

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

杨 华^{1,2}, 徐 勇^{1,2}, 王丽佳^{1,2}

(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: 青藏高原是中国乃至亚洲的重要生态屏障区, 进行建设用地和耕地适宜性评价对于青藏高原生态保护、严格人类活动空间具有重要意义。针对中国现行建设用地和耕地适宜性评价方法在高海拔地区应用中存在的不足, 分别构建了适用于青藏高原高山峡谷区的建设用地和耕地适宜性评价模型, 提出了空气密度、坡地适建、气温和土壤抗蚀四个控制参数测算方法; 以 100 m 间隔高程分级和 1° 间隔坡度分级为基准情景, 选择林芝市为典型案例开展实证应用研究, 并对两种增大高程和坡度间隔分级情景进行论证。结果表明: (1) 林芝市建设用地和耕地适宜性均以不适宜为主体, 不适宜区面积占土地总面积比例分别为 87.48% 和 87.42%, 欠适宜区比例分别为 5.58% 和 4.58%, 适宜、较适宜和一般适宜区的面积之和和占比分别仅为 6.94%、7.60%; (2) 基准情景下建设用地和耕地适宜性评价结果与现状建设用地和耕地的适配效果较好, 适配精度分别达到 93.59% 和 90.89%, 米林县、巴宜区和波密县的适配精度达到 95% 以上; (3) 情景 1 和情景 2 下建设用地适宜性的适配精度与基准情景的误差分别为 -0.48% 和 -2.31%, 耕地适宜性的适配精度与基准情景的误差分别为 +0.63% 和 +0.65%, 误差处于可接受范围; (4) 500 m 高程间隔和 3°、5°、8°、12°、15°、20°、25° 的坡度间隔适用于青藏高原高山峡谷区建设用地和耕地适宜性评价。

关键词: 建设用地适宜性; 耕地适宜性; 土地资源; 人类活动; 高山峡谷区

青藏高原被誉为“地球第三极”, 是中国乃至亚洲最重要的生态屏障区, 也是人类生存海拔最高和环境最恶劣的区域之一, 早在 4 万年至 16 万年前就已出现人类活动^[1]。过去 30 年来, 青藏高原尤其青海湟水谷地和西藏“一江两河”地区等人口密集区建设用地和耕地明显扩张^[2], 人类活动强度显著增强, 仅 1990—2010 年县域尺度上的人类活动影响强度就增加了 31.45%, 显著高于 9% 的全球平均水平^[3]。人类活动强度的增大尤其是空间拓展导致了青藏高原局部区域面临草地退化、湿地减少和动植物栖息地被破坏等不同程度的生态系统安全风险^[4]; 同时高海拔地区生态极为脆弱, 居民生计的生态资源依赖性极强, 高寒缺氧环境也使得人类活动的环境暴露风险提高, 慢性高原病和急性高原病的发病率显著上升^[5]。为保障青藏高原生态安全, 同时兼顾居民生活质量提升, 近年来国家先

收稿日期: 2022-03-07; 修订日期: 2022-06-08

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0406); 国家重点研发计划项目 (2018YFD1100101)

作者简介: 杨华 (1995-), 男, 四川达州人, 博士研究生, 主要从事土地利用与土地关系机理模拟、资源环境承载力评价等研究。E-mail: 1451832197@qq.com

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土地关系机理模拟、农业与乡村发展、资源环境承载力评价等研究。E-mail: xuy@igsnrr.ac.cn

后实施的牧民“扶贫异地搬迁”“极高海拔地区生态移民”等工程及退牧补贴政策已取得一定成效,但涉及范围较小、惠及牧民数量有限,全局性的生态保护与人类活动统筹协调问题依然严峻^[6-8]。如何在坚持生态保护优先的前提下科学判定土地资源人类活动的空间适宜性状况,进而通过严格人类活动的空间范围、方式及规模,可为协调解决生态保护与人类活动关系提供科学依据。建设用地和耕地作为人类活动的核心空间载体,对二者的适宜性评价可以有效刻画出青藏高原适宜人类活动的空间分布格局。

目前国内外关于建设用地适宜性和耕地适宜性评价的研究成果已较为丰富,其中建设用地适宜性评价主要包括城镇建设用地适宜性^[9-14]和乡村居民点适宜性^[13,14]两个方面,而耕地适宜性评价除聚焦耕地本身作为承载农作物种植这一土地属性的适宜性外^[15-17],也关注耕地种植水稻、玉米、大豆等特定农作物的适宜性^[18,19]。研究方法上以多标准决策分析法为主,即基于地形条件、气候条件、土壤理化性质、地质条件、用水条件和社会经济条件等选取评价指标^[20],采用层次分析法、熵值法和模糊数学等方法确定评价因子指标权重,通过设定不同因子的判别标准和约束条件来计算适宜性综合指数,从而达到建设用地和耕地适宜性评价的目的^[21-23];随着地理空间大数据的日益丰富,开始使用以随机森林和神经网络模型等为主的机器学习方法对建设用地和耕地适宜性进行模拟分析,评价结果的客观性和准确度得到很大提高^[24-26]。无论是多标准决策评价法,还是机器学习方法,都主要依赖多种不同评价指标的输入,对评价指标数据的完备程度和精度要求都较高,适合于中小尺度建设用地和耕地适宜性分析。

中国大尺度和成规模的建设用地和耕地适宜性评价工作开始于2008年的汶川地震灾后重建资源环境承载力评价。其以评价建设用地适宜性为导向,提出了一种以高程和坡度为关键指标,将评价区高程按800 m、1200 m、1600 m、2000 m、2500 m和3000 m为间隔划分为7级,将坡度按3°、5°、8°、10°、15°、20°、25°和30°为间隔划分为9级,通过高程和坡度的分级组合优选适宜建设用地^[27]。该方法在之后的玉树地震^[28]和芦山地震^[29]灾后重建规划的土地资源适宜性评价中得到沿用并取得成功。2010年开始相继发布的国家和省级主体功能区规划中可利用土地资源评价同样以高程和坡度分级组合优选结果作为分析基础,其高程分级阈值分别为500 m、1000 m、2000 m和3000 m,坡度分级阈值分别为3°、8°、15°和25°^[30]。2019年全面开展的资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(“双评价”)中对农业生产适宜性和城镇建设适宜性土地资源的评价基础同样是高程和坡度,其高程分级阈值分别为1000 m、2000 m、3000 m和4000 m,城镇指向的坡度分级阈值与主体功能区规划相同,而农业指向的坡度分级阈值则为2°、6°、15°和25°,并在高程和坡度分级组合优选的基础上使用土壤粉砂含量和地形起伏度等指标进行修正,评价方法趋于完善^[31]。基于高程和坡度分级组合优选的建设用地和耕地适宜性评价方法具有操作性强等优点,但其主要依赖专家经验对适宜性等级的判定,对高程和坡度分级的合理性未进行专业性和机理性的论证,且该适宜性等级判定规则主要适用于中低海拔地区,对于青藏高原等高海拔区域存在高程、坡度分级间隔过大和对建设用地、耕地缺乏适宜高程限制等不足。

青藏高原具有面积广、海拔高、高差大、山高谷深和内部区域用地条件差异巨大等特点,人类活动受空气密度、大气含氧量以及气温等环境因子的限制作用显著强于中国其他地区,同时普遍存在基础数据缺失和难获取等问题。位于青藏高原东南部的高山峡谷地区地质地理条件极其复杂,气候、植被和人类活动分布的垂直地带性特征显著,现

