



论 文

珠穆朗玛峰绒布河流域高山植被垂直分布格局

周阳¹, 李博文¹, 吕静雅^{1,4}, 阿旺^{1,4}, 陈兰英², 刘世章², 伍晶², 吕汪汪¹, 孙建平¹,
贾跃凤³, 赵矿⁵, 贾小华⁵, 汪诗平^{1*}

1. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101

2. 西藏大学生态环境学院, 拉萨 850000

3. 西藏低碳草牧科技有限公司, 拉萨 850030

4. 中国科学院大学, 北京 100049

5. 西藏自治区生态环境厅, 拉萨 850000

* 联系人, E-mail: wangsp@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2024-08-21; 接受日期: 2024-12-03; 网络版发表日期: 2025-05-08

西藏自治区生态环境监测中心项目和国家自然科学基金(批准号: 32201358)资助

摘要 青藏高原植被类型具有纬向、经向和垂直高度等“三维”分布特征, 由于生态环境条件和交通可达性等限制, 以往多是基于公路、铁路沿线或山脚等区域开展植被调查, 并以这些基带植被与气候因子的关系推理山体垂直带谱, 因此具有很大的不确定性. 本文在珠峰绒布河流域选择4个基线海拔高度、8座山体(包括阴、阳坡)进行整个山体垂直带的植物组成调查, 探讨不同基带海拔高度调查情景对植物组成和植被类型的影响. 本文发现不同基带调查情景下, 群落物种组成存在显著差异, 同时优势种组成及优势度随着基带调查情景的不同而发生变化; 特别是高海拔山脚基带植物组成和植被类型与低海拔相同或相似海拔高度的山顶植物组成和植被类型显著不同. 此外, 不完整的坡面调查对于山体垂直带植被类型的分布情况造成严重干扰, 其中1/4、2/4和3/4基带调查分别低估高山灌丛带527 m、336 m和268 m的垂直分布高度, 而高山草原带的分布区间分别被高估440 m、329 m和271 m. 这些结果表明以往基于不同海拔的山脚基带植被类型不能准确反映相应的山体垂直带物种组成及植被分布.

关键词 绒布河流域, 物种组成, 物种分布, 垂直带谱, 珠穆朗玛峰

青藏高原作为世界屋脊, 是我国重要的生态安全屏障^[1]. 其独一无二的地理-地质-生态单元, 形成独特的地貌类型和多样的植被分布格局^[2]. 自20世纪50年代以来, 大量的中国学者在青藏高原开展植被调查工作^[3-6]. 现有的调查主要集中在植被覆盖度的定量估算以及区域植被变化规律等, 例如植被的水平地带性研究中, 自东南向西北方向, 降水逐渐减少, 植被呈现

山地森林-高寒灌丛、高寒草甸-高寒草原和荒漠草原的水平地带性分布格局. 同时, 随着海拔梯度上升, 温度呈现递减趋势, 高原植被也呈现明显的垂直地带性分布^[6,7]. 因此, 青藏高原植被独特的地带性分布格局及其特殊的结构和功能, 对于研究我国乃至世界范围内植被地理分布规律至关重要^[8].

尽管青藏高原植被调查的相关研究已经大范围展

引用格式: 周阳, 李博文, 吕静雅, 等. 珠穆朗玛峰绒布河流域高山植被垂直分布格局. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 1500-1515

Zhou Y, Li B W, Lv J Y, et al. The vertical distribution pattern of alpine vegetation in the Rongbu River Basin of Mount Qomolangma (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2025, 55: 1500-1515, doi: 10.1360/SSV-2024-0232

