



•研究报告•

青藏高原药用植物分布格局及保护优先区

赵仁生^{ID 1,2#}, 许诗嘉^{ID 1,2#}, 宋鹏飞^{ID 1,2}, 周翔^{ID 1,2}, 张亚洲^{ID 2*}, 袁燕^{ID 1*}

1. 云南民族大学民族医药学院民族药资源化学国家民委-教育部重点实验室, 昆明 650504; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南勐腊 666303

摘要: 青藏高原拥有丰富的药用植物资源, 但目前人们缺乏对其多样性分布格局的清晰认识以及人类活动对药用植物资源影响的评估。本研究收集整理了青藏高原地区254种药用植物分布及人类活动的数据, 分析了当前青藏高原地区药用植物分布格局及其面临的威胁, 并划定出当前需要保护的优先区域。研究结果显示, 青藏高原药用植物的多样性和特有性主要集中在东部和东南部地区, 且较强的人类活动影响力与较高的药用植物多样性和特有性重叠, 这表明人类活动对药用植物多样性和特有性有着显著的影响。进一步结合生物和人类活动两方面因素的算法, 划定了保护优先区, 包括云南西北部、四川西南部和西部、青海东部及西藏中部, 这表明青藏高原现有的保护区存在大量保护空缺。基于此, 本研究提出了包括完善法律法规及政策监管, 增设保护区, 补充和完善保护植物名录, 加强科普宣传, 加强药用植物种质资源的收集、保存与开发的保护青藏高原药用植物资源的建议, 为今后保护政策的制定和保护区划定提供依据, 也借此宣传青藏高原生态保护问题, 唤起民众的保护关注。

关键词: 青藏高原; 药用植物; 保护优先区; 人类活动

赵仁生, 许诗嘉, 宋鹏飞, 周翔, 张亚洲, 袁燕 (2022) 青藏高原药用植物分布格局及保护优先区. 生物多样性, 30, 21385. doi: 10.17520/biods.2021385. Zhao RS, Xu SJ, Song PF, Zhou X, Zhang YZ, Yuan Y (2022) Distribution patterns of medicinal plant diversity and their conservation priorities in the Qinghai-Tibet Plateau. Biodiversity Science, 30, 21385. doi: 10.17520/biods.2021385.

Distribution patterns of medicinal plant diversity and their conservation priorities in the Qinghai-Tibet Plateau

Rensheng Zhao^{ID 1,2#}, Shijia Xu^{ID 1,2#}, Pengfei Song^{ID 1,2}, Xiang Zhou^{ID 1,2}, Yazhou Zhang^{ID 2*}, Yan Yuan^{ID 1*}

1 Key Lab of Chemistry in Ethnic Medicinal Resources, State Ethnic Affairs Commission & Ministry of Education of China, School of Ethnic Medicine, Yunnan Minzu University, Kunming 650504

2 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

ABSTRACT

Aims: The Qinghai-Tibet Plateau (QTP) harbors abundant resources of medicinal plants, but the public still lacks the knowledge of the distribution pattern of medicinal plant diversity. The public also has poor understanding of the effects of human activities on the resources of medicinal plants.

Methods: In this study, we collected the distribution data of 254 medicinal plant species and quantified human activities in the QTP. Then we analyzed the diversity and endemism patterns and the effects of potential threats to medicinal plants. Finally we identified the conservation priority areas for medicinal plant resources.

Results: Our results showed that the diversity and endemism of medicinal plants in the QTP are primarily concentrated in the eastern and southeastern regions. We found that stronger human influence overlapped with higher diversity and endemism of medicinal plants, and that these human activities all had a significant impact on diversity and endemism. We further use an algorithm combining biological and human factors to identify conservation priority areas, including northwestern Yunnan, southwestern and western Sichuan, eastern Qinghai and central Tibet, which revealed that the

收稿日期: 2021-09-22; 接受日期: 2021-12-23

基金项目: 云南民族大学民族药资源化学国家民委-教育部重点实验室学科教育培育项目(MY20210507)和开放基金(MZY2103)

共同第一作者 Co-first authors

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: zhangyazhou@xtbg.ac.cn; 54988363@qq.com

<https://www.biodiversity-science.net>

current protected areas in the QTP do not effectively protect hotspots identified in this study, and there is an abundance of conservation gaps.

Conclusion: This study provides some suggestions on the protection of medicinal plant resources in the QTP, including improving laws, regulations and policy supervision, establishing more protection areas, supplementing the list of protected plants, strengthening the popularization of science, and promoting the collection, preservation and development of medicinal plant resources. These suggested measures will guide conservation policies and the delineation of protected areas in the future. We hope this study will publicize the serious threats of medicinal plants and arouse the attention of the public to conservation in the QTP.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; medicinal plant; conservation priority; human activity

青藏高原是世界上海拔最高、最年轻的高原, 被誉为“世界第三极”, 该地区主要由三部分组成, 即横断山区、喜马拉雅地区和高原面。同时青藏高原孕育了举世瞩目的生物多样性, 其中又以东喜马拉雅—横断山地区为最著名的生物多样性热点(Sun et al, 2014; Xing & Ree, 2017; Ding et al, 2020; 张亚洲, 2021)。青藏高原拥有世界上最丰富的温带高山植物区系和大量的特有类群(Yu et al, 2019a), 研究表明该地区种子植物超过12,000种(Zhang et al, 2016)。但是青藏高原植物多样性分布极为不均, 主要集中在东部和东南部地区, 尤以横断山区为最(Xing & Ree, 2017), 早先研究认为该区有种子植物约7,954种(李锡文和李捷, 1993; 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1993), 而最新研究显示横断山区拥有12,800种种子植物(Sun et al, 2017)。青藏高原丰富的植物多样性是我国宝贵的自然财富, 为国民经济的发展和生态安全提供了重要的保障(张亚洲, 2021), 其中就包括药用植物资源(中华本草编委会, 2002), 此外青藏高原为药用植物资源的开发提供了巨大的发掘空间。但是青藏高原地区及其多样性资源易受到气候变化和人类活动的影响(Liu et al, 2018)。

气候变化是当今人类面临的最为严峻的挑战之一, 研究显示青藏高原地区变暖的速度显著高于全球平均水平(Wang et al, 2008)。气候变化带来的一系列影响包括冰川消融、雪线下降、湖泊收缩、冻土退化、牧场退化、荒漠化等(Liu et al, 2018), 这严重威胁着青藏高原地区生物多样性, 许多物种在气候变化背景下有着灭绝的风险(Zhang et al, 2020)。例如, Peng等(2019)利用物种分布模型(species distribution model, SDM)模拟了4种雪兔子(*Saussurea* spp.)在未来气候变化背景下分布的情况, 发现其分布区面积在2050–2070年间不断缩减;