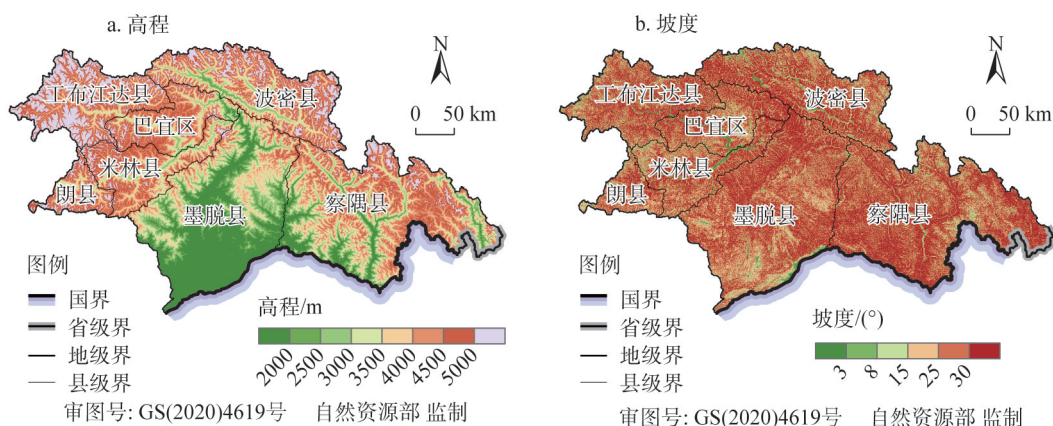
有评价方法难以准确刻画建设用地和耕地适宜性随地形高程和坡度变化的梯度分布特征。基于此,本研究遵从“双评价”中建设用地和耕地适宜性评价按地形高程和坡度分级组合优选的框架思路,以青藏高原高山峡谷典型地区林芝市为研究区域,基于随高程和坡度变化的空气密度、气温和坡地适建、土壤侵蚀四个控制参数构建立地条件的建设用地和耕地适宜性评价模型,并对不同高程和坡度间隔分级情景下适宜性评价结果的精度差异进行比较,以期找到简易可行、兼顾评价精度和工作效率的青藏高原高山峡谷地区建设用地和耕地适宜性评价方法,为严格青藏高原高山峡谷地区人类活动空间提供方法依据,同时也对青藏高原其他地区土地资源评价工作的开展具有参考和启示意义。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

林芝市位于西藏自治区东南部和雅鲁藏布江下游, $92^{\circ}09'43''\sim 98^{\circ}18'30''\text{E}$ 、 $27^{\circ}33'02''\sim 30^{\circ}40'26''\text{N}$,北邻昌都市和那曲市,西毗山南市和拉萨市,东南与云南省怒江州接壤,南抵中印和中缅边境,土地总面积约为11.44万 km^2 。地势总体呈由西北向东南倾斜的格局,域内最高点南迦巴瓦峰海拔达7782 m,最低点位于南部中印边界附近的墨脱县巴昔卡,海拔仅为155 m,落差高达7627 m,是青藏高原典型的高山峡谷地区。地貌的垂直地带性自上而下大致可分为冰川冰缘带、流水侵蚀带和山麓堆积带。印度洋的暖湿气流通过东南部“喇叭状”地形的爬升和抽吸效应造就了林芝市湿润的气候特征,年均温 $7\sim 16^{\circ}\text{C}$,年降水量400~2200 mm,从南到北由热带山地季风湿润气候,经亚热带山地季风湿润气候,逐渐过渡到高原温带季风湿润气候^[32]。具有热带、亚热带、温带和湿润、半湿润气候带的各种森林植被,是全国最大的原始林区 and 世界生物多样性最典型的地区。森林植被下发育形成了砖红壤、黄壤、棕壤、褐土等垂直带谱,河谷、低丘、缓坡等区域分布有潮土、草甸土、水稻土等农牧利用性土壤。境内水系发育,湖泊众多(图1)。

林芝市下辖巴宜区、米林县、朗县、工布江达县、波密县、察隅县和墨脱县7个县(区),54个乡镇,489个村民委员会。2020年常住人口为23.89万人,其中城镇人口



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 林芝市高程和坡度

Fig. 1 Distribution of elevation and slope in Nyingchi city

9.77万人,农村人口14.12万人,人口密度为1.7~6.43人/km²。2020年地区生产总值191.34亿元,三次产业占比为6.4:38:7:54.9,城镇居民人均可支配收入3.65万元,农村居民人均可支配收入1.88万元。2019年土地利用构成中,耕地和园地合计占比为0.43%、建设用地占比为0.24%、林地占比57.62%、草地占比16.38%。城镇和农业空间主要分布在雅鲁藏布江及其支流的河谷地带。

1.2 数据及来源

研究中涉及的图件主要包括DEM、土地利用图和行政区划图等,数据主要包括随海拔变化的空气密度、气温数据和随地形坡度变化的坡地实际建设用地面积、坡耕地土壤侵蚀数据等。DEM数据来源于美国国家航空航天局于2020年最新发布的NASADEM数字高程模型,空间分辨率约30 m,本文将其重采样为50 m栅格作为基本评价单元。土地利用数据和行政区划范围提取自林芝市自然资源局提供的第三次国土调查数据(2020年)。图件统一转换为CGCS 2000国家大地坐标系和高斯—克吕格投影。随海拔变化的空气密度和气温数据来源于中国人民解放军总装备部于2006年公开发布的《中国参考大气(地面~80 km)》(中华人民共和国国家军用标准GJB 5601—2006),采用位于林芝市境内第13格点(30°N,95°E)对应的空气密度和气温年平均值^[33]。坡地实际建设用地面积数据及来源见表1,坡耕地土壤侵蚀数据及来源见表2。

1.3 研究方法

1.3.1 评价模型

建设用地和耕地适宜性评价主要取决于地形是否平坦、空气中氧气含量是否充足、气温是否适宜、用水是否便利等条件,而这些条件往往与地形高程和坡度有着密切关系^[31]。借鉴国内现有建设用地适宜性评价成果中采用地形高程与坡度交集筛选适宜建设用地的思路^[30,31],将地形高程和坡度分别用与它们密切相关的空气密度参数和坡地适建参数代替,二者的乘积则可被用于定量评价建设用地适宜性;将地形高程和坡度分别用与它们密切相关的气温参数和土壤抗蚀参数代替,二者的乘积则可被用于定量评价耕地适宜性。

$$HA_b = \delta_{TE} \times \theta_{TS} \tag{1}$$

$$HA_p = \lambda_{TE} \times \beta_{TS} \tag{2}$$

式中: HA_b 为建设用地适宜性指数(简称“适建指数”); δ_{TE} 为地形高程 TE 对应的空气密度参数; θ_{TS} 为地形坡度 TS 对应的坡地适建参数; HA_p 为耕地适宜性指数(简称“适耕指数”); λ_{TE} 为地形高程 TE 对应的气温参数; β_{TS} 为地形坡度 TS 对应的土壤抗蚀参数。

表1 对照平地的不同坡度下坡地实际建设用地面积数据

Table 1 Actual construction land area of sloping land under different slopes compared with flat land

坡度/(°)	实际建设用地面积/hm ²	坡度/(°)	实际建设用地面积/hm ²	坡度/(°)	实际建设用地面积/hm ²
0	1.0000	15	0.7906	30	0.4701
1.5	0.9827	17.5	0.7466	32.5	0.4003
3	0.9645	20	0.6993	35	0.3243
5.5	0.9328	22.5	0.6485	37.5	0.2410
8	0.8989	25	0.5936	40	0.1492
11.5	0.8472	27.5	0.5343	42.5	0.0483

注:数据来源于参考文献[34]。

表2 不同坡度下坡耕地种植不同作物的土壤侵蚀数据

Table 2 Soil erosion data of sloping arable land planted with different crops under different slopes [t/(km ² ·a)]						
坡度/(°)	苜蓿	玉米	马铃薯	高粱	豆类	5种作物平均值
0	2301.50	3109.16	2243.19	2454.64	2223.24	2466.35
2.5	2303.13	3115.25	2245.15	2457.53	2225.16	2469.24
5	2305.54	3122.70	2247.90	2462.46	2227.94	2473.31
7.5	2526.39	3426.79	2463.54	2702.41	2441.81	2712.19
10	2537.94	3437.75	2467.73	2712.70	2446.26	2720.48
12.5	2798.28	3809.45	2724.16	3010.44	2706.78	3009.82
15	2804.16	3824.59	2730.16	3031.56	2713.28	3020.75
17.5	3249.65	4443.06	3167.20	3626.81	3150.69	3527.48
20	3465.95	4626.70	3392.78	3403.70	3325.36	3642.90
22.5	3820.85	5246.56	3737.78	3803.01	3722.13	4066.07
25	3833.80	5276.59	3759.56	3818.23	3750.78	4087.79
27.5	3959.58	5463.25	3900.33	3946.60	3905.28	4235.01
30	3975.83	5500.00	3933.74	3966.64	3962.90	4267.82