开,然而受时间以及环境条件限制,植被调查的研究相对较为分散,数据相对较少,调查结果的数据资料可能存在遗漏和偏差^[9-14]。特别是以往关于青藏高原植被垂直分布的调查研究主要集中在公路、铁路两侧或山脚附近^[15-19],或在较大的海拔间隔下进行非连续植被调查^[20,21],结合地理信息和气候数据模拟区域植被类型分布情况^[22]。然而这种植被调查方法往往会忽略部分山体坡面、山顶与基带物种分布的差异性,同时无法在较小的空间尺度上区分优势种组成的差异,因此调查结果与真实的山体垂直带上植被分布情况可能存在差异。有研究发现,青藏高原植被的垂直分布地带性相较于纬向地带性变异更大,特别是近几十年区域气候变化以及人类活动的干扰,例如冰川退缩和雪线上升等^[23,24],不同海拔高寒植物种类和分布可能已经发生剧烈变化^[25]。此外,高海拔山脚植被与低海拔相同或相似海拔高度的山顶植被,以及阴坡和阳坡的植被类型及其分布可能并不一致,因为不同区域水热条件、资源有效性以及种间关系可能存在差异^[26-28]。因此以往根据山脚基带植被或纬向水平分布来推断山体垂直带的植被分布类型可能会大大增加青藏高原植被空间分布格局的不确定性,亟需对往期的植被调查资料进行补充和更新。

基于此,本研究在2023年8月份对珠峰北坡绒布河流域4个海拔区间上的8个山体的完整坡面进行植被调查,共获取880个群落样方数据。本研究旨在更加深入了解珠峰绒布河流域植被的山体垂直分布特征,通过对比不同基带调查情景与完整山体坡面物种组成的差

异以及相同或相似海拔区间山脚-山顶物种分布差异,探讨以往沿公路或铁路沿线在相对较低的海拔基带上进行的植被调查对群落物种组成评估可能存在的不确定性,同时探讨这种不确定性是否只受海拔的影响。本研究为青藏高原植被分布的修订提供科学依据,同时为青藏高原植物保护、退化恢复和资源利用提供更完善的数据资料。

1 研究方法

1.1 研究区概况

本次野外调查于2023年8月1日开始,持续约15天,调查区域为喜马拉雅山北坡珠峰绒布河流域两岸,研究区地理位置信息为: 87°0'3"E, 28°16'55"N, 平均海拔为: 4796 m (图1), 区域年平均温度大约在-5℃, 降水大约为230 mm。本文以3785 m为调查的基线海拔,由低向高依次选取4个海拔梯度的山体垂直带,每个垂直带高度近似的阴坡和阳坡2座山体坡面。因此,4个海拔梯度的调查区域共包含8个山体坡面(图1),具体每个坡面位置及海拔信息见表1。

不同海拔区间的峡谷断面包含对称的两个山体坡面(例如M01和M02),坡向分别为阴坡和阳坡。本文以“U”字型自阴坡山顶-河谷-阳坡山顶设计2条平行样线,其中每条样线长度为100 m,以10 m间隔等间距进行物种组成的样方调查,每个样方面积为1 m×1 m,以10 cm×10 cm间隔对样方划分网格,利用网格针刺法记录样方内100个格点上植物种类,同时标记样方编号、

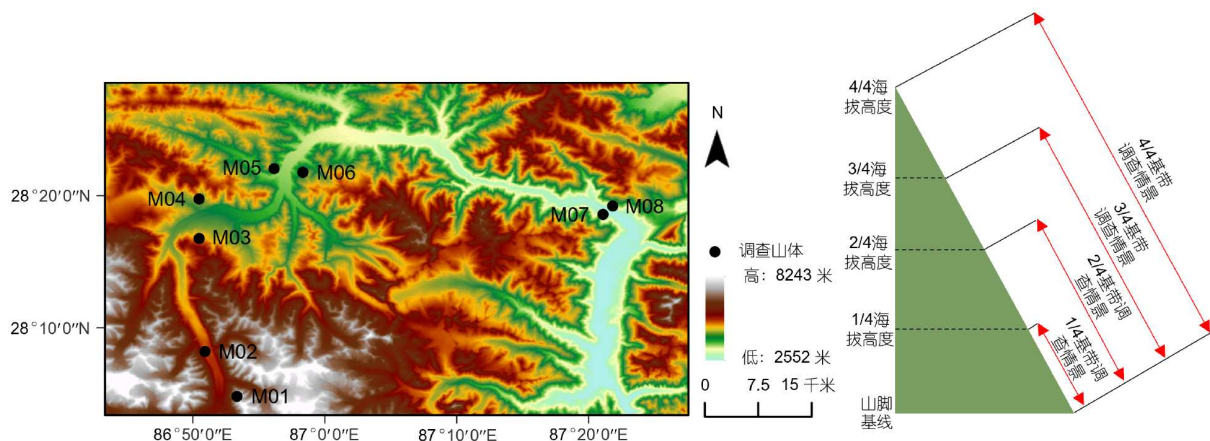


图1 绒布河流域取样点位置信息高程图(M01~M08分别为8个取样点的具体位置)