Rana等(2020)发现在气候变化影响下尼泊尔(喜马拉雅地区)药用和芳香植物的分布面积逐渐减少。

与气候变化相比, 人类活动对生物多样性的影响更为严峻, 因为人类活动是第六次生物大灭绝的主要诱因(Ceballos et al, 2015)。随着我国经济快速发展, 青藏高原地区经济活动的深度和广度都得到了极大的提升, 大体上分为以下3类: 第一, 基础设施建设加强, 如道路建设、水利工程等; 第二, 农林业规模扩大, 如农业开垦、过度畜牧、砍伐森林、破坏草场、采挖药材等; 第三, 旅游业及其附加破坏, 如盲目购买野生植物、一味追求野生植物药效、破坏植被等(Zhang et al, 2021a)。上述一系列人类活动给药用植物带来了毁灭性的破坏(图1)。例如雪莲花(*Saussurea involucreata*)和雪兔子(*S. gossypiphora*)是藏区旅游沿线的标志产品, 商家大肆鼓吹不实药效、当地居民大量采挖、游客争相购买, 对雪兔子和雪莲种群造成无法挽回的破坏, 甚至是刚发表的新物种巴朗山雪莲(*Saussurea balangshanensis*)也有被攀折的现象(Zhang et al, 2019)。Law和Salick(2005)的研究比较了近百年来的植物标本信息, 发现绵头雪兔子(*S. laniceps*)个体高度在近30年的人类采挖活动中不断变矮。贝母是一味常用药材, 生长在高山冰缘带的梭砂贝母(*Fritillaria delavayi*)被称作“炉贝”, 近年价格居高不下, 当地居民大肆采挖, Niu等(2021)研究发现人类活动强度与梭砂贝母隐蔽强度呈正相关, 即在人类活动频繁的地区, 人们很难发现这样的贝母个体, 从而提高其存活概率。这些研究都表明, 人类活动正在以前所未有的强度影响植物的生存和繁衍, 最直接的影响就是使被采挖的植物种群数量急剧下降(Law & Salick, 2005; Niu et al, 2021; 张亚洲, 2021)。

近年来, 许多研究从各个方面对青藏高原地区的保护状况进行了评价, 一致结论是“青藏高原地

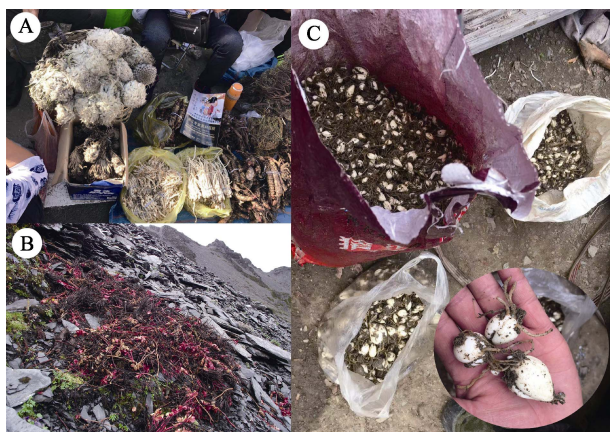


图1 青藏高原地区采挖和售卖的部分野生植物。(A)售卖的绵头雪兔子、党参等药用植物;(B)高山冰缘带上大花红景天被采挖后遗留的破坏现场;(C)当地居民采挖的贝母鳞茎。A、B和C分别由李树荣、宋波和邱天拍摄。

Fig. 1 Some wild plants harvested and sold in the Qinghai-Tibet Plateau. (A) Selling some medicinal plants, for example *Saussurea laniceps* and *Codonopsis* sp.; (B) The damaged site of *Rhodiola crenulata* after excavation in the alpine subnival belts; (C) Bulbs of *Fritillaria* sp. were harvested by residents. Photos in A, B and C taken by Li Shurong, Song Bo and Qiu Tian, respectively.

区的生物多样性保护状况不容乐观”。青藏高原东南部拥有最高的物种多样性(于海彬等, 2018)和特有性(Zhang et al, 2016), 但是Yu等(2019b)发现青藏高原的遗传多样性呈现与物种多样性不同的分布格局, 高原面部分区域拥有很高的遗传多样性, 因此在保护实践中应考虑多层次的指标; Zhang等(2021b)分析了横断山区冰缘带和河谷植物区系的多种多样性指标, 包括分类学指标(如物种多样性和加权特有性)和系统发育指标(如系统发育多样

性、系统发育特有性和相对系统发育特有性), 发现无论基于哪种指标分析, 当前的保护力度都不足以保护横断山区的生物多样性(无论是物种多样性还是遗传多样性), 而且大量保护热点地区受到强烈的人为干扰; 垫状植物是青藏高原高山生态系统重要的基石物种(foundation species), Zhang等(2021c)分析了该植物群落的空间分布格局及进化历史, 发现当前的保护区没有很好地覆盖垫状植物的热点分布地区, 这不利于保护垫状植物多样性及其进化潜力。但是, 目前对青藏高原药用植物多样性格局和保护现状的研究还比较少。

综上, 青藏高原拥有丰富的药用植物资源, 但是也面临来自气候变化和人类活动严峻的威胁。因而, 本研究旨在分析当前青藏高原地区药用植物分布格局及其面临的问题, 明确当前保护的优先区域, 提出保护青藏高原药用植物资源的一些建议。

1 方法

1.1 研究区域概况

本研究选取中国境内青藏高原地区为研究对象(图2), 包括西藏、云南西北部、四川西部、青海、新疆南部和甘肃西南部(Zhang et al, 2016), 主要的地形特征包括峡谷、高山、丘陵、高原等, 植被类型多样, 包括河谷灌丛、阔叶林、针叶林、高山灌丛、草甸和流石滩等(Zhang et al, 2020)。

1.2 数据收集

药用植物名录整理自《中华本草藏药卷》(中华本草编委会, 2002), 对于书中的异名及存疑的药用

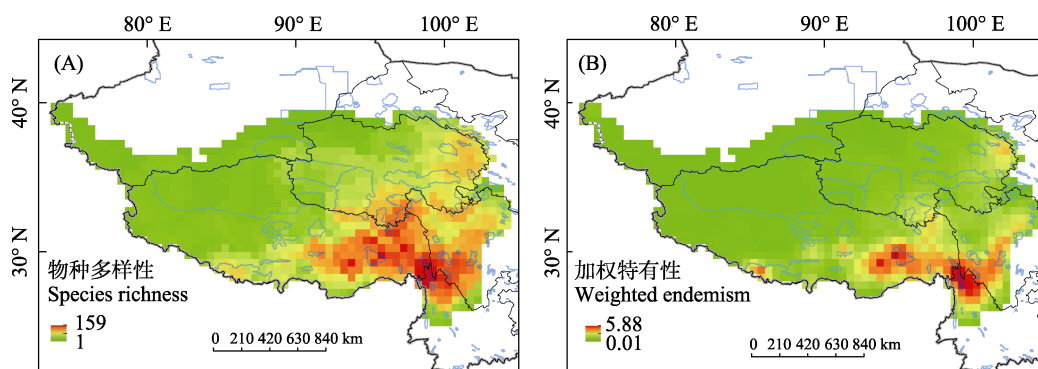


图2 青藏高原药用植物物种多样性和加权特有性分布格局。(A)物种多样性, (B)加权特有性。图中蓝色线表示国家级保护区范围。

Fig. 2 The distribution patterns of species diversity and weighted endemism in the Qinghai-Tibet Plateau. (A) Species richness, (B) Weighted endemism. Blue lines indicate the national-level protected areas.