注：(1) 数据来源于参考文献 [35-38]。(2) 需要特别说明的是因青藏高原尤其高山峡谷地区尚无针对耕地的专业性和系统性的土壤侵蚀研究结果，故采用黄土高原延安燕沟流域 Win-Yield 软件 5 种作物 8 年（1997—2006 年）土壤侵蚀模数模拟结果的平均值代替。燕沟流域土壤侵蚀模拟采用的逐日气象数据来源于延安气象站，林芝市靠近第 13 格点的气象站为米林站，两站年均降水量延安站为 507 mm、米林站为 652 mm，降水集中月份均为 6-9 月；燕沟土壤为黄绵土亚类沙性或半沙性类型，林芝市耕地以冲积土亚类灰冲积壤土为主，二者均具有质地松软和保水性差等土壤属性；林芝市以玉米、马铃薯、豆类等为主体的农作物种植结构与燕沟流域类似。从 Win-Yield 软件涉及到的气象、土壤质地、农作物等因子看，两地具有较强的相似性，加之本文涉及的坡耕地土壤侵蚀数据重在反映不同地形坡度之间坡耕地土壤侵蚀程度的相对差异性，说明采用的替代数据是可行的。(3) 苜蓿： *Medicago sativa* Linn。

1.3.2 模型参数

对流层（约 0~11 km）大气中空气密度和气温的垂直分布与海拔之间存在的强负相关关系已得到大气状态方程及相关部门或行业标准的证实。空气密度反映了大气含氧量和氧分压的状态，空气密度随高程升高而降低，大气含氧量和氧分压也随之降低，长期暴露于高海拔地区低密度低氧环境下会导致人体内血氧饱和度降低，容易导致急性和慢性高原病，不利于久居和世居人类的身体健康^[39,40]，随高程变化的空气密度值可用于衡量垂直方向上的建设用地适宜性。气温是衡量农作物种植适宜程度的重要气候参数，随着高程升高，气温逐渐降低，刻画农作物熟制的积温也随之降低，随高程变化的气温值可用于衡量垂直方向上的耕地适宜性。选取高程 1000~6000 m 之间的空气密度和气温值，经过极差标准化后的空气密度特征值和气温特征值可被定义为空气密度参数 δ_{TE} 和气温参数 λ_{TE} ，二者与高程 TE 之间呈线性显著相关关系（表 3）。

一般而言，坡地需要通过梯级化才能用作建设用地。坡地梯级化后因扣除护坡、合理避让等面积后可被用作实际建设用地的面积小于平地建设用地面积，地形坡度越大，实际建设用地面积越小。采用极差标准化后的实际建设用地面积与坡地垂直投影面积的比值可被定义为坡地适建参数 θ_{TS} ，其与地形坡度 TS 之间存在显著的二次函数关系。地形坡度是导致坡耕地土壤侵蚀的关键因子，土壤侵蚀模数可反映不同坡度下坡耕地存在的潜在土壤侵蚀风险。极差标准化后的土壤侵蚀模数特征值与 1 的差值可以反向表达坡

表3 建设用地和耕地适宜性评价模型参数计算公式

Table 3 Parameter calculation formula of construction land and arable land suitability

控制因子	参数名称	计算公式	公式说明
地形高程	空气密度参数	$\delta_{TE} = 1.1822 - 0.0002(TE) \quad (3)$ $R^2 = 0.9979$	δ_{TE} 为空气密度参数; TE 为地形高程值, $TE \in [1000, 6000]$
	气温参数	$\lambda_{TE} = 1.1999 - 0.0002(TE) \quad (4)$ $R^2 = 1$	λ_{TE} 为气温参数; TE 为地形高程值, $TE \in [1000, 6000]$
地形坡度	坡地适建参数	$\theta_{TS} = 0.9904 - 0.0098(TS) - 0.0004(TS)^2 \quad (5)$ $R^2 = 0.9995$	θ_{TS} 为坡地适建参数; TS 为地形坡度值, $TS \in [0, 40]$
	土壤抗蚀参数	$\beta_{TS} = 1 - X_i/5000 \quad (6)$ $\beta_{TS} = 0.535 - 0.0097(TS) - 0.0002(TS)^2 \quad (7)$ $R^2 = 0.9616$	X_i 为5种作物土壤侵蚀模数平均值; β_{TS} 为土壤抗蚀参数; TS 为地形坡度值, $TS \in [0, 30]$

耕地的土壤抗侵蚀性, 定义为土壤抗蚀参数 β_{TS} , 其与地形坡度 TS 之间存在显著的二次函数关系 (表3)。

1.3.3 高程和坡度分级情景

业已构建的建设用地和耕地适宜性评价方法模型是基于高程和坡度的对应参数进行栅格计算, 分析精度理论上可以达到像元级, 评价结果精度较高。但随着评价区域范围的扩大, 模型计算的工作量会成倍增加, 探寻既能保证评价结果精度、又能兼顾计算效率的高程和坡度分级方案将有利于评价模型的实际应用。为此, 研究中设定了基准情景、情景1和情景2三种高程和坡度分级情景方案。

基准情景: 根据青藏高原高山峡谷地区垂直地带性特征, 海拔2000 m以下的低海拔地区的大气和气候因素对人类活动的影响较小, 而5000 m以上的高海拔地区已不适宜人类久居或世居, 本文重点考虑2000~5000 m之间的高程区间。将2000~5000 m之间的高程区间和30°以下的坡度区间分别以100 m和1°的间隔进行分级, 高程2000 m以下、高程5000 m以上和坡度30°以上分别设定为一个级, 将得到的高程32级和坡度31级的分级方案设定为基准情景。

情景1: 对基准情景的分级间隔等间距扩大一倍, 即对2000~5000 m之间的高程区间和30°以下的坡度区间分别按200 m和2°间隔进行分级, 最后得到高程17级和坡度16级的分级情景。

情景2: 参考现有资源环境承载力评价、主体功能区规划和国土空间规划“双评价”中对建设用地和耕地适宜性评价的高程和坡度划分, 将2000~5000 m之间的高程区间按500 m间隔进行分级, 将30°以下的坡度区间按3°、5°、8°、12°、15°、20°和25°阈值进行分级, 得到高程8级和坡度8级的分级情景。

2 结果分析

2.1 基准情景下建设用地和耕地适宜性评价结果

对林芝市高程和坡度分级结果进行空间叠加, 计算和输入对应高程和坡度分级的空气密度参数 δ_{TE} 、坡地适建参数 θ_{TS} 、气温参数 λ_{TE} 和土壤抗蚀参数 β_{TS} , 分别计算适建指数 HA_b 和适耕指数 HA_p ; 根据研究区域人类活动及其空间分布特点, 通过控制不同适宜

类型的最大高程和最大坡度，选定0.71、0.58、0.39和0.26作为适建指数 HA_b 的分级阈值，选定0.39、0.31、0.21和0.16作为适耕指数 HA_p 的分级阈值，将林芝市建设用地和耕地适宜性划分为适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜五个等级类型（图2）。

基准情景下建设用地和耕地适宜性与高程和坡度的对应关系图表明，林芝市建设用地适宜、较适宜、一般适宜和欠适宜等级类型的最大控制高程分别为2400 m、3000 m、4000 m和4600 m，最大控制坡度分别为5°、12°、19°和23°；耕地适宜、较适宜、一般适宜和欠适宜等级类型的最大控制高程分别为2300 m、3100 m、4000 m和4500 m，最大控制坡度分别为5°、12°、20°和24°；均质条件下，除不适宜类型区外，建设用地和耕地一般适宜区的占比最大，欠适宜区大致与之相当，适宜区占比最小。建设用地和耕地适宜性中坡度随高程的增加呈不同程度递减趋势，建设用地适宜性的坡度衰减速率大于耕地适宜性，表明适宜性评价模型能够有效模拟随着海拔上升，人类活动趋于分布在更小坡度的区域。

林芝市建设用地和耕地适宜性评价的实证结果显示（图3、表4），基准情景下林芝

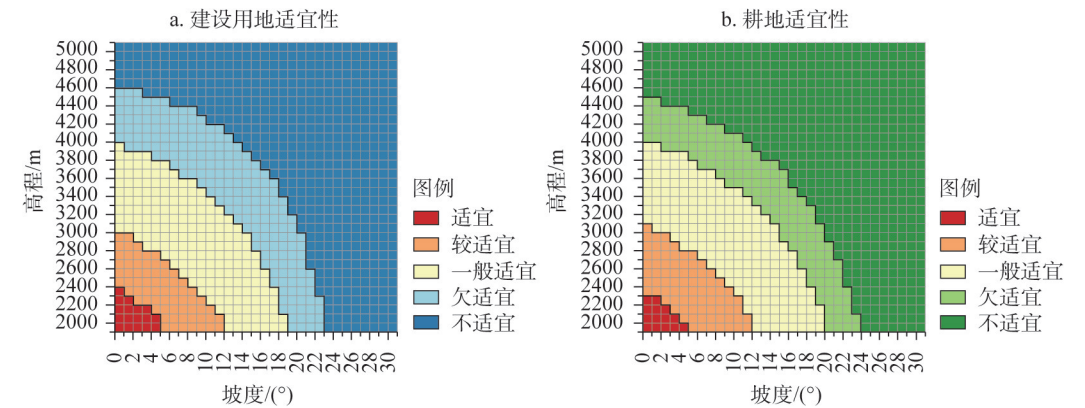


图2 基准情景下建设用地和耕地适宜性等级类型与高程和坡度的对应关系

Fig. 2 Corresponding relation between grade type of construction land and arable land suitability and elevation and slope under standard scenario

