式计算得出,反映不同地形坡度下开展建设活动的难易程度和成本高低,具体原理和测算方法见参考文献<sup>[42]</sup>。空气密度参数和坡地适建系数的乘积用于定量表达建设用地适宜性指数,公式为:

$$HA_b = \delta_{TE} \theta_{TS} \quad (1)$$

$$\delta_{TE} = 1.1822 - 0.0002TE \quad (2)$$

$$\theta_{TS} = 0.9904 - 0.0098TS - 0.0004TS^2 \quad (3)$$

式中:  $HA_b$  为建设用地适宜性指数;  $\delta_{TE}$  表示与不同地形高程  $TE$  对应的空气密度参数,  $TE \in [2000, 5000]$ ;  $\theta_{TS}$  表示与地形坡度  $TS$  对应的坡地适建系数,  $TS \in [0, 43]$ , 当  $TS > 43^\circ$  时,  $\theta_{TS} = 0$ 。空气密度参数和坡地适建系数均取对应地形高程和坡度等级的平均值。

**3.1.2 高程与坡度分级** 合理的地形高程和坡度分级是开展建设用地适宜性评价的前提和基础。根据不同海拔高度上人体生理反应的强弱差异,国际上通行以小于1500 m、1500~2500 m、2500~3500 m、3500~5800 m和大于5800 m将海拔高度划分为低海拔、中等度高海拔、高海拔、极高海拔和极端海拔5个等级<sup>[43]</sup>。现代医学研究也表明,2500 m基本对应慢性高山病发生的海拔下限,海拔2500 m以下发生高山病的概率很小<sup>[44]</sup>。海拔3000 m以上,人体机能开始受到慢性高山病的明显影响,并随着海拔的升高而增强,但高海拔适应过程(High Altitude Acclimatization)能够有效缓解其症状<sup>[43]</sup>。海拔4000 m以上患高原肺水肿和高原脑水肿等急性高山病的概率显著增加<sup>[45]</sup>。尽管人类永久性聚居点所处的最高海拔可能超过5000 m<sup>[46]</sup>,但就青藏高原而言,县城等规模性人类聚居点的最高海拔多在4500 m左右。

根据不同地形坡度下开展建设活动的难易程度和成本高低,通常以小于3°、3°~8°、8°~15°、15°~25°和大于25°将坡度划分为5个等级,在资源环境承载力评价<sup>[32-34]</sup>、主体功能区规划<sup>[36]</sup>、“双评价”<sup>[35]</sup>和后备适宜建设用地评价<sup>[47]</sup>等建设用地适宜性评价工作中得到广泛应用(表1)。坡度在3°以下与平地无异,最适宜开展规模性建设活动;坡度在3°~

表 1 现有建设用地适宜性评价实践的地形高程和坡度等级划分原则

Tab. 1 Topographic elevation and slope classification in the practical works of construction land suitability evaluation

类型	高程分级阈值(m)	坡度分级阈值(°)
灾后重建资源环境承载力评价	800、1200、1600、2000、2500、3000	3、5、8、10、15、25、30
主体功能区规划	500、1000、2000、3000	3、8、15、25
国土空间规划“双评价”	1000、2000、3000、4000	3、8、15、25
后备适宜建设用地评价	500、1000、2000、3000	3、8、15、25

8°之间开展建设活动会受到少量的地形限制；坡度在8°~15°之间开展建设活动的难度和成本显著增加，但坡地改造等工程措施能够降低地形限制的影响；坡度在15°以上已不适宜开展规模化的建设活动，通过工程措施可以少量布置居住用地；坡度在25°以上开展建设活动的工程难度很高，同时面临较大的水土流失风险，不宜作为建设用地<sup>[42]</sup>。

参考现有工作对地形高程和坡度的分级分类原则，将人类活动的生理适宜性以及开展建设活动的便利和难易程度关键阈值映射到高程和坡度分级中，同时兼顾模型计算效率和分级对等，以2000 m、2500 m、3000 m、3500 m、4000 m、4500 m和5000 m为间隔将青藏高原地形高程划分为8级，以3°、5°、8°、12°、15°、20°和25°为间隔将地形坡度划分为8级，在此基础上开展建设用地适宜性评价<sup>[48]</sup>。

### 3.2 实际建设用地适应性分析指标

**3.2.1 实际建设用地适应性指数** 实际建设用地适应性通过分析实际建设用地在不同适宜性等级中的分布状况，反映时间维度下实际建设用地扩张对建设用地适宜空间分布的响应过程。适应性越高，表明区域实际建设用地与建设用地适宜空间分布的适配程度越高，冲突性越低。由于建设用地适宜、较适宜和一般适宜等级能够较好支撑建设活动的开展，定义实际建设用地适应性指数为县级单元内处于建设用地适宜、较适宜和一般适宜等级中的实际建设用地面积与建设用地总面积的比值，公式为：

$$CA_i = \frac{CB_i}{C_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $CA_i$ 为实际建设用地适应性指数，从大到小等间距划分为适应性高、较高、中等、较低和低5个等级； $CB_i$ 表示县级单元*i*中处于建设用地适宜、较适宜和一般适宜等级中的实际建设用地面积； $C_i$ 表示县级单元*i*中的建设用地总面积。

**3.2.2 实际建设用地的垂直梯度指数** 在建设用地欠适宜和不适宜等级中开展建设活动不合理或合理性很低，实际建设用地表现为对适宜性评价结果的适应性较低和低。为定量解析其内在作用机理，参考建设用地爬坡指数的已有研究<sup>[49-50]</sup>，构建包含高程和坡度两个维度的实际建设用地垂直梯度指数。定义县级单元内处于建设用地欠适宜和不适宜两个等级中的实际建设用地逐栅格高程值之和与研究区处于这两个适宜性等级中所有建设用地逐栅格高程值总和的比值为高程梯度指数；同理，县级单元内处于建设用地欠适宜和不适宜两个等级中的实际建设用地逐栅格坡度值之和与研究区处于这两个适宜性等级中所有建设用地逐栅格坡度值总和的比值为坡度梯度指数，公式为：

$$RE_i = \frac{E_i}{\sum_1^n E_i} \times 100\% \quad (5)$$

$$RS_i = \frac{S_i}{\sum_1^n S_i} \times 100\% \quad (6)$$

式中： $RE_i$ 为第*i*个县级单元中实际建设用地的高程梯度指数； $RS_i$ 为第*i*个县级单元中实际建设用地的坡度梯度指数； $E_i$ 为第*i*个县级单元中实际建设用地的逐栅格高程值之

和;  $S_i$  为第  $i$  个县级单元中实际建设用地的逐栅格坡度值之和;  $n$  为县级单元数量。高程和坡度梯度指数越大, 表示该区域处于更高海拔或更大坡度的实际建设用地占比越高, 海拔或坡度的作用程度越剧烈, 在时间维度下能够刻画建设用地向更高海拔区域的抬升程度或向更大坡度区域的爬坡程度。

### 3.3 后备适宜建设用地潜力

后备适宜建设用地潜力是指适宜开发作为新增建设用地的土地资源面积, 其数量多寡和空间分布能够客观反映青藏高原未来人口与城镇化的承载能力和发展方向<sup>[51-53]</sup>。基于建设用地适宜性评价结果, 遵循生态优先和保护草原资源等原则, 以建设用地适宜、较适宜和一般适宜等级面积之和为评价基底, 扣除现有建设用地、耕地、林地、草地、水域和自然保护区, 将未利用地(扣除沼泽地和苔原两个三级地类)作为后备建设用地的主要来源, 最后得到后备适宜建设用地潜力, 公式为:

$$A = A_s - A_{cl} - A_{al} - A_f - A_g - A_{wb} - A_{nr} \quad (7)$$

$$A_p = A/P \quad (8)$$

式中:  $A$  为后备适宜建设用地面积;  $A_s$  为建设用地适宜性评价结果中的适宜、较适宜和一般适宜等级面积之和;  $A_{cl}$  为现有建设用地;  $A_{al}$  为耕地;  $A_f$  为林地;  $A_g$  为草地;  $A_{wb}$  为水域;  $A_{nr}$  为自然保护区;  $P$  为县级单元常住人口数量;  $A_p$  为县级单元人均后备适宜建设用地面积。