植物来源, 本研究基于《中国植物志》(中国植物志编委会, 1961–2002)、*Flora Reipublicae Popularis Sinicae* (Wu et al, 2013)、《云南植物志》(中国科学院昆明植物研究所, 2006)、《西藏植物志》(中国科学院昆明植物研究所, 1983)、《新疆植物志》(新疆植物志编委会, 1993–1996)、《甘肃植物志》(甘肃植物志编辑委员会, 2005)和《四川植物志》(四川植物志编委会, 1981–2007)进行校准和考证(名录见附录1)。基于药用植物名录, 每个物种的分布记录及其海拔数据收集自上述的国家和各地方植物志, 并根据Zhang等(2016)、《横断山维管植物》(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1993)、《西藏植被》(中国科学院昆明植物研究所, 1983)、《云南植被》(云南植被编写组, 1987)和中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>)剔除了栽培植物、外来植物及逸生归化植物(判断标准主要参考植物志记载), 最终确定入药部位及主要化学成分清楚、主治病症和用量用法明确的254种植物, 分属71个科162个属, 多为常用藏药。人口和国内生产总值(GDP)数据收集自国家统计局(<http://www.stats.gov.cn/>)。道路数据和保护区数据收集自北京大学城市与环境学院地理数据平台(<http://geodata.pku.edu.cn/>)。

1.3 空间分析

原始物种分布数据为每个物种的县级分布记录并附带采集点信息(部分中国数字植物标本馆的数据附带坐标信息), 使用Zhang等(2021a)的分析流程进行筛选和剔除处理: (1)对于每个物种, 首先汇总该类群专家采集或鉴定的标本信息, 随后收集有关专著或植物志详细的分布和生境记录, 这部分数据被认为是相对可靠的, 作为后续剔除和校准处理的参考; (2)基于上述可靠的物种分布和生境记录, 核对剩余的原始分布信息, 剔除错误(比如某物种不可能分布的地区)或校准有偏差的分布记录; (3)对于有具体位置的记录(例如村、镇、山峰等), 使用地图匹配的方法转换成坐标。由于青藏高原县域平均面积约为14,900 km², 最大县域面积接近200,000 km², 为了保证分布数据的精确性, 使用地理参考的方法将无法转成坐标的县级分布数据转为0.5° × 0.5°栅格, 早先研究已证实0.5°在青藏高原县级分布数据地理参考栅格化处理中是比较合适的尺度(Yu et al, 2019a; Zhang et al, 2021c)。地理参考栅

格化的具体操作如下: 首先, 将青藏高原所有县级行政单位划分为0.5° × 0.5°栅格, 提取每个栅格的最高海拔和最低海拔, 然后根据物种海拔信息筛选该物种出现的栅格(Zhang et al, 2020), 从而得到某一物种在县域内更精细的分布信息。此外, 为了验证0.5°结果的可靠性, 本研究还计算了基于1° × 1°栅格的结果(附录2–附录5), 比较发现二者结果基本一致, 考虑到0.5°栅格反映的精细地理信息, 有利于后续保护区域的选定以及相关调查的开展, 因此本研究主要展示0.5°结果。物种多样性(species richness, SR)反映一个地区物种的数目, 是多样性分析中常用的指标(张亚洲, 2021)。加权特有性(weighted endemism, WE)是反映一个地区物种特有性程度的指标, 计算方式为: 网格中每个物种分布的总网格数的倒数之和(Linder, 2001)。物种多样性和加权特有性使用Biodiverse V 2.0 (Laffan et al, 2010)计算。由于青藏高原地区主要交通方式为陆路, 且旅游自驾路线也多为公路, 本研究基于国道、省道和县道的道路数据, 计算栅格内的道路密度(道路总长度除以面积)。人口、GDP和道路密度使用空间克里金插值法(spatial kriging interpolation)进行插值(Wang et al, 2011), 最后统计到每个栅格里。本研究空间分析使用ArcGis 10.4 (<http://www.esri.com>)。

1.4 统计分析

为了分析物种多样性和特有性指标与人类活动因子的关系, 使用一般线性模型分别对物种多样性和加权特有性与人口、GDP和道路密度进行拟合, 为了比较回归系数的差异, 所有指标在拟合前标准化至0–1之间。在优先区划定分析中, 先使用主成分分析(principal component analysis, PCA)分别对2个生物指标和3个人类活动指标进行降维, 提取第一主成分(PC1, 解释率分别为70%、85%), 然后本研究设计了一个判别算法, 即选取前25% (第三中位数)生物指标PC1和前25%人类活动指标PC1的交集栅格, 定义为兼具高多样性、特有性和高人类活动影响的保护优先区。主成分分析使用FactoMineR包(Sebastien et al, 2008), 所有统计分析均在R 3.6.1中完成(R Core Team, 2019)。

2 结果

青藏高原地区药用植物多样性大体上呈东部

和东南部高,西部和西南部低的格局,高物种多样性的地区主要为云南西北部、四川西南部及西藏东部和东南部,尤其三省交界地区拥有最高药用植物多样性(159种)。四川西部和青海东部物种多样性也较高(图2A)。加权特有性指标(图2B)大体上呈现与物种多样性类似的分布格局,但是高特有性地区分布范围更小,主要集中在云南西北部、四川西南部及西藏东部和东南部(林芝地区),西藏南部和青海东部也有零星分布。基于保护区分布数据,本研究发现大部分高物种多样性和高特有性的地区未被保护区覆盖(图2)。

人类活动影响分析揭示,青藏高原东部的人类活动强度远高于中部和西部(图3)。人口数量格局显示(图3A),云南西北部人口数量最大,四川西部和西南部及青海东北部(靠近甘肃)也拥有较大的人口数量。GDP格局显示(图3B),四川西部部分地区(毗邻四川盆地)和青海东北部(毗邻甘肃)GDP最高。道路密度格局显示(图3C),沿着青藏高原东部,从云南西北部、四川西部到青海东部,其道路密度远大于青藏高原中部和西部地区。基于上述人类活动影响格局的数据,本研究分析了这些因素对物种多样性和特有性指标的影响,结果显示所有人类活动影响指标均与生物多样性指标显著正相关(图4)。人口与物种多样性的关系最小(图4A),回归系数为0.11 ($P < 0.05$);道路密度与物种多样性的关系最大(图4C),回归系数为0.65 ($P < 0.001$);GDP与物种多样性(图4B)的回归系数为0.24 ($P < 0.001$)。人口和GDP与加权特有性的关系相近(图4D, E),回归系数分别为0.26 ($P < 0.001$)和0.22 ($P < 0.001$);道路密度与加权特有性的关系最大(图4F),回归系数为0.65 ($P < 0.001$)。上述结果显示,高多样性和特有性区域与高