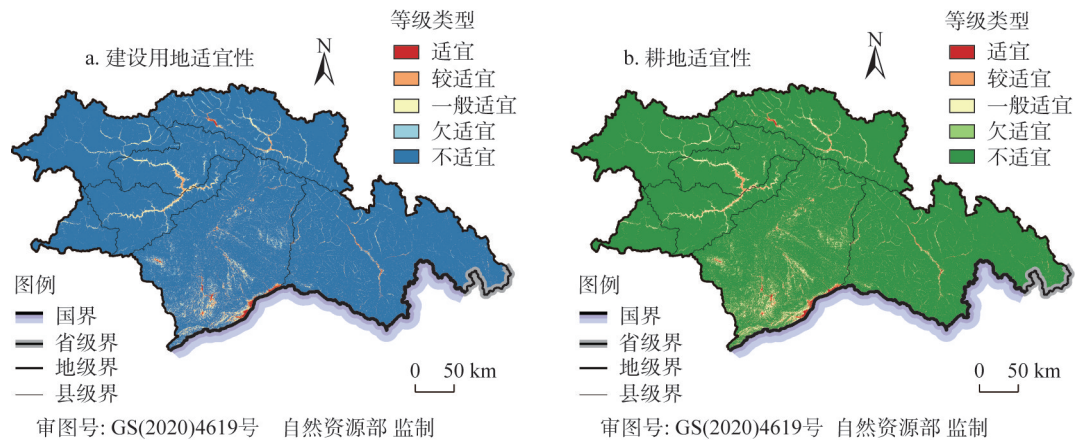


图3 基准情景下林芝市建设用地和耕地适宜性等级类型分布

Fig. 3 Suitability grade type distribution of construction land and arable land under standard scenario in Nyingchi city

表4 基准情景下林芝市建设用地和耕地适宜性等级类型面积

Table 4 Suitability grade type area of construction land and arable land under standard scenario in Nyingchi city

类型	等级	面积/km ²							林芝市	
		巴宜区	波密县	察隅县	工布江达县	朗县	米林县	墨脱县	面积/km ²	比例/%
建设用地 适宜性	适宜	1.79	36.33	80.81	0	0	0.01	586.86	705.81	0.62
	较适宜	124.51	145.42	265.34	0	0	135.73	1147.50	1818.49	1.59
	一般适宜	390.93	535.10	800.67	287.60	74.19	452.09	2870.07	5410.65	4.73
	欠适宜	434.32	712.24	1408.09	289.86	100.94	376.86	3064.00	6386.30	5.58
	不适宜	7610.85	15358.30	28978.94	12383.74	3930.89	8532.78	23291.50	100087.00	87.48
耕地适宜性	适宜	1.61	35.17	77.07	0	0	0.01	582.79	696.64	0.61
	较适宜	159.08	171.17	289.17	0	0.95	183.10	1179.06	1982.54	1.73
	一般适宜	378.79	557.07	892.06	299.47	79.03	427.25	3380.25	6013.92	5.26
	欠适宜	290.24	513.96	1056.48	205.58	67.38	251.22	2852.10	5236.96	4.58
	不适宜	7732.67	15510.02	29219.07	12456.15	3958.65	8635.90	22965.72	100478.19	87.82

市建设用地适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜区面积分别为 705.81 km²、1818.49 km²、5410.65 km²、6386.30 km² 和 100087 km²，耕地分别为 696.64 km²、1982.54 km²、6013.92 km²、5236.96 km²和 100478.19 km²。建设用地和耕地适宜类型的面积最小，占总面积的比例分别仅为 0.62%和 0.61%，主要分布于雅鲁藏布江及其支流山间谷地。建设用地和耕地较适宜类型主要分布在海拔 2400~3000 m 之间（耕地较适宜类型为 2300~3100 m 之间）、坡度 8°以下（耕地较适宜类型为 10°以下）的米林县雅鲁藏布江谷地、巴宜区尼洋河下游谷地、波密县帕隆藏布和易贡藏布谷地，以及海拔 2400 m 以下（耕地较适宜类型为 2300 m 以下）、坡度 12°以下的墨脱县雅鲁藏布江和察隅县察隅河谷两侧坡地及其二级支流河谷。建设用地和耕地一般适宜类型主要分布在朗县、工布江达县、巴宜区、米林县雅鲁藏布江和尼洋河上游海拔 3000~4000 m 之间（耕地一般适宜类型为 3100~4000 m 之间）、坡度 14°以下的河谷地区，以及海拔 3000 m 以下（耕地一般适宜类型为 3100 m 以下），坡度 19°以下（耕地一般适宜类型为 20°以下）的河谷两侧坡地及其二、三级支流河谷地区。建设用地和耕地欠适宜类型主要分布在林芝市主要河流处于较高海拔的末级支流河谷以及河谷两侧较大坡度的陡坡地，规模化开展建设活动和农业耕作面临较大困难。总体来看，林芝市建设用地和耕地适宜性空间格局基本一致，建设用地和耕地不适宜类型面积占比在 87%以上，欠适宜类型面积占比分别为 5.58%和 4.58%；适宜、较适宜和一般适宜三个类型面积之和占比分别为 6.94%和 7.60%。

2.2 不同高程和坡度分级情景下的评价结果对比

以基准情景下建设用地和耕地适宜性的最大控制高程和最大控制坡度为基准，将情景 1 中适建指数 HA_b 的分级阈值设定为 0.72、0.59、0.40 和 0.27，适耕指数 HA_p 的分级阈值设定为 0.38、0.31、0.22 和 0.157；情景 2 中适建指数 HA_b 的分级阈值设定为 0.73、0.58、0.38 和 0.26，适耕指数 HA_p 的分级阈值设定为 0.39、0.32、0.23 和 0.16；将情景 1 和情景 2 建设用地和耕地适宜性划分为适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜五个等级类型（图 4）。

两种情景下林芝市建设用地和耕地适宜性与基准情景的空间分布格局基本一致，但各类型在面积占比和局部空间分布上存在不同程度差异（图 5、表 5）。情景 1 建设用地适

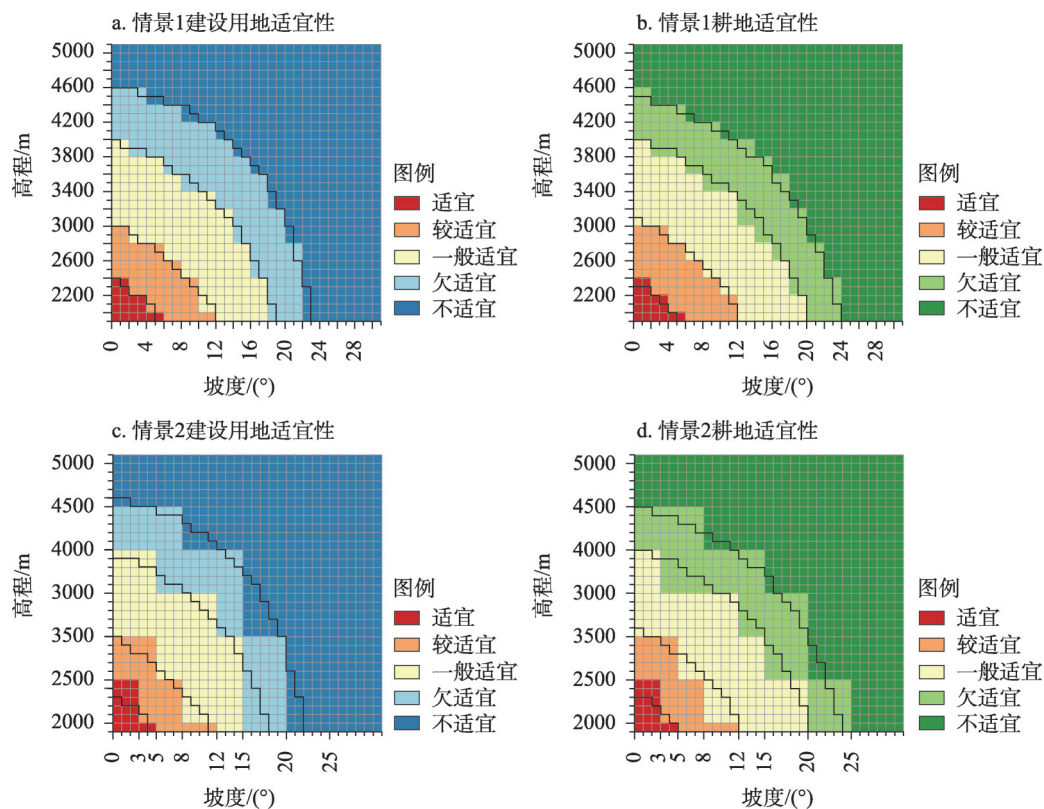


图4 情景1和情景2下建设用地和耕地适宜性等级类型与高程和坡度的对应关系

Fig. 4 Corresponding relation between grade type of construction land and arable land suitability and elevation and slope under scenarios 1 and 2