### 3.4 数据来源与处理

本文使用的数据主要包括地形、土地利用和行政区划数据等。地形高程采用NASADEM数字高程模型, 空间分辨率约为1弧秒(30 m), 将其重采样为100 m, 实验证明建设用地适宜性评价的适宜栅格精度为100 m<sup>[37]</sup>; 地形坡度基于NASADEM计算得到。垂直方向上不同高程对应的空气密度值来源于国际标准大气模型<sup>[54]</sup>。土地利用数据使用资源环境科学数据注册与出版系统(<https://www.resdc.cn>)的中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)<sup>[55]</sup>, 使用1990年(80年代末期)、2000年(90年代末期)、2010年和2020年共4期数据; 数据包含耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个一级地类, 共25个二级地类, 其中建设用地包含城镇建设用地、农村居民点用地和其他建设用地3个二级地类, 其他建设用地包含工矿用地、交通运输用地和特殊用地3个三级地类, 未利用地包含沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地以及高寒荒漠和苔原等三级地类, 涵盖了稀疏荒漠草地; 数据整体精度均在90%以上, 能够较好反映研究期内土地利用现势和人类活动状况, 是中国时序最长、应用最广泛的大尺度土地利用/覆被遥感监测数据集<sup>[56]</sup>。2020年县级单元常住人口数据来源于第七次人口普查分县资料<sup>[57]</sup>。青藏高原国家级、省级、市级和县级自然保护区空间分布范围来源于中国生态系统评估与生态安全数据库网站(<https://ecosystem.csdb.cn>)的自然保护区数据集。青藏高原行政区划数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>)的1:100万公众版基础地理信息数据, 整体现势性为2019年。青藏高原范围边界矢量数据来源于全球变化科学研究数据出版系统<sup>[58]</sup>。

## 4 结果分析

### 4.1 建设用地适宜性评价结果

将青藏高原地形高程和坡度进行空间叠加, 分别输入对应高程和坡度分级的空气密度参数 $\delta_{TE}$ 和坡地适建系数 $\omega_{TS}$ , 计算得出建设用地适宜性指数 $HA_b$ 。根据青藏高原人



类活动的空间分布特点, 结合不同海拔高度上人体生理变化的不同, 对不同适宜性等级的最大高程和最大坡度进行控制, 设定建设用地适宜性指数  $HA_b$  的分级阈值分别为 0.73、0.58、0.38 和 0.26, 将青藏高原建设用地适宜性划分为适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜 5 个等级。在以高程为  $Y$  轴, 坡度为  $X$  轴组成的平面直角坐标系中, 将建设用地适宜性等级与高程和坡度进行对应, 可得适宜、较适宜、一般适宜和欠适宜 4 个等级的最大控制高程分别为 2500 m、3000 m、4000 m 和 4500 m, 最大控制坡度分别为  $5^\circ$ 、 $12^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $20^\circ$  (图 2)。适宜等级中建设活动的开展基本不受限制; 较适宜等级中开展建设活动会受到轻微的限制, 其适宜性优势明显低于适宜等级; 一般适宜等级对于土地的建设用途总体具有中等程度的限制, 人体的生理适宜性明显降低, 建设活动的成本和难度明显增加; 欠适宜等级对于开展建设活动和维持土地的开发建设用途已具有较强的限制性, 在仅考虑经济因素的情况下欠适宜等级的建设用地适宜性勉强合理但不可持续; 不适宜等级中开展建设活动已受到严重的限制, 至少在当前的经济和技术条件下是不适宜的。

青藏高原建设用地适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜等级的面积分别为 0.33 万  $\text{km}^2$ 、10.42 万  $\text{km}^2$ 、18.06 万  $\text{km}^2$ 、24.12 万  $\text{km}^2$  和 205.29 万  $\text{km}^2$ , 分别占土地总面积的 0.13%、4.04%、7.00%、9.34% 和 79.50%。青藏高原建设用地适宜性的空间差异较大, 以不适宜等级为主, 能够较好支撑建设活动的适宜、较适宜和一般适宜等级面积仅占青藏高原总面积的 11.16% (图 3、表 2)。

(1) 建设用地适宜等级主要分布在西藏东南部的高山峡谷区和青海河湟谷地。西藏的适宜等级面积为 2047.22  $\text{km}^2$ , 占西藏土地总面积 0.17%, 分布在西藏东南部山南市和林芝市错那县、墨脱县和察隅县等的山间河谷平地; 该地区海拔在 2000 m 以下, 水分、热量和氧气含量充足, 但山高谷深, 地表起伏剧烈, 适宜等级用地极其破碎。青海的适宜等级面积为 979.21  $\text{km}^2$ , 占青海土地总面积 0.14%, 主要分布在西宁市和海东市的湟水谷地和黄河谷地。

(2) 建设用地较适宜等级主要分布在柴达木盆地、河湟谷地和藏南谷地的二级支流河谷地区。青海省海西州的柴达木盆地是青藏高原建设用地较适宜等级最大的集中连片区, 面积达 8.85 万  $\text{km}^2$ , 西宁市、海东市和海南州的共和盆地、黄河谷地和湟水谷地的较适宜等级面积合计 4498.48  $\text{km}^2$ , 青海省较适宜等级占土地总面积 13.47%。西藏的较适宜等级面积仅次于青海省, 面积为 4321.4  $\text{km}^2$ , 占西藏土地总面积 0.36%, 主要分布在藏东南林芝市和山南市错那县的雅鲁藏布江干流谷地及其二级支流河谷地区。

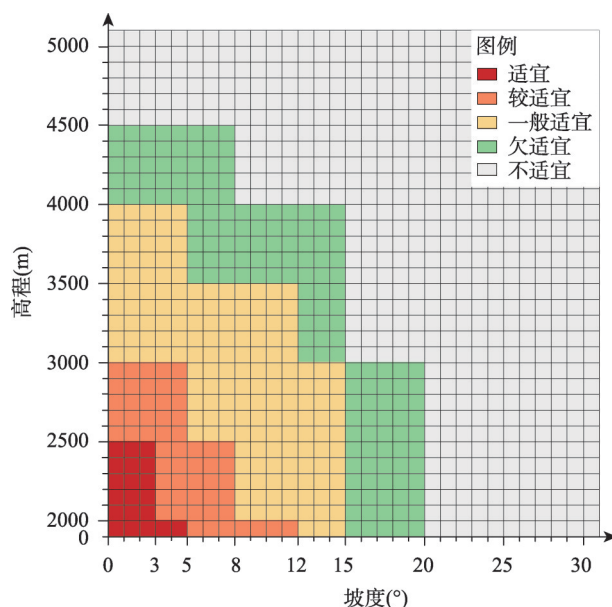


图 2 建设用地适宜性等级与高程和坡度的对应关系

Fig. 2 Relationship between the classes of construction land suitability and elevation and slope