人类活动区域显著重合。

基于上述两种生物指标和三种人类活动指标,本研究的保护优先区分析显示,云南西北部、四川西南部和西部、青海东部及西藏中部(拉萨地区)为青藏高原药用植物保护优先区(图5)。此外,结合保护区分布数据,本研究划分出的保护优先区还有很大一部分没有被保护区覆盖。同时,这些保护优先区绝大多数在青藏高原东部靠近人口稠密、经济发达及路网密布的地区。

3 讨论

研究结果显示青藏高原药用植物的多样性主要集中在东部和东南部地区,主要包括云南西北部、四川西部和西藏东部和东南部,这与总的植物多样性格局基本一致(于海彬等, 2018)。而青藏高原药用植物的加权特有性与其多样性格局类似,但是范围缩小至青藏高原东部、云南西北部和四川西南部,这与之前的特有性研究结果一致(Zhang et al, 2016; Yu et al, 2019)。青藏高原东部和东南部丰富的植物多样性资源,归结于该地区相较于内陆地区拥有复杂的地形地貌特征(Yu et al, 2019a)、充足的水热条件(Zhang et al, 2020),并且在冰期保持相对稳定的环境(Zhang et al, 2021a)。正因为如此,青藏高原药用植物多样性和特有性的分布格局呈现空间上的极度不均匀,这对于多样性保护来说是一把双刃剑。一方面,物种空间上的集中有利于保护区设立,即利用有限的保护区最大限度地保护更多的物种。另一方面,高生物多样性往往与高人口密度地区重合(Cincotta et al, 2000; Luck, 2007),这将为保护带来不利的影响(Cardillo et al, 2004)。

本文的结果证实,青藏高原东部的人类活动强

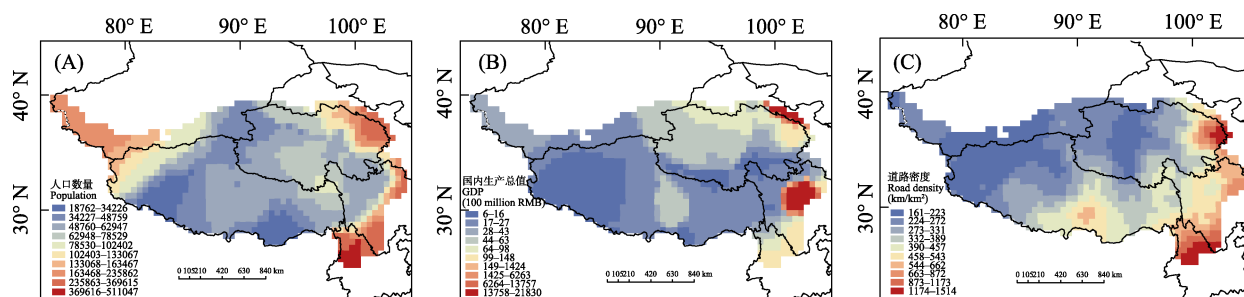


图3 青藏高原人类活动强度分布格局。(A)人口;(B)国内生产总值;(C)道路密度。

Fig. 3 The distribution pattern of human effects in the Qinghai-Tibet Plateau. (A) Population; (B) Gross domestic product (GDP); (C) Road density.

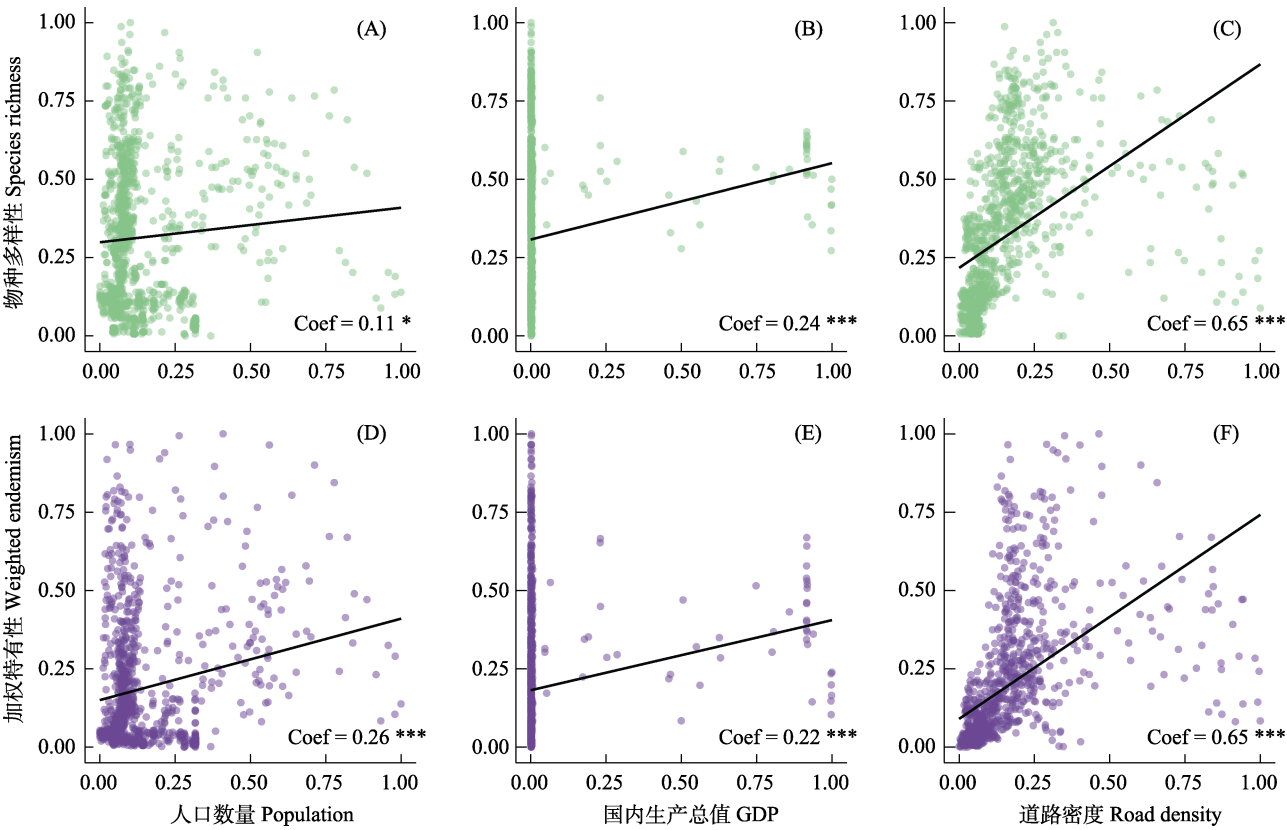


图4 生物指标与人类活动的关系。A–C: 物种多样性指标; D–F: 加权特有性指标。拟合线使用一般线性模型绘制, Coef: 模型拟合系数。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。所有因子被标准化至0–1之间。

Fig. 4 The relationships between biotic factors and human effects. A–C, Species richness; D–F, Weighted endemism. Fitted lines were drawn using linear model. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. All factors were standardized between 0–1.