宜和较适宜面积与基准情景的面积误差分别为 -127.13 km^2 和 139.48 km^2 ，情景2的面积误差分别为 -5.31 km^2 和 73.05 km^2 ，情景2的面积误差小于情景1；情景1建设用地一般适宜、欠适宜和不适宜面积与基准情景的面积误差分别为 501.01 km^2 、 303.17 km^2 和 -816.52 km^2 ，情景2的面积误差分别为 1771.49 km^2 、 1175.20 km^2 和 -2868.32 km^2 ，情景1的面积误差小于情景2；情景1和情景2下建设用地适宜性与基准情景的差异图斑面积占总面积比例分别为1.61%和4.75%。情景1耕地适宜、较适宜和一般适宜面积与基准情景的面积误差分别为 -136.30 km^2 、 121.03 km^2 和 580.13 km^2 ，情景2的面积误差分别为 -14.47 km^2 、 90.99 km^2 和 379.58 km^2 ，情景2的面积误差小于情景1；情景1耕地欠适宜和不适宜面积与基准情景的面积误差分别为 -909.59 km^2 和 344.73 km^2 ，情景2的面积误差分别为 -1613 km^2 和 1157.60 km^2 ，情景1和情景2下耕地适宜性与基准情景的差异图斑面积误差分别为1.21%和2.48%。总体来看，两种情景下建设用地和耕地适宜性评价结果与基准情景的差异图斑面积占比均在5%以下，处于可以接受的精度误差范围之内。

2.3 不同高程和坡度分级情景下评价结果与现状建设用地和耕地适配性

2.3.1 基准情景评价结果与现状建设用地和耕地适配性

根据《第三次全国国土调查工作分类地类认定细则》，现状建设用地是指商业服务业用地、工矿用地、住宅用地，公共管理与公共服务用地等一级类型，现状耕地为水田、水浇地和旱地二级类型。根据2020年林芝市第三次国土调查数据，现状建设用地总面积

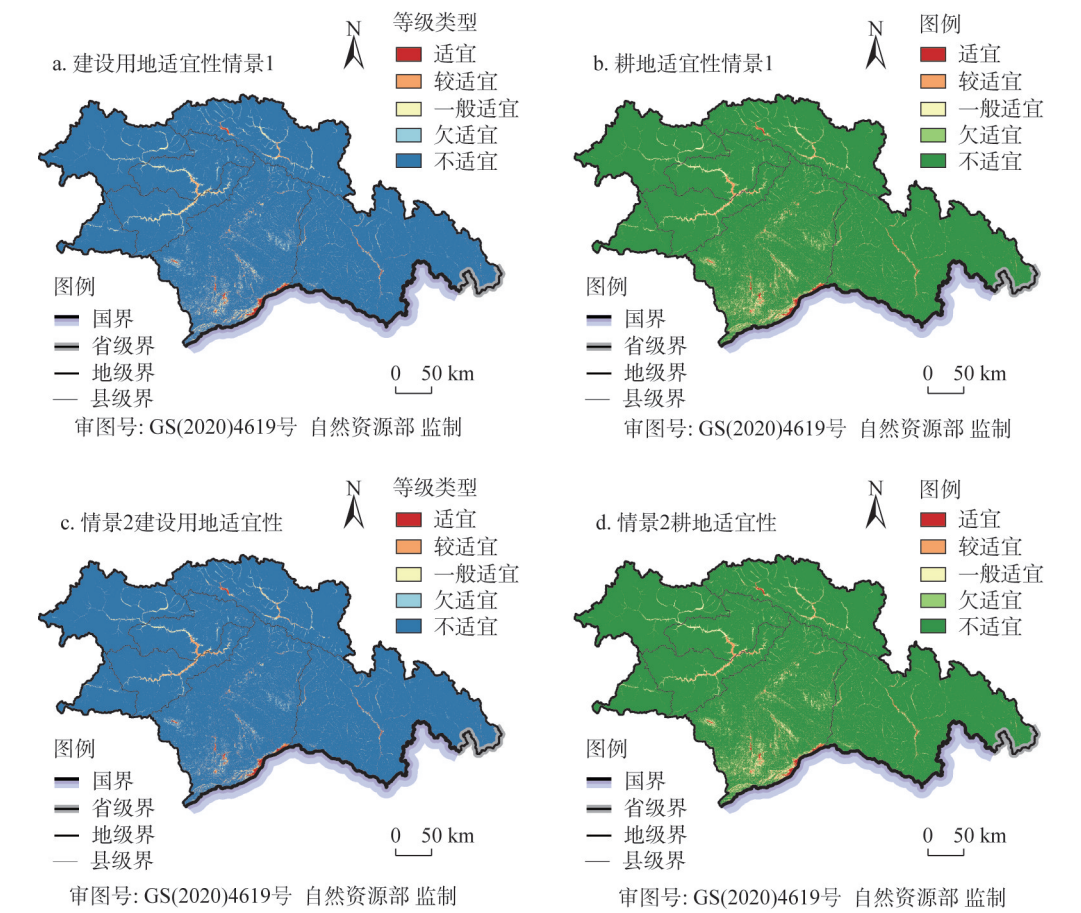


图5 情景1和情景2下林芝市建设用地和耕地适宜性等级类型分布

Fig. 5 Suitability grade type distribution of construction land and arable land under scenarios 1 and 2 in Nyingchi city

表5 情景1和情景2下林芝市建设用地和耕地适宜性等级类型面积

Table 5 Suitability grade type area of construction land and arable land under scenarios 1 and 2 in Nyingchi city

类型	等级	基准情景		情景1		情景2	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
建设用地适宜性	适宜	705.81	0.62	832.94	0.73	711.11	0.62
	较适宜	1818.49	1.59	1679.01	1.47	1891.55	1.65
	一般适宜	5410.65	4.73	4909.64	4.29	3639.16	3.18
	欠适宜	6386.30	5.58	6083.14	5.32	5211.11	4.55
	不适宜	100087.00	87.48	100903.51	88.20	102955.32	89.99
耕地适宜性	适宜	696.64	0.61	832.94	0.73	711.11	0.62
	较适宜	1982.54	1.73	1861.51	1.63	1891.55	1.65
	一般适宜	6013.92	5.26	5433.79	4.75	5634.34	4.92
	欠适宜	5236.96	4.58	6146.55	5.37	6850.65	5.99
	不适宜	100478.19	87.82	100133.46	87.52	99320.59	86.81

约 120 km²，占土地总面积的 0.11%；现状耕地总面积约为 420 km²，占土地总面积的 0.37%；林芝市交通运输用地以公路、城镇村道路和农村道路等道路用地为主，交通设施用地占比极小，现状建设用地适配性分析未考虑交通运输用地。

林芝市现状建设用地和耕地在各适宜性等级类型的分布情况如图 6 所示。统计现状建设用地和现状耕地在不同海拔和坡度分级上的面积占比，分布在海拔 2000~5000 m 之间的现状建设用地和耕地分别占林芝市现状建设用地和耕地总面积的 61.86% 和 89.84%。相对集中于海拔 2700~4000 m 之间，二者占比分别为 55.19% 和 81.10%，其中分布在坡度 15° 以下的现状建设用地面积占比为 52.41%，分布在坡度 20° 以下的现状耕地面积占比为 77.81%。