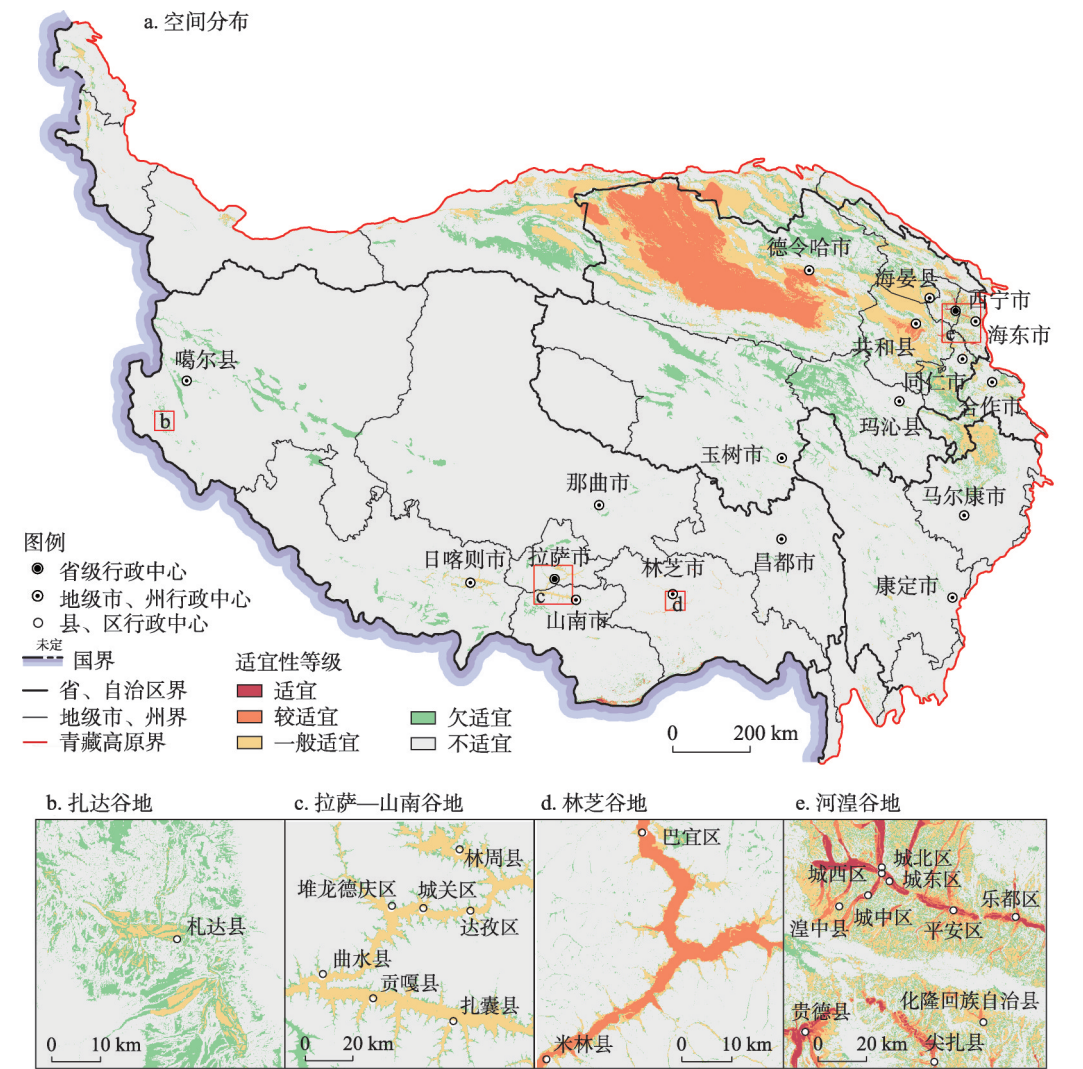


图3 青藏高原建设用地适宜性等级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of construction land suitability classes on the Qinghai-Tibet Plateau

表2 青藏高原建设用地适宜性等级面积

Tab. 2 Classes area of construction land suitability on the Qinghai-Tibet Plateau

区域	适宜等级		较适宜等级		一般适宜等级		欠适宜等级		不适宜等级		总面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )
	面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 (%)	
西藏	0.21	0.17	0.43	0.36	1.21	1.00	4.80	3.99	113.57	94.47	120.21
青海	0.10	0.14	9.36	13.47	9.79	14.09	11.29	16.24	38.95	56.06	69.48
四川	0.01	0.04	0.05	0.19	1.43	5.61	2.73	10.70	21.25	83.45	25.47
甘肃	0.00	0.04	0.36	3.81	2.71	28.99	1.68	17.95	4.60	49.20	9.35
云南	0.01	0.17	0.03	0.75	0.19	5.75	0.30	8.85	2.86	84.48	3.39
新疆	0.01	0.02	0.20	0.66	2.73	9.02	3.34	11.00	24.05	79.31	30.33
青藏高原	0.33	0.13	10.42	4.04	18.06	7.00	24.12	9.34	205.29	79.50	258.23



(3) 建设用地一般适宜等级分布范围较为广泛, 其中青海的一般适宜等级面积达 9.79 万 km<sup>2</sup>, 占青海土地总面积 14.09%, 主要分布在柴达木盆地及其与祁连山和昆仑山区的山间过渡地带、祁连山区的山间谷地、青海湖盆地、共和盆地以及河湟谷地等地区。甘肃的一般适宜等级面积 2.71 万 km<sup>2</sup>, 占甘肃土地总面积 28.99%, 主要分布在祁连山区和甘南山区的山间宽谷地区。新疆的一般适宜等级面积 2.73 万 km<sup>2</sup>, 占新疆土地总面积 9.02%, 主要分布在巴音郭楞州的阿尔金山和昆仑山区山间宽谷地区。四川的一般适宜等级面积 1.43 万 km<sup>2</sup>, 占四川土地总面积 5.61%, 主要分布在阿坝州的松潘高原地区以及横断山区山间沟谷地带。西藏的一般适宜等级面积 1.21 万 km<sup>2</sup>, 占西藏土地总面积 1.00%, 主要分布在日喀则谷地, 拉萨—山南谷地和藏东南雅鲁藏布江三级支流河谷。

(4) 建设用地欠适宜等级主要分布在青海省海西州的祁连山区、果洛州和玉树州的青南高原、新疆巴音郭楞州的昆仑山区、西藏阿里地区的冈底斯山、藏北高原、日喀则市的喜马拉雅山区以及川西高山峡谷地区等的山间谷地。青海的欠适宜等级面积最大, 西藏和新疆次之, 分别为 11.29 万 km<sup>2</sup>、4.80 万 km<sup>2</sup>和 3.34 万 km<sup>2</sup>, 分别占各自省区土地总面积 16.24%、3.99%和 11.00%。建设用地不适宜等级面积最大, 分布在青藏高原全域, 其中藏北—青南高原、帕米尔高原和昆仑山区以建设用地不适宜为主。

4.2 实际建设用地对适宜性评价结果的适应性

1990—2020 年青藏高原实际建设用地总面积分别为 1228.84 km<sup>2</sup>、1340.32 km<sup>2</sup>、2110.94 km<sup>2</sup>和 2633.48 km<sup>2</sup>, 分别占青藏高原土地总面积的 0.05%、0.05%、0.08%和 0.10%, 青藏高原建设用地总体呈不断增长趋势, 2000 年后明显加快。将 4 个时间点的实际建设用地与适宜性评价结果进行空间叠加后发现, 实际建设用地对建设用地适宜空间是高度适应的。1990—2020 年处于适宜、较适宜和一般适宜等级中的建设用地占比分别为 85.16%、85.93%、85.18%和 78.01%。1990—2010 年的实际建设用地适应性总体稳定在 85%左右, 但 2020 年较 2010 年显著下降, 表明近年来欠适宜和不适宜等级中的实际建设用地比例升高, 建设活动正加速向建设用地欠适宜和不适宜等级区域扩张 (表 3)。

1990—2020 年实际建设用地适应性表现出显著的空间异质性, 但其空间格局变化总体保持稳定 (图 4)。实际建设用地适应性指数在 80%以上的高适应性区县数量约占 1/3, 主要分布在阿尔金山—祁连山区、柴达木盆地、河湟谷地、甘南山区、松潘高原、西藏“一江两河”地区以及藏东南林芝谷地等地区, 这些区域是人类活动的主要承载地区, 建设用地主要分布在建设条件较好的盆地与河谷地带, 与适宜性评价结果具有高度的空间耦合性。川藏高山峡谷区的实际建设用地适应性空间差异极大, 表现为较高、中等和较低等级交错分布, 这与该区域建设用地主要受到地形起伏的强烈限制有关, 适宜开展建设活动的区域主要分布在深切河谷底部的冲积平地 and 海拔相对较低的夷平面地貌类型

表 3 1990—2020 年青藏高原不同适宜性等级中的实际建设用地面积

Tab. 3 Existing construction land area in suitability classes on the Qinghai-Tibet Plateau 1990-2020