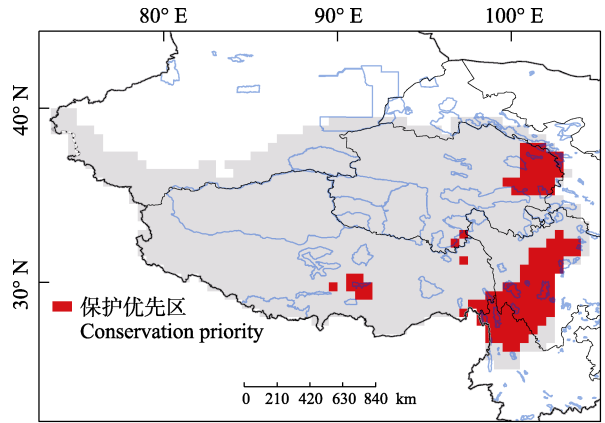


图5 青藏高原药用植物保护优先区。红色栅格为保护优先区; 蓝色线为国家级保护区。

Fig. 5 The conservation priority of medicinal plants in the Qinghai-Tibet Plateau. Red grid cells indicate the priority areas, blue lines indicate the national-level protected areas.

度远大于其他地区, 人口密度以云南西北部、四川西部东缘至青海东部最高, GDP以四川盆地西部和

青海东北部最高, 道路密度以云南西北部、四川西部东缘至青海东部最高。结合多样性和特有性格局的分析, 本研究发现较强的人类活动影响力与较高的药用植物多样性和特有性重叠, 而且这些人类活动对多样性和特有性有着显著的影响。尤其是云南西北部和四川西部, 具有最高的多样性、特有性和最强的人类活动影响, 这在之前的研究中已有报道 (Qian et al, 2020; Zhang et al, 2021a)。在这些人类活动中, 需要着重关注道路密度, 因为青藏高原地区药用植物的采挖破坏与发达的旅游业密不可分 (Zhang et al, 2019, 2021a; 张亚洲, 2021)。藏区自驾游主要依赖云南境内的国道214、四川境内的国道317和318及其分支, 每年有大量游客通过上述3条路线进藏, 因而其沿线的药用植物资源需要重点关注。本研究既阐明了当前青藏高原地区药用植物的分布状况, 又量化了人类活动对药用植物的威胁, 为其保护评估和政策制定提供了数据资料。此外,

在以往的研究中经常会探究人类活动与生物多样性的关系,例如高人类活动影响降低了中国野生兰科植物的多样性(张晓龙等, 2014)^①,但是也有研究发现人类活动与多样性指标正相关(Zhao et al, 2020)。无论是正相关还是负相关,我们对人类活动的解释有时候存在误区,即很多时候我们混淆了“统计相关”和“逻辑相关”,前者是人为选定因子进行统计拟合,得出相关的结论,其逻辑性未必是合理的,正如前所述,高生物多样性往往与高人口密度地区重合(Cincotta et al, 2000; Luck, 2007),因为高的生物多样性提供了丰富的生物资源从而支持了人类的聚集,但是不少研究认为是人类活动驱动了生物多样性,这个解释在某些地区确有其合理性,但是不能一概而论。此外,人类活动与生物多样性正相关的另一个原因可能是:由于人类活动以及交通的便利性,增加了植物标本的采集频率,进而促进了植物物种的分布信息数据收集,从而增加了生物多样性(Wang et al, 2020)。在青藏高原地区,本研究所揭示的人类活动与生物多样性显著正相关,其实反映的正是东南部地区高的生物多样性对密集人类活动的支撑作用,因而高生物多样性和高人类活动在该地区“重合”(overlap)。

保护优先区的划定常依赖于生物指标,例如物种多样性或特有性(Myers et al, 2000),受威胁物种数量(Zhang et al, 2015)、功能多样性(Xu et al, 2019)、系统发育指标(Faith, 1992)等,但是很少有研究在划定保护优先区时同时考虑生物指标与人类活动指标(除了Zhang等(2020))。因此,在有限的保护资源下,为了最大限度保护更多的、受威胁更严重的特有物种,本研究结合生物和人类活动两方面因素,划定了保护优先区,包括云南西北部、四川西南部和西部、青海东部及西藏中部(拉萨地区)。然而,上述优先区被保护区覆盖的程度并不高,留有大量保护空缺,因而未来的保护区规划和保护政策的制定应该更多地关注这些区域。解决当前保护困境的关键在于要综合全社会、政府、科研人员和广大人民群众的力量,虽然建立保护区只是一个方面,但是建立保护区同样是当前紧要的任务。首先,大量的研究表明我国存在非常大的保护空缺(Zhang

et al, 2015; Xu et al, 2019; Qian et al, 2020; Zhang et al, 2020),建立保护区是填补空缺的一个重要举措。另外,生物多样性公约第十五次缔约方大会提出了到2030年要保护地球30%的陆地和海洋面积的目标,但是实现这个目标是非常困难的,以中国生物多样性最丰富的云南省为例,其保护面积约占全省国土面积的14.32% (https://www.mee.gov.cn/ywdt/dfnews/202007/t20200707_788049.shtml),仅建立保护区这一项,就任重道远。

综上,本研究针对目前青藏高原药用植物资源分布和保护情况,提出以下5点保护建议:

(1)完善法律法规及政策监管。法律法规是监督保护成效的根本保障,也是制止或惩罚破坏行为的最终依据。相关部门应制定具体的法律法规和政策;加强对药用植物在法律和政策层面上的保护。

(2)增设保护区。本研究发现当前存在大量保护空缺,因而需要在重点区域增加保护区。此外,针对药用植物资源建立针对性的保护区也有积极意义,例如引起社会关注并起到保护示范作用。

(3)尽快补充和完善国家重点保护野生植物名录,收录濒危且有重要价值或开发潜力的药用植物。受破坏最为严重的雪莲(雪兔子)、贝母等都被纳入国家重点保护野生植物名录(第一批),但是在最近发布的《国家重点保护野生植物名录》(<http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210908/162515850572900.html>)中已将所有的贝母属植物、受威胁最严重的水母雪兔子、绵头雪兔子、巴朗山雪莲等植物纳入其中,这是青藏高原药用植物保护关注度提升的体现,具有积极的意义。但是两版名录发布间隔超过二十年,其中有大量物种在这期间遭受破坏,我们认为需要加强后续的植物保护评估,此外还应增加名录修订的频率。

(4)加强科普宣传。公众的保护行动建立在广泛保护宣传的基础上。随着藏区旅游业的发展,大量游客的涌入给青藏高原药用植物资源保护带来了严峻的挑战,诸如购买虚假宣传“神药”、采摘或抓捕奇特的动植物、乱丢垃圾、碾压植被等。积极的保护宣传可以将大量游客从潜在的植物资源破坏者变成积极的保卫者,这对于生态保护有着积极的意义。

(5)加强药用植物种质资源的收集、保存与开

^① 张晓龙 (2014) 中国野生兰科植物地理分布格局研究. 硕士学位论文, 山西大学, 太原.