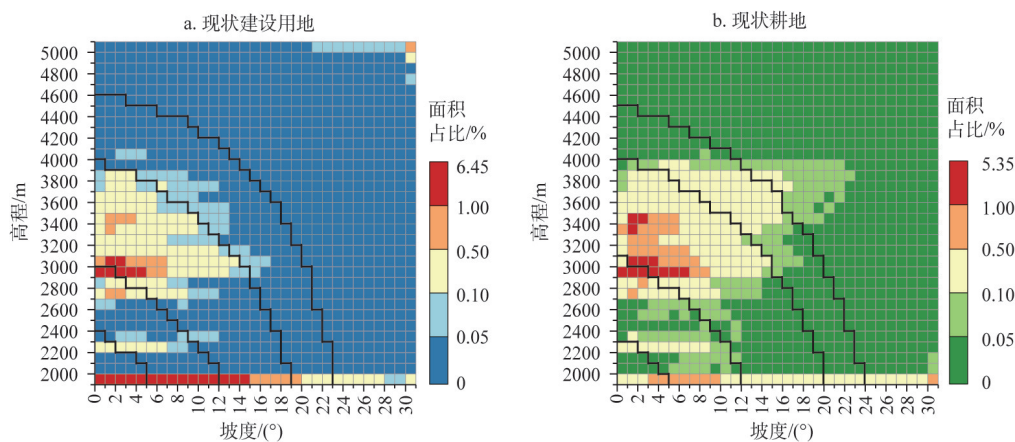


图 6 林芝市现状建设用地和耕地空间分布及其与基准情景评价结果的适配关系

Fig. 6 Distribution of current construction land and arable land in Nyingchi city, and its matching relationship with suitability evaluation results under standard scenario

将林芝市建设用地和耕地适宜性评价结果与现状建设用地和耕地叠加，统计各适宜性类型中现状建设用地和耕地面积，检验适宜性评价结果与现状建设用地和耕地的适配性（图 6）。基准情景下，现状建设用地在建设用地适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜类型中的分布占比分别为 14.73%、29.18%、42.57%、7.12% 和 6.41%，现状耕地在耕地适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜类型中的分布占比分别为 2.83%、25.01%、53.68%、9.38% 和 9.11%。定义现状建设用地和耕地分布在适宜、较适宜、一般适宜和欠适宜类型中的面积占比之和作为适配精度，则基准情景下建设用地适宜性的适配精度为 93.59%，耕地适宜性的适配精度为 90.89%。适宜等级类型与现状建设用地和耕地在高程和坡度上的对应关系显示，在海拔 2700~4000 m 高程区间的现状建设用地和耕地集中分布区主要处于一般适宜类型中，处于同一海拔但坡度更大以及同一坡度但海拔更高区域的现状耕地则进入耕地欠适宜类型。

从各区县对比情况看（图 7），对应现状建设用地和耕地适配性的空间分布，米林县建设用地和耕地适宜性的适配效果最好，精度均达到 99% 以上，巴宜区和波密县适配精度均达到 95% 以上，工布江达县和朗县的建设用地分布海拔普遍较高，其建设用地适配精度分别仅为 76.30% 和 83.87%，朗县和墨脱县耕地适宜性适配精度分别仅为 58.38% 和 63.65%，其原因在于朗县和工布江达县的耕地所处海拔较高和坡度较大，墨脱县耕地所处的坡度较

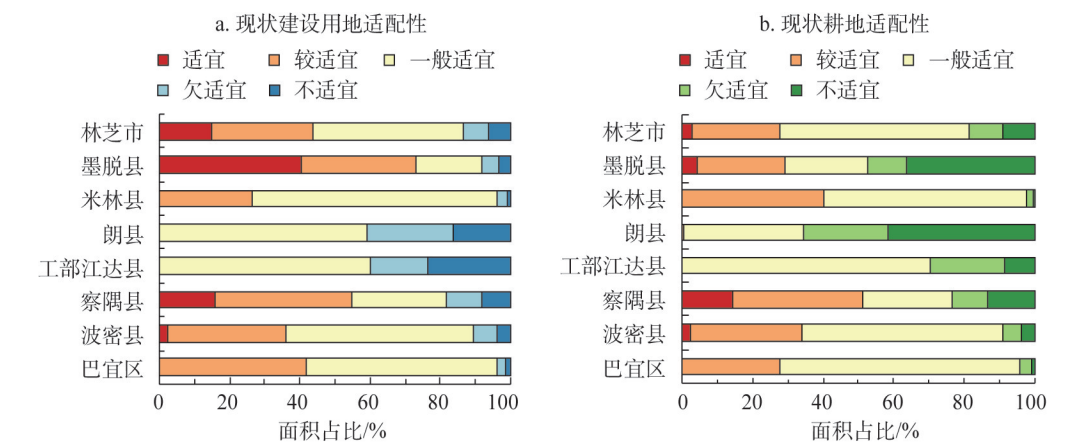


图7 基准情景下林芝市适宜性评价结果与现状建设用地和耕地的适配面积比例

Fig. 7 Matching area proportion between suitability evaluation results and current construction land and arable land under standard scenario in Nyingchi city

大。整体看来，建设用地和耕地适宜性的适配性较好，建设用地适宜性的适配精度更高，建设用地适宜性评价结果较好地适配了现状建设用地在高程和坡度上的衰减分布规律，耕地适宜性评价结果对处于高海拔大坡度地区的现状耕地较为敏感。未来，对于高海拔地区建设条件欠佳的建设用地实行控制发展和易地搬迁等措施，对于已开垦的处于高海拔地区和大坡度陡坡的耕地要逐步加强退耕还林还草等生态工程措施力度。

2.3.2 情景1和情景2评价结果与现状建设用地和耕地适配性

对比三种情景下适宜性评价结果与现状建设用地和耕地的适配性（图8），情景1和情景2建设用地适宜性的适配精度分别为93.11%和91.28%，与基准情景下建设用地适配精度的误差分别为-0.48%和-2.31%；情景1和情景2耕地适宜性的适配精度分别为91.52%和91.54%，与基准情景耕地适配精度的误差分别为+0.63%和+0.65%，二者误差均小于+1%。总体看来，情景1和情景2的适宜性评价结果与现状建设用地和耕地的适配精度较好，与基准情景相比具有较强的一致性。

以林芝市城区和波密县易贡乡集镇所在地及其周边地区为样本区，进一步对比建设用地和耕地适宜性与实际地理环境的适配情况（图9）。虽然三种情景下的适宜性类型面

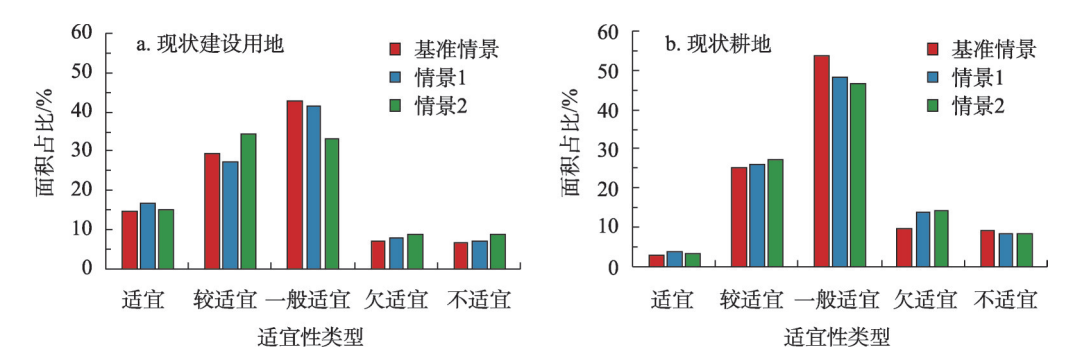


图8 三种情景下林芝市适宜性评价结果与现状建设用地和耕地适配面积比例

Fig. 8 Matching area proportion between suitability evaluation results and current construction land and arable land under three scenarios in Nyingchi city