年份	适宜等级		较适宜等级		一般适宜等级		欠适宜等级		不适宜等级		建设用地 总面积(km <sup>2</sup> )	总体适应性 (%)
	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)		
1990	148.48	12.08	434.33	35.34	463.63	37.73	97.23	7.91	85.16	6.93	1228.84	85.16
2000	159.10	11.87	490.22	36.57	502.38	37.48	100.08	7.47	88.54	6.61	1340.32	85.93
2010	200.10	9.48	949.38	44.97	648.73	30.73	170.52	8.08	142.21	6.74	2110.94	85.18
2020	240.30	9.12	826.47	31.38	987.72	37.51	324.09	12.31	254.90	9.68	2633.48	78.01

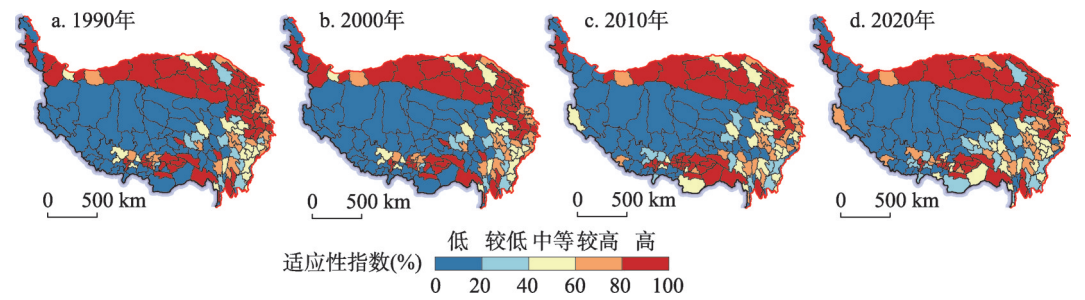


图4 1990—2020年青藏高原实际建设用地适应性指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of existing construction land adaptability index on the Qinghai-Tibet Plateau, 1990-2020

区，而实际建设用地更多分布在深切河谷两侧的大坡度山地，其对适宜性评价结果的适应性较低。藏北—青南高原、冈底斯山—念青唐古拉山区以及喜马拉雅山区的实际建设用地总体表现为低适应性，适应性指数低于20%的区县数量约占青藏高原区县总数的1/3，表明该区域实际建设用地主要分布在建设用地欠适宜或不适宜等级区域中。

4.3 实际建设用地对适宜性评价结果低适应的限制因素

1990—2020年青藏高原处于建设用地欠适宜和不适宜等级中的实际建设用地面积分别为182.39 km<sup>2</sup>、188.62 km<sup>2</sup>、312.74 km<sup>2</sup>和578.99 km<sup>2</sup>，分别占实际建设用地总面积的14.84%、14.07%、14.82%和21.99%，对建设用地适宜空间分布特点适应性低的实际建设用地呈不断增加趋势，2010年以后其扩张趋势明显增强（表4）。从细分用地类型来看，处于欠适宜和不适宜等级中的实际建设用地以农村居民点用地为主，其他建设用地次之，城镇建设用地的占比最小，表明对适宜性评价结果低适应的实际建设用地主要为农村居民点；从时间维度来看，处于欠适宜和不适宜等级中的农村居民点用地占比不断降低，从1990年的78%下降到2020年的41.46%，而城镇建设用地和其他建设用地的占比不断升高，分别从1990年的8.31%和13.17%上升到2020年的19.41%和39.13%，表明农村居民点用地虽然占据主要部分，但其时空格局相对稳定，而城镇建成区、工矿用地尤其交通运输用地等不断向更大坡度和更高海拔的区域扩张，且速率不断加快，也反映了青藏高原快速推进的城市化和工业化进程造成更多的建设用地突破适宜空间，其实际建设用地的低适应程度不断提高。

测算处于建设用地欠适宜和不适宜等级中的实际建设用地垂直梯度指数时，将高程和坡度梯度指数按0.1%、0.2%、0.5%和1%为阈值划分为低、较低、中等、较高和高5个等级，分析实际建设用地受高程和坡度限制的作用大小及其时空分布格局（图5）。

表4 1990—2020年青藏高原处于欠适宜和不适宜等级中的实际建设用地面积

Tab. 4 Existing construction land area in classes of marginally suitable and unsuitable on the Qinghai-Tibet Plateau, 1990-2020

年份	欠适宜等级						不适宜等级						建设用地 面积(km <sup>2</sup> )
	城镇建设用地		农村居民点用地		其他建设用地		城镇建设用地		农村居民点用地		其他建设用地		
	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	
1990	8.16	4.48	76.58	41.99	12.48	6.84	6.99	3.83	66.64	36.54	11.54	6.32	182.39
2000	9.59	5.08	78.01	41.36	12.49	6.62	7.96	4.22	68.52	36.32	12.06	6.39	188.62
2010	42.51	13.59	97.05	31.03	30.96	9.90	23.00	7.35	96.06	30.72	23.15	7.40	312.74
2020	75.10	12.97	123.25	21.29	125.75	21.72	37.26	6.44	116.83	20.18	100.81	17.41	578.99

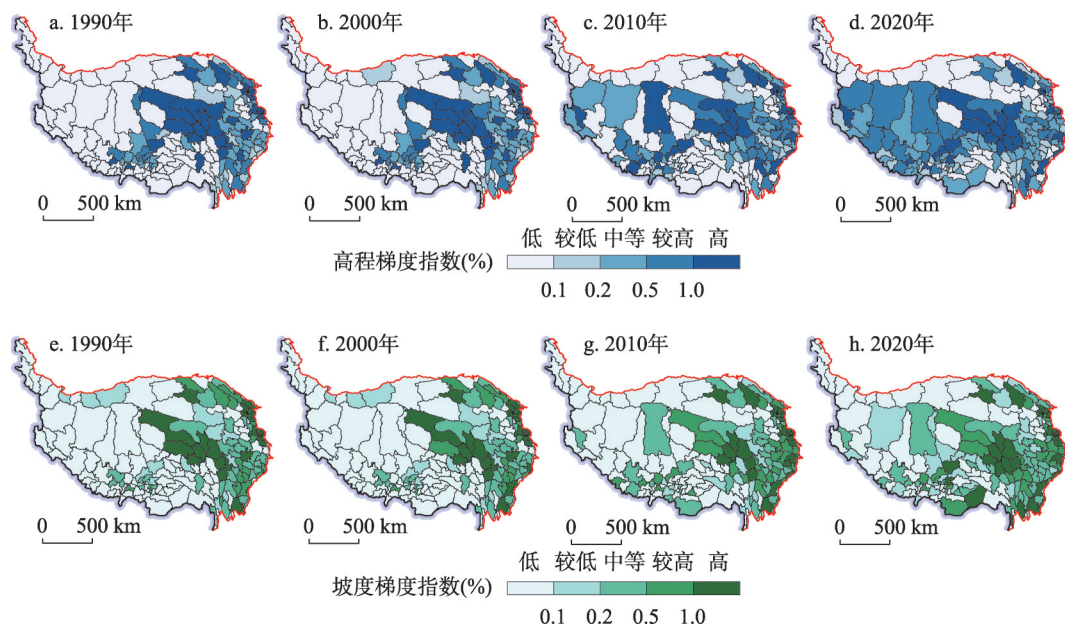


图5 1990—2020年青藏高原实际建设用地高程和坡度梯度指数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of elevation and slope vertical gradient of existing construction land on the Qinghai-Tibet Plateau, 1990-2020