发。在气候变化背景下, 建立种质资源的收集与保存机制为生物多样性保护提供最后的保障。加强野生药用植物的栽培驯化, 既有利于推动当地经济发展, 促进区域乡村振兴, 更有利于保护野生药用植物资源, 实现药用植物资源可持续利用。

ORCID

赵仁生  <https://orcid.org/0000-0002-8681-0527>
许诗嘉  <https://orcid.org/0000-0002-3302-5111>
宋鹏飞  <https://orcid.org/0000-0001-8863-3985>
周翔  <https://orcid.org/0000-0002-8393-1091>
张亚洲  <https://orcid.org/0000-0002-5148-3423>
袁燕  <https://orcid.org/0000-0003-2346-1638>

致谢: 感谢中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室杨洁研究员和孙露博士后在数据收集及论文写作和修改中给予的帮助。

参考文献

- Cardillo M, Purvis A, Sechrest W, Gittleman JL, Bielby J, Mace GM (2004) Human population density and extinction risk in the world's carnivores. *PLoS Biology*, 2, 909–914.
- Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM (2015) Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1, e1400253.
- Chinese Materia Medica Editorial Committee (2002) Chinese Materia Medica Zang Medicine Volume. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [中华本草编委会 (2002) 中华本草: 藏药卷. 上海科学技术出版社, 上海.]
- Cincotta RP, Wisniewski J, Engelman R (2000) Human population in the biodiversity hotspots. *Nature*, 404, 990–992.
- Comprehensive Scientific Expedition Team of the Qinghai-Tibet Plateau of the Chinese Academy of Sciences (1993) Vascular Plants in Hengduan Mountain. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院青藏高原综合科学考察队 (1993) 横断山维管植物. 科学出版社, 北京.]
- Ding WN, Ree RH, Spicer RA, Xing YW (2020) Ancient orogenic and monsoon-driven assembly of the world's richest temperate alpine flora. *Science*, 369, 578–581.
- Editorial Committee of Flora of China (1961–2002) Flora Reipublicae Popularis Sinicae (Flora of China). Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国植物志编委会 (1961–2002) 中国植物志. 科学出版社, 北京.]
- Faith DP (1992) Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61(1), 1–10.
- Gansu Flora Editorial Committee (2005) Flora of Gansu. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou. (in Chinese) [甘肃植物志编辑委员会 (2005) 甘肃植物志. 甘肃科学技术出版社, 兰州.]
- Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (1983) Flora of Tibet. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院昆明植物研究所 (1983) 西藏植物志. 科学出版社, 北京.]
- Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (2006) Flora of Yunnan. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院昆明植物研究所 (2006) 云南植物志. 科学出版社, 北京.]
- Laffan SW, Lubarsky E, Rosauer DF (2010) Biodiverse, a tool for the spatial analysis of biological and related diversity. *Ecography*, 33, 643–647.
- Law W, Salick J (2005) Human-induced dwarfing of Himalayan snow lotus, *Saussurea laniceps* (Asteraceae). *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 102, 10218–10220.
- Li XW, Li J (1993) A preliminary floristic study on the feed plants from the region of Hengduan Mountains. *Acta Botanica Yunnanica*, 15, 217–231. (in Chinese with English abstract) [李锡文, 李捷 (1993) 横断山脉地区种子植物区系的初步研究. 云南植物研究, 15, 217–231.]
- Linder HP (2001) On areas of endemism, with an example from the African Restionaceae. *Systematic Biology*, 50, 892–912.
- Liu J, Milne RI, Cadotte MW, Wu ZY, Provan J, Zhu GF, Gao LM, Li DZ (2018) Protect third pole's fragile ecosystem. *Science*, 362, 1368–1368.
- Luck GW (2007) A review of the relationships between human population density and biodiversity. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 82, 607–645.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Niu Y, Stevens M, Sun H (2021) Commercial harvesting has driven the evolution of camouflage in an alpine plant. *Current Biology*, 31, 446–449.
- Peng DL, Sun L, Pritchard HW, Yang J, Sun H, Li ZM (2019) Species distribution modelling and seed germination of four threatened snow lotus (*Saussurea*), and their implication for conservation. *Global Ecology and Conservation*, 17, e00565.
- Qian LS, Chen JH, Deng T, Sun H (2020) Plant diversity in Yunnan: Current status and future directions. *Plant Diversity*, 42, 281–291.
- R Core Team (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rana SK, Rana HK, Ranjitkar S, Ghimire SK, Gurmachan CM, O'Neill AR, Sun H (2020) Climate-change threats to distribution, habitats, sustainability and conservation of highly traded medicinal and aromatic plants in Nepal. *Ecological Indicators*, 115, 106435.