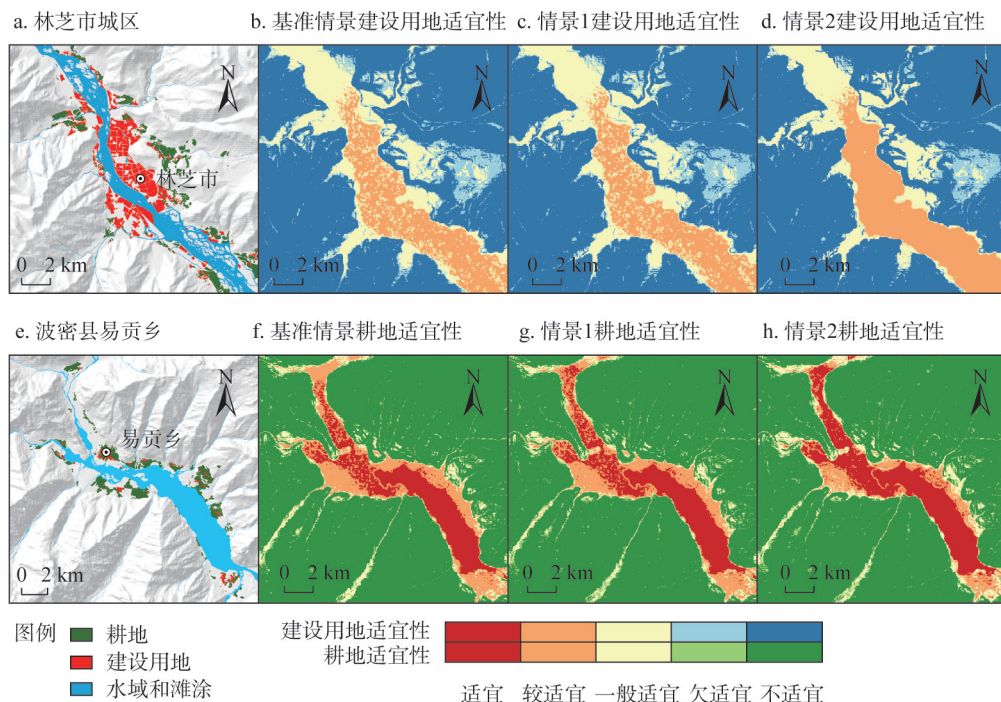


图9 三种情景下林芝市建设用地和耕地适宜性评价结果局部对比

Fig. 9 Partial comparison of construction land and arable land suitability under three scenarios in Nyingchi city

积存在一定差异,但就与人类活动更密切的适宜、较适宜和一般适宜类型的空间分布而言,三种情景下适宜性评价结果空间分布格局基本一致,均能较好适配地形地貌和现状建设用地和耕地的空间分布。基准情景和情景1的建设用地和耕地适宜性评价结果精度更高,能够准确识别更微小的地形高程和坡度变化,但评价结果的图斑分布较为破碎;相比之下情景2评价结果图斑的聚合程度更好,同一适宜性等级类型区内部更为一致,更符合“双评价”等实际工作中对土地资源建设用地和耕地适宜性等级类型宜集中连片的要求。

3 结论与讨论

3.1 结论

分别构建包含空气密度、坡地适建、气温和土壤抗蚀四个控制参数的青藏高原高山峡谷地区建设用地和耕地适宜性评价模型,基于100 m高程间隔和1°坡度间隔的精细化高程和坡度分级基准情景对林芝市的建设用地和耕地适宜性进行了评价,同时评估了两种不同高程和坡度分级情景下的适宜性评价结果误差,所得结论如下:

(1) 林芝市土地资源人类活动适宜性可划分为适宜、较适宜、一般适宜、欠适宜和不适宜五种类型区,建设用地和耕地不适宜类型区面积占比在87%以上,欠适宜性类型区面积占比分别为5.58%和4.58%;适宜、较适宜和一般适宜三个类型区面积之和占比仅为6.94%和7.60%,其中50%以上处于人口较少的墨脱县,仅有25%左右处于巴宜区、米林县、工布江达县和波密县等人口集中分布区。

(2) 基准情景下适宜性评价结果与现状建设用地和耕地的适配精度分别为93.59%和

90.89%。米林县、巴宜区和波密县的适配效果最好,适配精度在95%以上,工布江达县、朗县和墨脱县由于建设用地和耕地所处的高程较高和坡度较大,其适配精度相对较低。

(3) 情景1和情景2下建设用地适宜性评价结果与基准情景的差异图斑面积占比分别为1.61%和4.75%,耕地适宜性的差异图斑面积占比分别为1.21%和2.48%,适宜性评价结果与基准情景的差异图斑面积占比均小于5%,处于可以接受的范围之内。青藏高原高山峡谷地区建设用地和耕地适宜性评价模型基于高程500 m间隔以及按坡度3°、5°、8°、12°、15°、20°和25°为阈值进行分级是可行和适用的。

3.2 讨论

本文针对高山峡谷地区构建了土地资源建设用地和耕地适宜性评价方法模型,通过在林芝市的实证检验,表明该方法模型至少在高山峡谷区是可行的,一定程度上弥补了现有评价方法在高海拔地区应用中关于高程与坡度分级组合判定适宜性等级类型方面的不足。在实际应用中可在评价结果的基础上,根据被评价地区的自然地理状况和人类活动方式因地制宜地考虑使用地质条件、地质灾害、用水便利程度、土壤类型和质地等因子对评价结果进行进一步修正。至于本文构建的方法模型能否推广应用到青藏高原全域,尚需在西藏中西部、青海南部、新疆的帕米尔—昆仑山区等地进行案例验证。另外,对于林芝市分布在不适宜等级类型的现状建设用地和耕地,未来是否需要采取异地搬迁或退耕还林还草等措施,不能一概而论,需要通过遥感影像判别或实地考察视实际情况而定。如现状建设用地是寺庙或特殊用地,则不宜搬迁;分布在高海拔地区的现状耕地可能存在非地带性小尺度气候变异现象,坡度较大的坡耕地可能已被梯田化改造。

参考文献(References):

- [1] 张东菊, 申旭科, 成婷, 等. 青藏高原史前人类活动研究新进展. 科学通报, 2020, 65(6): 475-482. [ZHANG D J, SHEN X K, CHENG T, et al. New advances in the study of prehistoric human activity on the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(6): 475-482.]
- [2] 张懿锂, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征. 科学通报, 2019, 64(27): 2865-2875. [ZHANG Y L, LIU L S, WANG Z F, et al. Spatial and temporal characteristics of land use and cover changes in the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2865-2875.]
- [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] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. 中国科学院院刊, 2021, 36(11): 1298-1306. [FU B J, OUYANG Z Y, SHI P, et al. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau Ecological Security Barrier. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(11): 1298-1306.]
- [5] 史培军, 陈彦强, 马恒, 等. 再论青藏高原近地表大气相对氧含量影响因素的贡献率. 科学通报, 2021, 66(31): 4028-4035. [SHI P J, CHEN Y Q, MA H, et al. Further research on the factors contributing to oxygen concentration over the Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(31): 4028-4035.]
- [6] 新华通讯社. 习近平致中国科学院青藏高原综合科学考察研究队的贺信. http://www.xinhuanet.com/politics/2017-08/19/c_1121509919.htm, 2017-08-19/2022-05-05. [Xinhua News Agency. Congratulatory letter from Xi Jinping to scientific research team of Tibetan Plateau Expedition and Research of the Chinese Academy of Sciences. http://www.xinhuanet.com/politics/2017-08/19/c_1121509919.htm, 2017-08-19/2022-05-05.]
- [7] 达瓦次仁, 次仁, 白玛卓嘎, 等. 搬迁对移民生产、生活的影响研究: 基于日喀则地区五个移民村案例分析. 西藏研究, 2013, (3): 48-57. [DAWA C R, CI R, BAIMA Z G, et al. The impact of resettlement on production and livelihood of migrants: A case study of five migrated villages in Shigatse Prefecture. Tibetan Studies, 2013, (3): 48-57.]