1990—2020年青藏高原实际建设用地高程和坡度梯度指数大小及其空间分布范围均随时间的推移而逐渐增强。高程梯度指数中等水平及以上的区县数量由1990年的85个，占区县总数的41.87%，到2020年的105个，占比上升到51.72%；其中高程梯度指数高值区时空格局较为稳定，主要分布在青南高原的玉树州和果洛州，零散分布在祁连山区和川西横断山区等区域，而中等和较高水平区县由川西横断山区、祁连山区以及西藏“一江两河”周边区域向藏北高原、冈底斯山区以及喜马拉雅山区等高海拔地区扩张的趋势明显。坡度梯度指数中等水平及以上的区县数量由1990年的83个上升到2020年的105个，占比从40.89%上升到49.75%；其空间范围也由青南高原、川西横断山区、祁连山区、河湟谷地和甘南山区等区域向藏北高原、念青唐古拉山区和藏东南喜马拉雅山区等区域扩张，但其扩张趋势显著弱于高程梯度指数。总体来看，青南高原、川西横断山区和祁连山区的实际建设用地受到高程和坡度的双重限制，表明这些区域实际建设用地对适宜性评价结果低适应的原因来自于高海拔和大坡度两个方面；藏北高原、冈底斯山区和喜马拉雅山区的实际建设用地对适宜性评价结果低适应的原因主要为高海拔的强烈限制，而坡度的贡献程度相对较低。

#### 4.4 后备适宜建设用地潜力

使用2020年的土地利用数据和县级单元常住人口数据测算青藏高原后备适宜建设用地潜力和县级单元人均潜力面积（图6、表5）。青藏高原后备适宜建设用地面积为124143.86 km<sup>2</sup>，占青藏高原总面积的4.81%，其中适宜、较适宜和一般适宜等级面积分别为38.77 km<sup>2</sup>、60376.56 km<sup>2</sup>和63728.53 km<sup>2</sup>，分别占后备适宜建设用地总面积的0.03%、48.63%和51.33%，青藏高原潜在可开发利用的建设用地以一般适宜和较适宜等级为主，人均后备适宜建设用地面积9928 m<sup>2</sup>/人。从空间分布来看，后备适宜建设用地主要分布在青海省，面积达95947 km<sup>2</sup>，占后备适宜建设用地总面积的77.29%，人均面



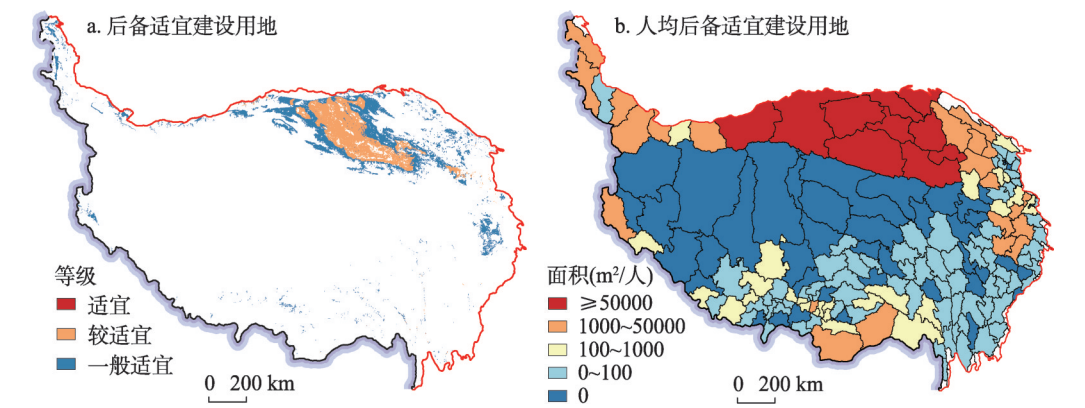


图6 2020年青藏高原后备适宜建设用地与人均面积空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of reserve suitable construction land and area per capita on the Qinghai-Tibet Plateau in 2020

表5 2020年青藏高原后备适宜建设用地等级面积与人均面积

区域	适宜等级		较适宜等级		一般适宜等级		后备适宜建设	人均后备适宜建设
	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)	用地面积(km <sup>2</sup> )	用地面积(m <sup>2</sup> /人)
西藏	21.92	4.72	10.07	2.17	432.52	93.11	464.50	130
青海	1.60	0.00	57430.37	59.86	38515.03	40.14	95947.00	17143
四川	0.17	0.01	1.77	0.09	1863.58	99.90	1865.52	925
甘肃	2.25	0.02	2290.03	19.57	9412.40	80.42	11704.69	18593
云南	0.15	0.79	0.61	3.25	17.94	95.96	18.69	39
新疆	12.68	0.09	643.72	4.55	13487.06	95.36	14143.46	69146
青藏高原	38.77	0.03	60376.56	48.63	63728.53	51.33	124143.86	9928

积达到17143 m<sup>2</sup>/人；柴达木盆地的后备适宜建设用地呈现空间上的集中连片，人均面积在50000 m<sup>2</sup>/人以上，后备适宜建设用地资源十分丰富，可大力开展光伏发电和风力发电等清洁能源建设；共和盆地后备适宜建设用地资源较为丰富，共和县的后备适宜建设用地面积为2226.69 km<sup>2</sup>，人均面积达到16691 m<sup>2</sup>/人，同时工农业基础较好，在进行沙化土地整治和建设引水工程之后可作为三江源国家公园生态移民搬迁的重要安置地。西藏的后备适宜建设用地面积仅有464.50 km<sup>2</sup>，人均面积仅为130 m<sup>2</sup>/人，主要零星分布在藏东南的山间谷地以及山南雅鲁藏布江谷地，可开发利用的后备适宜建设用地资源十分缺乏；其中雅鲁藏布江山南宽谷段可开发利用条件较好，在解决沙化土地整治和配套引水工程的条件下可满足藏北高原生态移民安置的需求。

## 5 讨论

### 5.1 与已有研究对比

主体功能区划和国土空间规划作为中国正在实施的国家战略和制度，其关于城镇建设功能指向的土地资源评价方法是开展国土资源评价的重要基础性工具，直接关系到国土空间生产力布局和优化<sup>[59-60]</sup>。徐勇等<sup>[37]</sup>从科学机理和逻辑层面对比了本文使用的建设用地适宜性评价方法与主体功能区划中的可利用土地资源评价、国土空间规划“双评价”

中的城镇建设功能指向土地资源评价方法之间的差异和优缺点，有必要进一步对基于3种方法的青藏高原全域评价结果进行比较和验证。

根据《主体功能区划技术规程》测算得到青藏高原可利用土地资源等级类型<sup>[36]</sup>，根据《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法指南》测算得到青藏高原城镇建设功能指向的土地资源等级类型如图7。结果发现，在不使用其他因素修正的情况下，基于主体功能区划测算方法的可利用与不可利用土地资源类型面积分别为70.65万 km<sup>2</sup>和188.18万 km<sup>2</sup>，可利用类型面积明显偏大，占青藏高原总面积的27.33%，藏北—青南高原的大片高海拔区域被划分为可利用土地类型，这些区域明显是不适宜开展永久性人类活动的。基于“双评价”方法测算的城镇土地资源评价结果优于主体功能区划，高、较高、中等、较低和低等级面积分别为9.55万 km<sup>2</sup>、11.69万 km<sup>2</sup>、46.85万 km<sup>2</sup>、33.57万 km<sup>2</sup>和157.16万 km<sup>2</sup>，高和较高两个等级的空间分布与本文的评价结果相似度较高，但中等级面积较大，占青藏高原总面积的18.12%，同样存在不适宜人类活动的藏北—青南高原等高海拔地区被划分为中等和较低等级。总的来看，主体功能区划中的土地资源可利用类型、“双评价”中的土地资源中等和较高等级均存在高估的情况，其原因在于二者的评价方法和框架主要面向中国中东部的低海拔地区，以坡度作为判断建设用地适宜性的主要限制因素，海拔高程的重要程度较低，而这在青藏高原地区是不适用的。3种评价方法的实测数据验证了主体功能区规划和“双评价”中的建设用地适宜性评价方法在青藏高原高海拔地区存在机理性缺陷<sup>[37]</sup>，也证明了本文使用的评价方法更能反映青藏高原的实际情况。在青藏高原相关省区开展国土空间规划实践要重点关注海拔高程对土地资源评价结果造成的误差影响。