- Sebastien L, Julie J, Francois H (2008) Factominer: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18.
- Sichuan Flora Editorial Committee (1981–2007) *Flora of Sichuan*. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [四川植物志编委会 (1981–2007) 四川植物志. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Sun H, Niu Y, Chen YS, Song B, Liu CQ, Peng DL, Chen JG, Yang Y (2014) Survival and reproduction of plant species in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Systematics and Evolution*, 52, 378–396.
- Sun H, Zhang JW, Deng T, Boufford DE (2017) Origins and evolution of plant diversity in the Hengduan Mountains, China. *Plant Diversity*, 39, 161–166.
- Wang B, Bao Q, Hoskins B, Wu GX, Liu YM (2008) Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia. *Geophysical Research Letters*, 35, L14702.
- Wang SW, Zhou YD, Musili PM, Mwachala G, Hu GW, Wang QF (2020) Inventory incompleteness and collecting priority on the plant diversity in tropical East Africa. *Biological Conservation*, 241, 108313.
- Wang ZH, Fang JY, Tang ZY, Lin X (2011) Patterns, determinants and models of woody plant diversity in China. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 2122–2132.
- Wu ZY, Raven P, Hong DY (2013) *Flora of China*, Vol. 2–3 (Pteridophytes). Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Xing YW, Ree RH (2017) Uplift-driven diversification in the Hengduan Mountains, a temperate biodiversity hotspot. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 114, E3444–E3451.
- Xinjiang Flora Editorial Committee (1993–1996) *Flora of Xinjiang*. Xinjiang Science, Technology and Healthy Press, Urumqi. (in Chinese) [新疆植物志编委会 (1993–1996) 新疆植物志. 新疆科技卫生出版社, 乌鲁木齐.]
- Xu Y, Huang JH, Lu XH, Ding Y, Zang RG (2019) Priorities and conservation gaps across three biodiversity dimensions of rare and endangered plant species in China. *Biological Conservation*, 229, 30–37.
- Yu HB, Deane DC, Sui XH, Fang SQ, Chu CJ, Liu Y, He FL (2019a) Testing multiple hypotheses for the high endemic plant diversity of the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Biogeography*, 28, 131–144.
- Yu HB, Favre A, Sui XH, Chen Z, Qi W, Xie GW (2019b) Mapping the genetic patterns of plants in the region of the Qinghai-Tibet Plateau: Implications for conservation strategies. *Diversity and Distributions*, 25, 310–324.
- Yu HB, Zhang YL, Liu LS, Chen C, Qi W (2018) Floristic characteristics and diversity patterns of seed plants endemic to the Tibetan Plateau. *Biodiversity Science*, 26, 130–137. (in Chinese with English abstract) [于海彬, 张镫锂, 刘林山, 陈朝, 祁威 (2018) 青藏高原特有种子植物区系特征及多样性分布格局. *生物多样性*, 26, 130–137.]
- Yunnan Vegetation Writing Group (1987) *Yunnan Vegetation*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [云南植被编写组 (1987) 云南植被. 科学出版社, 北京.]
- Zhang DC, Ye JX, Sun H (2016) Quantitative approaches to identify floristic units and centres of species endemism in the Qinghai-Tibetan Plateau, south-western China. *Journal of Biogeography*, 43, 2465–2476.
- Zhang YZ (2021) *Plant Diversity Patterns and Formation Mechanisms of the Alpine Subnival in the Hengduan Mountains*. PhD dissertation, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming. (in Chinese with English abstract) [张亚洲 (2021) 横断山区高山冰缘带植物多样性格局及形成机制研究. 博士学位论文, 中国科学院昆明植物研究所, 昆明.]
- Zhang YZ, Chen JG, Sun H (2021a) Alpine speciation and morphological innovations: Revelations from a species-rich genus in the northern hemisphere. *AoB PLANTS*, 13, plab018.
- Zhang YZ, Qian L, Spalink D, Sun L, Chen J, Sun H (2021b) Spatial phylogenetics of two topographic extremes of the Hengduan Mountains in southwestern China and its implications for biodiversity conservation. *Plant Diversity*, 43, 181–191.
- Zhang YZ, Qian LS, Chen XF, Sun L, Sun H, Chen JG (2021c) Diversity patterns of cushion plants on the Qinghai-Tibet Plateau: A basic study for future conservation efforts on alpine ecosystems. *Plant Diversity (Online)*. <http://doi.org/10.1016/j.pld.2021.09.001>.
- Zhang YZ, Qian LS, Spalink D, Sun L, Chen JG, Sun H (2020) Spatial phylogenetics of two topographic extremes of the Hengduan Mountains in southwestern China and its implications for biodiversity conservation. *Plant Diversity*, 43, 181–191.
- Zhang YZ, Tang R, Huang XH, Sun WG, Ma XG, Sun H (2019) *Saussurea balangshanensis* sp. nov. (Asteraceae), from the Hengduan Mountains region, SW China. *Nordic Journal of Botany*, 37, njb.02078.
- Zhang ZJ, He JS, Li JS, Tang ZY (2015) Distribution and conservation of threatened plants in China. *Biological Conservation*, 192, 454–460.
- Zhao ZX, Yang L, Long JK, Chang ZM, Zhou ZX, Zhi Y, Yang LJ, Li HX, Sui YJ, Gong N, Wang XY, Chen XS (2020) Testing seven hypotheses to determine what explains the current planthopper (Fulgoroidea) geographical and species richness patterns in China. *Insects*, 11, 892.

(责任编辑: 龙春林 责任编辑: 李会丽)

附录 Supplementary Material

附录1 本研究整理的青藏高原药用植物名录

Appendix 1 The checklist of medicinal plants in the Qinghai-Tibet Plateau in this study

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021385-1.xlsx>

附录2 基于1°栅格的青藏高原药用植物物种多样性和加权特有性分布格局

Appendix 2 The patterns of species diversity and weighted endemism in the Qinghai-Tibet Plateau based on 1-degree grid cell

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021385-2.pdf>

附录3 基于1°栅格的青藏高原人类活动强度分布格局

Appendix 3 The pattern of human effects in the Qinghai-Tibet Plateau based on 1-degree grid cell

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021385-3.pdf>

附录4 基于1°栅格的生物指标与人类活动的关系

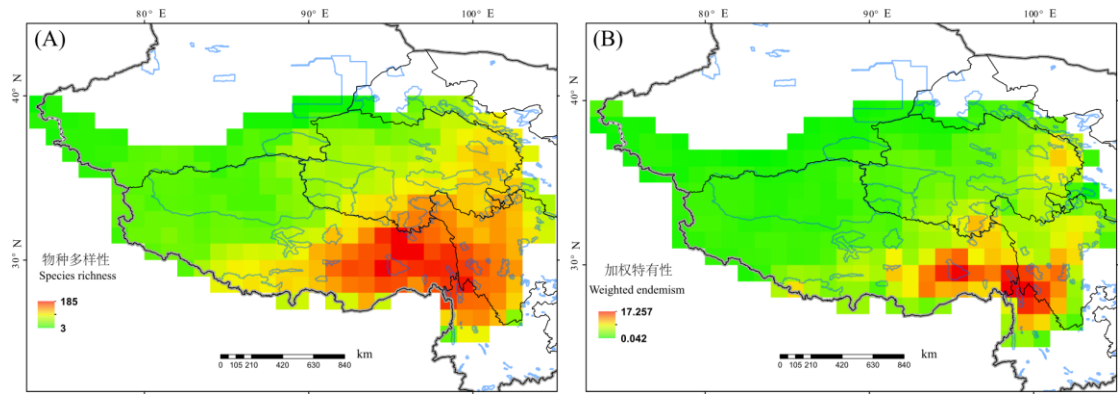
Appendix 4 The relationships between biotic factors and human effects based on 1-degree grid cell