- [8] 桑才让, 冯永香. 三江源地区生态移民后续产业发展问题探讨. 攀登, 2012, 31(6): 61-68. [SANGCAI R, FENG Y X. Discussion on the follow-up industrial development of ecological migrants in Sanjiangyuan Region. New Heights, 2012, 31(6): 61-68.]
- [9] WANG H Y, QIN F, XU C D, et al. Evaluating the suitability of urban development land with a Geodetector. Ecological Indicators, 2021, 123: 107339, Doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107339.
- [10] YAN Y, ZHANG Y K, SHARMA A, et al. Evaluation of suitability of urban land using GIS technology. Sustainability, 2021, 13(19): 10521, Doi: 10.3390/su131910521.
- [11] 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.
- [12] 杨子生. 山区城镇建设用地适宜性评价方法及应用: 以云南省德宏州为例. 自然资源学报, 2016, 31(1): 64-76. [YANG Z S. Land suitability evaluation for urban construction and its application in mountainous areas: A case study in Dehong Dai-Jingpo Autonomous Prefecture, Yunnan province. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 64-76.]
- [13] 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. [ZHANG H P, HE R W, LIU Y W, 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.]
- [14] 郭月婷, 廖和平, 徐建刚. 三峡库区农村居民点用地适宜性评价. 农业工程学报, 2012, 28(5): 252-259. [GUO Y T, LIAO H P, XU J G. Evaluation on suitability of rural residential land in Three Gorges Reservoir Region. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 252-259.]
- [15] YAO M L, SHAO D G, LYU 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.
- [16] 毕玮, 党小虎, 马慧, 等. “藏粮于地”视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价. 农业工程学报, 2021, 37(7): 235-243. [BI W, DANG X H, MA H, et al. Evaluation of arable land suitability and potential from the perspective of "food crop production strategy based on farmland management" in Northwest China. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 235-243.]
- [17] 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. [JIN G, WANG Z Q, LI W S, 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.]
- [18] HAN C, YU Y, XU Z Y, et al. Evaluation of agricultural land suitability based on RS, AHP, and MEA: A case study in Jilin province, China. Agriculture, 2021, 11(4): 370, Doi: 10.3390/agriculture11040370.
- [19] MAKUNGWE M, CHABALA L M, VAN DIJK M, et al. Assessing land suitability for rainfed paddy rice production in Zambia. Geoderma Regional, 2021, 27: e00438, Doi: 10.1016/j.geodrs.2021.e00438.
- [20] AKPOTI K, KABO-BAH A T, ZWART S J. Review: Agricultural land suitability analysis: State-of-the-art and outlooks for integration of climate change analysis. Agricultural Systems, 2019, 173: 172-208.
- [21] SARKAR B, DAS P, ISLAM N, et al. Land suitability analysis for paddy crop using GIS-based Fuzzy-AHP (F-AHP) method in Koch Bihar district, West Bengal. Geocarto International, 2021, Doi: /10.1080/10106049.2021.2007299.
- [22] NGUYEN H, NGUYEN T, HOANG N, et al. The application of LSE software: A new approach for land suitability evaluation in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105440, Doi: 10.1016/j.compag.2020.105440.
- [23] MENDAS A, MEBREK A, MEKRANFAR Z. Comparison between two multicriteria methods for assessing land suitability for agriculture: Application in the area of Mleta in western part of Algeria. Environment, Development and Sustainability, 2020, 23(6): 9076-9089, Doi: 10.1007/s10668-020-01012-5.
- [24] LUO K Y, WANG Z Y, SHA W, et al. Integrating sponge city concept and Neural Network into land suitability assessment: Evidence from a satellite town of Shenzhen metropolitan area. Land, 2021, 10(8): 872, Doi: 10.3390/land10080872.
- [25] KANG Z Q, WANG S, XU L, et al. Suitability assessment of urban land use in Dalian, China using PNN and GIS. Natu-

- ral Hazards, 2021, 106(1): 913-936.
- [26] TAGHIZADEH-MEHRJARDI R, NABIOLLAHI K, RASOLI L, et al. Land suitability assessment and agricultural production sustainability using machine learning models. *Agronomy*, 2020, 10(4): 573, Doi: 10.3390/agronomy10040573.
- [27] 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. [FAN J. State Planning for Post-Wenchuan Earthquake Restoration and Reconstruction: Resource Environment Carrying Capacity Evaluation. Beijing: Science Press, 2009.]
- [28] 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. [FAN J. Post-Yushu Earthquake Restoration and Reconstruction: Resource Environment Carrying Capacity Evaluation. Beijing: Science Press, 2010.]
- [29] 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. [FAN J. Post-Lushan Earthquake Restoration and Reconstruction: Resource Environment Carrying Capacity Evaluation. Beijing: Science Press, 2014.]
- [30] 樊杰. 主体功能区划技术规程. 北京: 科学出版社, 2019. [FAN J. Technical Regulation for Major Function Zoning. Beijing: Science Press, 2019.]
- [31] 中华人民共和国自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/22/content_5471523.htm, 2020-01-19/2022-05-05. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Assessment guidelines for resource and environmental carrying capacity and territorial development suitability. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/22/content_5471523.htm, 2020-01-19/2022-05-05.]
- [32] 林振耀, 吴祥定. 青藏高原气候区划. 地理学报, 1981, 36(1): 22-32. [LIN Z Y, WU X D. Climatic regionalization of the Qinghai-xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36(1): 22-32.]
- [33] 中国人民解放军总装备部. 中国参考大气(地面~80 km) (GJB 5601—2006). [General Armament Department of People's Liberation Army. China reference atmosphere (ground~80 km) (GJB 5601-2006).]
- [34] 徐勇, 赵荣, 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. [XU Y, ZHAO S, FAN J. Urban planning construction land standard and its revision of climate and topography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 194-208.]
- [35] 杨波, 徐勇. 黄土高原坡耕地苜蓿产量及水土流失地形分异模拟: 以延安燕沟流域为例. 地理科学进展, 2010, 29(5): 530-534. [YANG B, XU Y. Topographic differentiation simulation of Alfalfa yield and soil and water loss in the Loess Plateau. *Progress in Geography*, 2010, 29(5): 530-534.]
- [36] 徐勇, 杨波, 刘国彬, 等. 黄土高原作物产量及水土流失地形分异模拟. 地理学报, 2008, 63(11): 1218-1226. [XU Y, YANG B, LIU G B, et al. Topographic differentiation simulation of crop yield and soil and water loss on the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(11): 1218-1226.]
- [37] 徐勇, 甘国辉, 王志强. 基于WIN-YIELD软件的黄土丘陵区作物产量地形分异模拟. 农业工程学报, 2005, 21(7): 61-64. [XU Y, GAN G H, WANG Z Q. Topographic differentiation simulation of crop yield based on WIN-YIELD software in the Loess Hilly-gully Region. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7): 61-64.]
- [38] 徐勇, 田均良, 刘普灵, 等. 黄土高原坡耕地水土流失地形分异模拟. 水土保持学报, 2005, 19(5): 20-23. [XU Y, TIAN J L, LIU P L, et al. Topographic differentiation simulation of soil and water loss of slope farmland in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 20-23.]
- [39] VILLAFUERTE F C, CORANTE N. Chronic mountain sickness: Clinical aspects, etiology, management, and treatment. *High Altitude Medicine & Biology*, 2016, 17(2): 61-69.
- [40] MALLETT R T, BURTSCHER J, RICHALET J P, et al. Impact of high altitude on cardiovascular health: Current perspectives. *Vascular Health and Risk Management*, 2021, 17: 317-335.

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

YANG Hua^{1,2}, XU Yong^{1,2}, WANG Li-jia^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau is an important ecological barrier area in China and Asia. Conducting construction land suitability evaluation (CLSE) and arable land suitability evaluation (ALSE) is important for ecological protection, restriction of human activity space in this plateau. However, the application has the defects of existing CLSE and ALSE models and methods in high-altitude areas. In this paper, we constructed CLSE and ALSE models applicable to alpine-gorge region in the Qinghai-Tibet Plateau, as well as proposed the measurement methods of four control parameters: air density, sloping land suitability for construction, air temperature and soil erosion resistance of sloping land. Based on the standard scenarios of elevation-slope classification with an interval of 100 m in elevation and 1° in slope, an empirical application research was carried out in Nyingchi city, the typical area of alpine-gorge region in the Qinghai-Tibet Plateau, and the feasibility was demonstrated of two different elevation-slope classification scenarios for CLSE and ALSE as well. This article obtains four conclusions: (1) Construction land suitability (CLS) and arable land suitability (ALS) in Nyingchi city can be divided into five grade types: suitable, relatively suitable, moderately suitable, less suitable, and unsuitable. The grade type of CLS and ALS is mainly unsuitable in the city, with 87.48% and 87.42% area ratio of unsuitable grade type, 5.58% and 4.58% area ratio of less suitable grade type, and sum area ratio of suitable, relatively suitable, moderately suitable grade types accounted for only 6.94% and 7.60%. (2) The matching degree is high of CLS and ALS with current construction land and arable land under standard scenario in Nyingchi city, with the matching accuracy reaching 93.59% and 90.89%, respectively, among which the matching accuracy in Mainling county, Chagyib district, and Bowo county is above 95%, and the matching accuracy in Gongbo' gyada county, Nang county, and Mêdog county is very low, respectively. (3) The matching accuracy is 93.11% and 91.28% of CLS under scenarios 1 and 2, and its matching error is -0.48% and -2.31% with the standard scenario. The matching accuracy is 91.52% and 91.54% of ALS under scenarios 1 and 2, and its matching error is +0.63% and +0.65% with the standard scenario. The model error is within an acceptable range. (4) Classification schemes with an interval of 500 m in elevation and 3°, 5°, 8°, 12°, 15°, 20°, and 25° in slope are applicable for CLSE and ALSE in alpine-gorge region of the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: construction land suitability; arable land suitability; land resources; human activity; alpine-gorge region