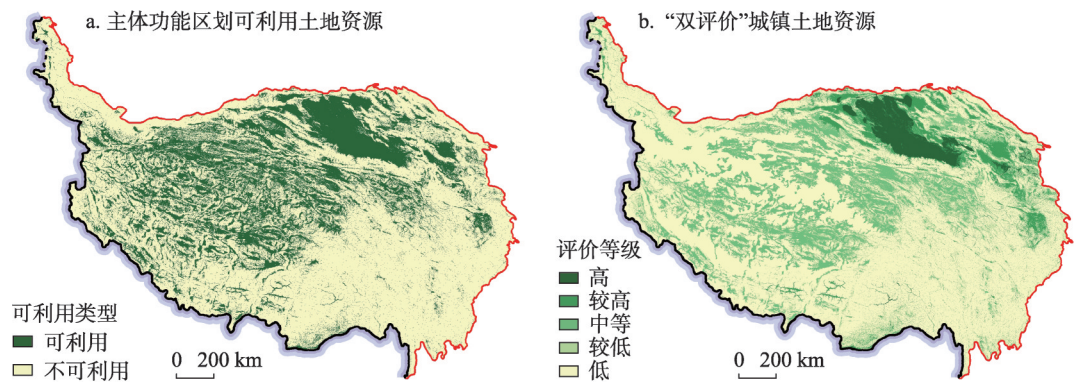


图7 青藏高原主体功能区划与“双评价”的建设用地适宜性评价结果

Fig. 7 Assessment results of construction land suitability in Major Function Zoning and Double Evaluations on the Qinghai-Tibet Plateau

5.2 关于本文评价方法应用的补充说明

本文得出的青藏高原建设用地适宜性是从土地资源角度开展的基础性评价，其适用范围包括城镇村建设用地、工业建设用地以及光伏电站和风电厂建设选址等，在实际应用中还需根据用地类型的不同综合考虑可利用水资源量和用水条件，地质环境稳定性等工程地质条件以及滑坡、泥石流等地质次生灾害等多种要素对适宜性评价结果进行修订。在中小尺度区域的应用中还可进一步提高分析精度，如在高山峡谷区采用更高分辨率的地形高程数据和更精细的高程坡度分级等。需要注意的是，限于多源土地利用数据的分类和精度不一致，使用不同来源的土地利用数据测算后备适宜建设用地潜力的结果也会有所差异，本文的测算结果可为后续研究提供有益参考；在实际应用中需根据

分析尺度和精度要求选取基础数据, 中小尺度区域的评价宜选用自然资源部门的土地利用现状调查矢量数据。

基于建设用地适宜性评价结果对处于高海拔和大坡度地区的建设用地搬迁, 还需考虑到佛教寺院等特殊用地和交通运输用地的特殊性。藏传佛教建筑呈现典型的宗山式或山崖式建筑群落风格, 其空间分布偏好依山而建, 用地的坡度很大, 同时其分布海拔也普遍高于通常的城镇村聚居区。交通运输用地由于其用地性质具有特殊性, 其受人体生理适宜性和工程建设难易程度的限制弱于城镇村建设用地。因此, 在开展生态移民搬迁的实际应用中应结合土地利用调查数据和遥感影像进行综合判定, 合理扣除特殊用地和交通运输用地。

## 6 结论与政策建议

### 6.1 主要结论

本文测算和划分了青藏高原建设用地适宜性等级, 分析了1990—2020年实际建设用地对适宜性评价结果的适应性, 解析了低适应性实际建设用地的时空差异及其垂直梯度变化特征, 测算了后备适宜建设用地潜力, 主要结论如下:

(1) 青藏高原建设用地适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜等级面积分别为0.33万 $\text{km}^2$ 、10.42万 $\text{km}^2$ 、18.06万 $\text{km}^2$ 、24.12万 $\text{km}^2$ 和205.29万 $\text{km}^2$ , 分别占土地总面积的0.13%、4.04%、7.00%、9.34%和79.50%。青藏高原建设用地适宜性以不适宜等级为主, 能够较好支撑人类活动的适宜、较适宜和一般适宜等级面积仅占总面积的11.16%, 主要分布在柴达木盆地、河湟谷地、共和盆地、松潘高原、日喀则谷地、拉萨—山南谷地以及林芝谷地等区域。

(2) 实际建设用地适应性指数总体较高且空间差异明显。1990—2020年青藏高原实际建设用地适应性指数分别为85.16%、85.93%、85.18%和78.01%, 平均适应性在80%以上, 青藏高原实际建设用地对建设用地适宜空间是高度适应的。适应性指数在80%以上的高适应区县数量占比超过1/3, 主要分布在阿尔金山—祁连山区、柴达木盆地、河湟谷地、甘南山区、松潘高原、西藏“一江两河”地区(雅鲁藏布江、拉萨河与年楚河)以及藏东南林芝谷地等区域; 川藏高山峡谷区的适应性指数总体表现为较高、中等和较低等级交错分布, 空间差异较大; 藏北—青南高原、冈底斯山—念青唐古拉山区以及喜马拉雅山区的实际建设用地以低适应性为主。

(3) 对适宜性评价结果低适应的实际建设用地存在地类差异, 其垂直梯度效应具有显著的时空差异性。1990—2020年青藏高原对适宜性评价结果低适应的实际建设用地主要为农村居民点, 其他建设用地次之, 城镇建设用地的占比最小, 但城镇建设用地和其他建设用地的占比随时间快速升高。实际建设用地的高程和坡度梯度指数逐渐增强, 空间分布范围不断扩大, 青南高原、川西高山峡谷区和祁连山区的实际建设用地受到高程和坡度的双重限制, 而藏北高原、冈底斯山区和喜马拉雅山区的主要限制因素为海拔。

(4) 青藏高原后备适宜建设用地面积为12.41万 $\text{km}^2$ , 占青藏高原总面积的4.81%, 以较适宜和一般适宜等级为主, 适宜等级面积很小, 人均后备适宜建设用地面积为9928 $\text{m}^2$ /人。柴达木盆地后备适宜建设用地资源最为丰富, 能够支撑大规模工矿和清洁能源基础设施建设; 共和盆地和山南雅鲁藏布江谷地可分别作为三江源和藏北高原地区生态移民搬迁的优先安置区。



## 6.2 政策建议

极高海拔和地形起伏剧烈地区的建设用地扩张不仅增加了脆弱人群暴露在高寒缺氧环境下的风险比例,导致区域交通及公共服务基础设施的配置成本显著增加,同时也造成生态环境的破坏和退化,社会经济发展与生态保护的矛盾凸显。为了解决这一难题,西藏自治区于2018年开展了极高海拔地区生态搬迁,将极高海拔地区的人口整体搬迁至更适宜人类生活的雅鲁藏布江沿岸<sup>[61]</sup>。然而,生态移民搬迁的区域、规模和安置方向等关键问题尚未有一个科学的回答。本文根据实际建设用地适应性和后备适宜建设用地潜力分析结果,提出藏北高原—山南雅江谷地远程移民搬迁、三江源地区—共和盆地远程移民搬迁、川藏高山峡谷区近程搬迁3种生态移民搬迁模式。

藏北高原—山南雅江谷地远程移民搬迁涉及改则县、措勤县、尼玛县、申扎县、班戈县、双湖县、安多县7个县,总人口18.70万人,牧民人口14.30万人;山南雅江谷地在完成土地综合开发、河道整治和水利工程配套的基础上具备7万~9万人的安置潜力。三江源地区—共和盆地远程移民搬迁涉及曲麻莱县、杂多县和治多县,总人口13.64万人,牧民人口5.86万人;共和盆地配合黄河上游水电梯级开发建设引水工程,在解决水资源问题的基础上,具备5万~10万人的安置潜力。川藏高山峡谷区采用“从山上到山下”的近程搬迁模式,将处于高海拔地区和大坡度河谷两侧坡地的人口逐步就近集中搬迁安置在海拔较低且相对平坦开阔的河谷滩地。