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021385-4.pdf>

附录5 基于1°栅格的青藏高原药用植物保护优先区

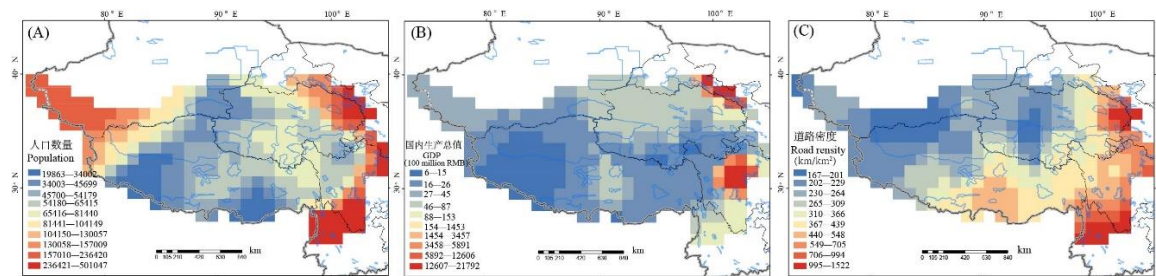
Appendix 5 The conservation priority of medicinal plants in the Qinghai-Tibet Plateau based on 1-degree grid cell

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021385-5.pdf>



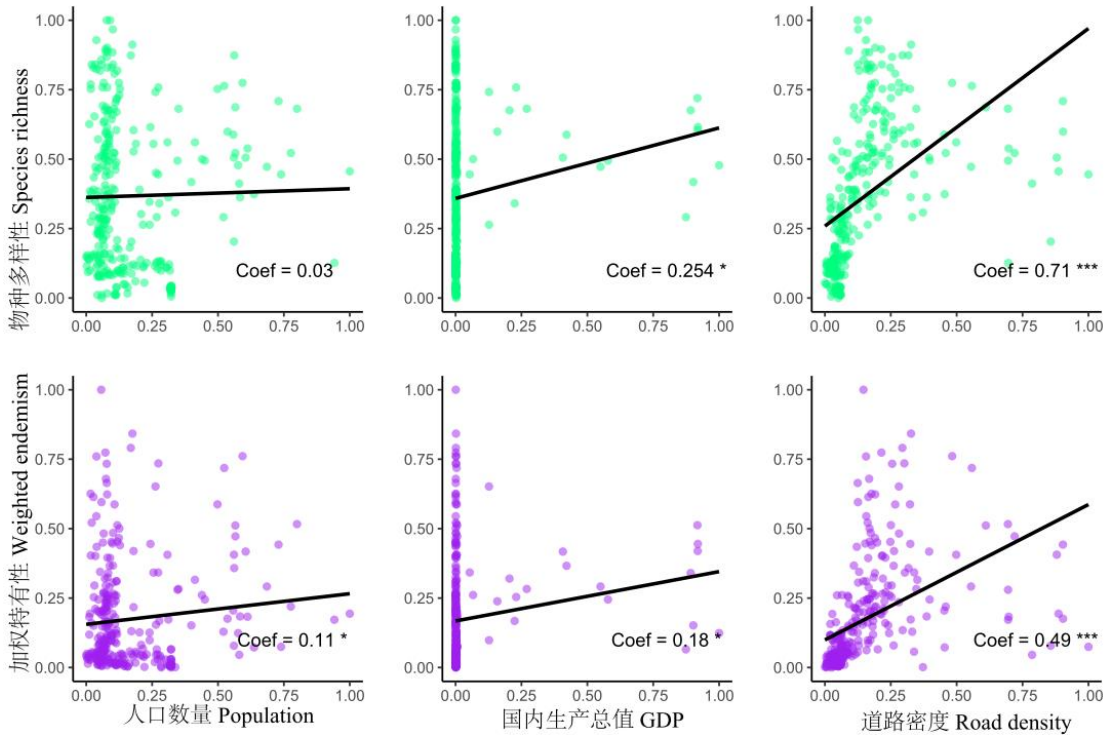
附录 2 基于 1°栅格的青藏高原药用植物物种多样性和加权特有性分布格局。(A)物种多样性, (B)加权特有性。图中蓝色线条为国家级保护区范围。

Appendix 2 The patterns of species diversity and weighted endemism in the Qinghai-Tibet Plateau based on 1-degree grid cell. (A) species richness, (B) Weighted endemism. Blue lines indicate the national-level protected areas.



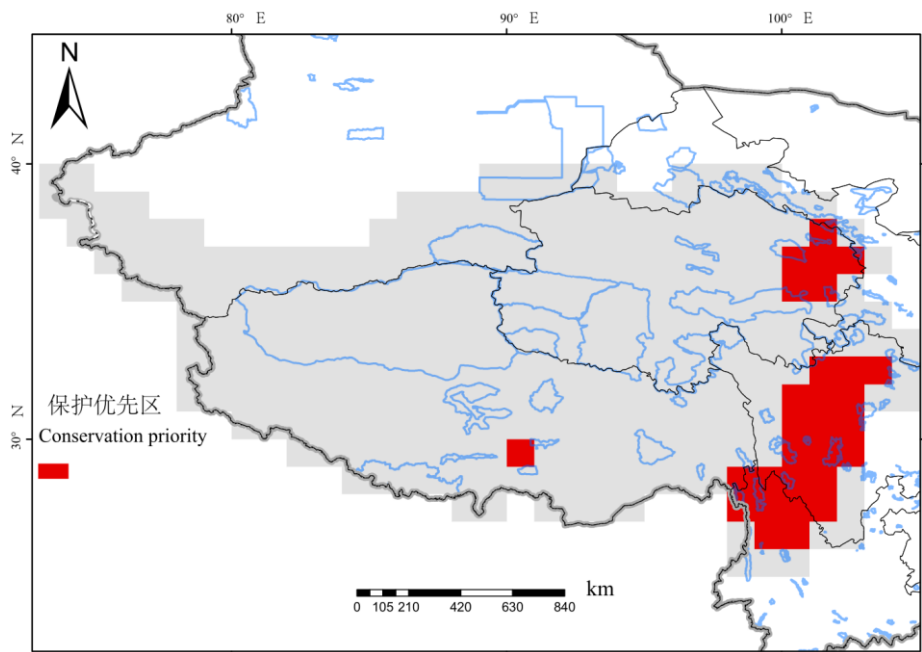
附录 3 基于 1°栅格的青藏高原人类活动强度分布格局。(A)人口数量; (B)国内生产总值; (C)道路密度。

Appendix 3 The pattern of human effects in the Qinghai-Tibet Plateau based on 1-degree grid cell. (A) Population; (B) GDP, (C) Road density.



附录 4 基于 1°栅格的生物指标与人类活动的关系。A–C: 物种多样性指标; D–F: 加权特有性指标。拟合线使用一般线性模型绘制, Coef: 模型拟合系数。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。所有因子被标准化至 0–1 之间。

Appendix 4 The relationships between biotic factors and human effects based on 1-degree grid cell. A–C, Species richness; D–F, Weighted endemism. Fitted lines were drawn using linear model. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. All factors were standardized between 0–1.



附录 5 基于 1° 栅格的青藏高原药用植物保护优先区。红色栅格为保护优先区，蓝色线为国家级保护区。
Appendix 5 The conservation priority of medicinal plants in the Qinghai-Tibet Plateau based on 1-degree grid cell. Red grid cells indicate priority areas, blue lines indicate national-level protected areas.