## 参考文献(References)

- [1] Chen F H, Dong G H, Zhang D J, et al. Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 BP. *Science*, 2015, 347(6219): 248-250.
- [2] Yang C, Liu H Z, Li Q Q, et al. Human expansion into Asian highlands in the 21st century and its effects. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4955. DOI: 10.1038/s41467-022-32648-8.
- [3] Li S C, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276-286.
- [4] Villafuerte F C, Corante N. Chronic mountain sickness: Clinical aspects, etiology, management, and treatment. *High Altitude Medicine & Biology*, 2016, 17(2): 61-69.
- [5] Bhatnagar A. Environmental determinants of Cardiovascular disease. *Circulation Research*, 2017, 121(2): 162-180.
- [6] Mallet R T, Burtcher J, Richalet J P, et al. Impact of high altitude on Cardiovascular health: Current perspectives. *Vascular Health and Risk Management*, 2021, 17: 317-335.
- [7] Zhou M G, Wang H D, Zeng X Y, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990-2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 2019, 394(10204): 1145-1158.
- [8] Zhou Kan, Wang Chuansheng. Spatial-temporal pattern of poverty-stricken areas and its differential policies for poverty alleviation in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(1): 101-111. [周侃, 王传胜. 中国贫困地区时空格局与差别化脱贫政策研究. *中国科学院院刊*, 2016, 31(1): 101-111.]
- [9] Fang Chuanglin. Special thinking and green development path of urbanization in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(8): 1907-1919. [方创琳. 青藏高原城镇化发展的特殊思路与绿色发展路径. *地理学报*, 2022, 77(8): 1907-1919.]
- [10] Food and Agriculture Organization of the United Nations. A Framework for Land Evaluation. Rome: FAO Soils bulletin 32, 1976.
- [11] Collins M G, Steiner F R, Rushman M J. Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements. *Environmental Management*, 2001, 28(5): 611-621.
- [12] Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview. *Progress in Planning*, 2004, 62(1): 3-65.
- [13] Akpoti K, Kabo-Bah A T, Zwart S J. Agricultural land suitability analysis: State-of-the-art and outlooks for integration of climate change analysis. *Agricultural Systems*, 2019, 173: 172-208.
- [14] Liu R Z, Zhang K, Zhang Z J, et al. Land-use suitability analysis for urban development in Beijing. *Journal of Environmental Management*, 2014, 145: 170-179.

- [15] Zhang X R, Fang C L, Wang Z B, et al. Urban construction land suitability evaluation based on improved multi-criteria evaluation based on GIS (MCE-GIS): Case of New Hefei City, China. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(6): 740-753.
- [16] Romano G, Dal Sasso P, Trisorio Liuzzi G, et al. Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of southern Italy. *Land Use Policy*, 2015, 48: 131-143.
- [17] Zhang Haipeng, He Renwei, Liu Yunwei, et al. Land suitability evaluation and reconstruction of settlements in the pastoral area of Tibetan Plateau: A case study of Nagqu county in northern Tibet. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 698-712. [张海朋, 何仁伟, 刘运伟, 等. 青藏高原高寒牧区聚落地适宜性评价及其重构: 以藏北那曲县为例. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 698-712.]
- [18] Amirshenava S, Osanloo M. Mined land suitability assessment: A semi- quantitative approach based on a new classification of post-mining land uses. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2021, 35(10): 743-763.
- [19] Gouareh A, Settou B, Settou N. A new geographical information system approach based on best worst method and analytic hierarchy process for site suitability and technical potential evaluation for large-scale CSP on-grid plant: An application for Algeria territory. *Energy Conversion and Management*, 2021, 235: 113963. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.113963.
- [20] Ayodele T R, Ogunjuyigbe A S O, Odigie O, et al. A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Applied Energy*, 2018, 228: 1853-1869.
- [21] Malczewski J. GIS- based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, 20(7): 703-726.
- [22] Greene R, Devillers R, Luther J E, et al. GIS-based multiple-criteria decision analysis. *Geography Compass*, 2011, 5(6): 412-432.
- [23] Ustaoglu E, Aydinoglu A C. Suitability evaluation of urban construction land in Pendik district of Istanbul, Turkey. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104783. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104783.
- [24] Malczewski J. Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, 8(4): 270-277.
- [25] Steiner F, McSherry L, Cohen J. Land suitability analysis for the upper Gila River watershed. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 50(4): 199-214.
- [26] Luan C X, Liu R Z, Peng S C. Land-use suitability assessment for urban development using a GIS-based soft computing approach: A case study of Ili Valley, China. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107333. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107333.
- [27] Bamrungkhul S, Tanaka T. The assessment of land suitability for urban development in the anticipated rapid urbanization area from the Belt and Road Initiative: A case study of Nong Khai City, Thailand. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 83: 103988. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103988.
- [28] Saxena A, Jat M K. Land suitability and urban growth modeling: Development of SLEUTH-suitability. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2020, 81: 101475. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101475.
- [29] Kang Z Q, Wang S, Xu L, et al. Suitability assessment of urban land use in Dalian, China using PNN and GIS. *Natural Hazards*, 2021, 106: 913-936.
- [30] Nguyen T T, Verdoodt A, Van Y T, et al. Design of a GIS and multi-criteria based land evaluation procedure for sustainable land-use planning at the regional level. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 1-11.
- [31] Fu Bojie. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1052-1059. [傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059.]
- [32] Fan Jie. Post-Lushan Earthquake Restoration and Reconstruction: Resource Environment Carrying Capacity Evaluation. Beijing: Science Press, 2014. [樊杰. 芦山地震灾后恢复重建资源环境承载能力评价. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [33] Fan Jie. Post-Yushu Earthquake Restoration and Reconstruction: Resource Environment Carrying Capacity Evaluation. Beijing: Science Press, 2010. [樊杰. 玉树地震灾后恢复重建资源环境承载能力评价. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [34] Fan Jie. State Planning for Post- Wenchuan Earthquake Restoration and Reconstruction: Resource Environment Carrying Capacity Evaluation. Beijing: Science Press, 2009. [樊杰. 国家汶川地震灾后重建规划资源环境承载能力评价. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [35] Fan Jie. Assessment Guidelines for Resource and Environmental Carrying Capacity and Territorial Development Suitability. Beijing: Science Press, 2019. [樊杰. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法指南. 北京: 科学出版社, 2019.]

出版社, 2019.]

- [36] Fan Jie. Technical Regulation for Major Function Zoning. Beijing: Science Press, 2019. [樊杰. 主体功能区划技术规范. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [37] Xu Yong, Wang Lijia, Yang Hua. Evaluation method and empirical application of human activity suitability of land resources in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1615-1633. [徐勇, 王丽佳, 杨华. 青藏高原土地资源人类活动适宜性评价方法及实证应用. *地理学报*, 2022, 77(7): 1615-1633.]
- [38] Jin Gui, Wang Zhanqi, Li Weisong, et al. Suitable evaluation on cultivated land based on Fuzzy weights of evidence method in the Yarlung Zangbo River, Nyangqu River and Lhasa River region, Tibet. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(7): 1246-1256. [金贵, 王占岐, 李伟松, 等. 模糊证据权法在西藏一江两河流域耕地适宜性评价中的应用. *自然资源学报*, 2014, 29(7): 1246-1256.]
- [39] Yao M L, Shao D G, Lv C H, et al. Evaluation of arable land suitability based on the suitability function: A case study of the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147414. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147414.
- [40] Liu J H, Xin Z B, Huang Y Z, et al. Climate suitability assessment on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151653. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151653.
- [41] Wu Zhiqiang, Li Dehua. Principles of Urban Planning. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. [吴志强, 李德华. 城市规划原理. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.]
- [42] Xu Yong, Zhao Shen, Fan Jie. Urban planning construction land standard and its revision of climate and topography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 194-208. [徐勇, 赵桑, 樊杰. 中国城市规划建设用地标准及气候和地形地貌修订. *地理学报*, 2020, 75(1): 194-208.]
- [43] Barry P W, Pollard A J. Altitude illness. *BMJ-British Medical Journal*, 2003, 326(7395): 915-919.
- [44] Leon-Velarde F, Maggiorini M, Reeves J T, et al. Consensus statement on chronic and subacute high altitude diseases. *High Altitude Medicine & Biology*, 2005, 6(2): 147-157.
- [45] Bärtsch P, Saltin B. General introduction to altitude adaptation and mountain sickness. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2008, 18(Suppl.1): 1-10.
- [46] West J B. Highest permanent human habitation. *High Altitude Medicine & Biology*, 2002, 3(4): 401-407.
- [47] Xu Y, Tang Q, Fan J, et al. Assessing construction land potential and its spatial pattern in China. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 207-216.
- [48] Yang Hua, Xu Yong, Wang Lijia. Evaluation method and empirical application of construction land suitability and arable land suitability in alpine-gorge region of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Nyingchi city. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(5): 1283-1299. [杨华, 徐勇, 王丽佳. 青藏高原高山峡谷区建设用地和耕地适宜性评价方法及应用: 以林芝市为例. *自然资源学报*, 2023, 38(5): 1283-1299.]
- [49] Zhou Liang, Dang Xuewei, Zhou Chenghu, et al. Evolution characteristics of slope spectrum and slope-climbing effects of built-up land in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1747-1762. [周亮, 党雪薇, 周成虎, 等. 中国建设用地的坡谱演化规律与爬坡影响. *地理学报*, 2021, 76(7): 1747-1762.]
- [50] Peng Qiuzhi, Ma Shaohua, Deng Qihui, et al. Relationship between construction land and slope in rapidly expanding mountain cities: A case study in Guiyang, China. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1865-1875. [彭秋志, 马少华, 邓启辉, 等. 山地城市建设用地增长的坡度梯度效应: 以贵阳市为例. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1865-1875.]
- [51] Dang L J, Xu Y, Tang Q. The pattern of available construction land along the Xijiang River in Guangxi, China. *Land Use Policy*, 2015, 42: 102-112.
- [52] Xu Xiaoren, Xu Yong. Potential of available construction land in the Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(12): 1789-1796. [徐小任, 徐勇. 长江经济带后备适宜建设用地潜力. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(12): 1789-1796.]
- [53] Xu Xiaoren, Wang Liang, Xu Yong, et al. Evaluation of reserve available land resources based on three types of territorial space: A case study of Jiexiu city in Shanxi province. *Progress in Geography*, 2021, 40(2): 272-282. [徐小任, 王梁, 徐勇, 等. 基于“三类”空间的后备可利用土地资源评价研究: 以山西省介休市为例. *地理科学进展*, 2021, 40(2): 272-282.]
- [54] Technical Committee ISO/TC 20. Standard Atmosphere: ISO 2533: 1975. Geneva: International Organization for Standardization, 1975.
- [55] Liu Jiyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]



- [56] Xu Xinliang, Liu Jiyan, Zhang Shuwen, et al. Remote sensing monitoring data of land use in China. Data Registration and Publishing System of the Resource and Environmental Science Data Center of the Chinese Academy of Sciences (<http://www.resdc.cn/DOI>). DOI: 10.12078/2018070201. [徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>). DOI: 10.12078/2018070201.]
- [57] Office of the Leading Group of the State Council for the Seventh National Population Census. Tabulation on 2020 China Population Census by County. Beijing: China Statistics Press, 2022. [国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 中国人口普查分县资料2020. 北京: 中国统计出版社, 2022.]
- [58] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. Datasets of the boundary and area of the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(Suppl.1): 65-68. [张懿锂, 李炳元, 郑度. 《论青藏高原范围与面积》一文数据的发表: 青藏高原范围界线与面积地理信息系统数据. 地理学报, 2014, 69(增刊1): 65-68.]
- [59] General Office of the State Council of the People's Republic of China. Major Function Oriented Zoning of China. [http://www.gov.cn/zwgk/2011-06/08/content\\_1879180.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2011-06/08/content_1879180.htm), 2022-06-08/2023-03-23. [国务院. 全国主体功能区规划. [http://www.gov.cn/zwgk/2011-06/08/content\\_1879180.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2011-06/08/content_1879180.htm), 2022-06-08/2023-03-23.]
- [60] Xinhua News Agency. Several Opinions on Establishing a National Territorial Spatial Planning System and Supervising Its Implementation of the General Office of the Communist Party of China Central Committee and General Office of the State Council of the People's Republic of China. [http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content\\_5394187.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm), 2019-05-23/2023-03-23. [新华社. 中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见. [http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content\\_5394187.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm), 2019-05-23/2023-03-23.]
- [61] Xinhua News Agency. The migration of life across half a century: Tibet's ecological migration in extremely high-altitude to solve the problem of coexistence between human and nature. [http://www.xinhuanet.com/politics/2020-03/17/c\\_1125726595.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2020-03/17/c_1125726595.htm), 2020-03-17/2023-03-23. [新华社. 跨越半个世纪的生命迁徙: 西藏极高海拔生态搬迁破解人与自然共生难题. [http://www.xinhuanet.com/politics/2020-03/17/c\\_1125726595.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2020-03/17/c_1125726595.htm), 2020-03-17/2023-03-23.]

## Evaluation of suitability, adaptability, and reserve potential of construction land on the Qinghai-Tibet Plateau

YANG Hua<sup>1,2</sup>, XU Yong<sup>1,2</sup>, ZHOU Kan<sup>1,2</sup>, WANG Lijia<sup>1,2</sup>, XU Lin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Construction land is the main carrier of human activities such as production and living. Conducting the suitability evaluation of construction land on the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) holds the significant implications for harmonizing the relationship between ecological preservation and human activities, as well as promoting the optimization of population and industrial spatial layout. However, there are no relevant studies which provide a complete assessment of the construction land suitability (CLS) on the QTP. In this paper, we developed a model-based CLS assessment framework coupling of patterns and processes to calculate the CLS across the entire QTP based on the CLS evaluation model. Then, using the land-use data of 1990, 2000, 2010, and 2020, we examined the adaptability of existing construction land to the assessment result of CLS through the adaptability index and vertical gradient index, and further analyzed the internal limiting factors of maladaptive construction land. Finally, we calculated the potential of reserve suitable construction land. This article includes four conclusions: (1) The area of CLS classes, including highly suitable, suitable, moderately

suitable, marginally suitable, and unsuitable, are  $0.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,  $10.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,  $18.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,  $24.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ , and  $205.29 \times 10^4 \text{ km}^2$ , respectively, accounting for 0.13%, 4.04%, 7.00%, 9.34%, and 79.50% of the total land area, respectively, with the unsuitable class being predominant. The highly suitable, suitable, and moderately suitable classes are mainly distributed in regions such as the Qaidam Basin, Yellow River- Huangshui River Valley, Gonghe Basin, Songpan Plateau, Shigatse Valley, Lhasa-Shannan Valley, and Nyingchi Valley. (2) The construction land adaptability index are 85.16%, 85.93%, 85.18%, and 78.01% in 1990, 2000, 2010, and 2020, respectively, with an average adaptability index exceeding 80% on the QTP. The distribution of existing construction land generally conforms to the characteristics of construction land suitable space, but with a significant spatial difference. (3) From 1990 to 2020, the mal-adaptive and low-adaptive construction land on the QTP is mainly composed of rural residential land, transportation land, and special land, the proportions of urban construction land and other construction land are rapidly increasing. The vertical gradient of elevation and slope of construction land have gradually strengthened, and the spatial extent has expanded. Construction land in the southern Qinghai Plateau, western Sichuan alpine canyon region, and Qilian Mountains is subjected to constraints of both elevation and slope, while the main limiting factor in the northern Tibetan Plateau, Gangdise Mountains, and Himalayan Mountains is elevation. (4) The potential area of reserve suitable construction land on the QTP is  $12.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ , constituting 4.81% of the total land area, with suitable and moderately suitable classes dominant. The per capita potential area of reserve suitable construction land is  $9928 \text{ m}^2/\text{person}$ . The Qaidam Basin has the richest reserve of suitable construction land, while the Gonghe Basin and Lhasa-Shannan Valley can serve as preferred destinations for ecological migration. The research results can provide decision-making references for ecological migration and optimizing the spatial distribution of human activities on the QTP.

**Keywords:** land resource; construction land suitability; existing construction land adaptability; human activity; Qinghai-Tibet Plateau