Figure 1 Elevation map of sampling sites in the Rongbu River Basin (M01-M08 indicate the specific locations of sampling sites)

表 1 绒布河流域不同取样点位置及环境信息

Table 1 The locations and environmental information of different sampling sites in the Rongbu River Basin

山体编号	位置信息			海拔范围(m)		气象信息	
	经度	纬度	坡向	最低海拔	最高海拔	年降水量(mm)	年均温度(℃)
M01	86°53'21.03"E	28°04'49.29"N	阳坡	5129	5275	1101	-6.4
M02	86°50'55.84"E	28°08'12.86"N	阴坡	5159	5281	685	-6.2
M03	86°50'57.17"E	28°17'42.91"N	阴坡	4619	5041	403	0.9
M04	86°50'44.03"E	28°19'33.68"N	阳坡	4720	5029	451	1.7
M05	86°56'37.14"E	28°22'29.10"N	阴坡	4329	4755	330	3.1
M06	86°57'55.40"E	28°22'16.53"N	阳坡	4381	4652	342	3.5
M07	87°20'57.28"E	28°18'54.76"N	阴坡	3785	4123	734	2.2
M08	87°21'19.09"E	28°19'11.82"N	阳坡	3810	4313	734	2.2

物种名称、样地位置及海拔高度等信息, 共计调查 880 个样方。在获取每个山体坡面的物种信息后, 利用相对密度、相对频度和相对盖度计算群落中物种重要值描述群落物种组成的差异。通过人为划分物种调查的不同海拔上限, 模拟不同基带调查情景(如 1/4 海拔高度调查情景: 调查的基带海拔高度为整个山体绝对高度的 1/4; 2/4 海拔高度调查情景: 调查的基带海拔高度为整个山体绝对高度的 2/4; 3/4 海拔高度调查情景: 调查的基带海拔高度为整个山体绝对高度的 3/4; 4/4 海拔高度调查情景: 调查的基带为整个山体)(图 1)。通过分析不同基带调查情景下物种组成及其分布的差异, 试图探讨以往植被调查对于流域及山体坡面物种组成评估的不确定性。具体物种相关指标的计算公式如下:

物种*i*相对密度(absolute density): 第*i*个物种个体数量(*N_i*)占有物种个体总数(总物种数*n*), 指标记为 *RD_i* (%):

$$RD_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} * 100\%. \quad (1)$$

物种*i*相对频度(relative frequency): 第*i*个物种在所有样方中出现的频度(*F_i*)相对于所有物种在样方中出现频度总和, 指标记为 *RF_i* (%):

$$RF_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} * 100\%. \quad (2)$$

物种*i*相对盖度(absolute density): 第*i*个物种个体绝对盖度(*P_i*)相对于所有物种个体绝对盖度之和, 指标记为 *RP_i* (%):

$$RP_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} * 100\%. \quad (3)$$

重要值(importance value): 第*i*个物种重要值为以上三种指标的平均值, 记为 *IV_i* (%):

$$IV_i = \frac{(RD_i + RF_i + RP_i)}{3}. \quad (4)$$

1.2 数据处理和分析

参考《西藏植物志》^[29]确定物种名称, 同时将观察以及采集到的植物按生活型划分为草本、半灌木(包括半灌木状草本植物)及灌木, 结合物种在群落中的重要值排序划分优势种组成, 以重要值排序第一为最优种, 第二为次优势种。此外, 根据《中国的植被》^[30]和《西藏植被》^[31]的植被区系划分原则, 结合实地调查以及文献资料, 分析研究区内植被的垂直分布规律, 根据物种分布划分主要植被类型的海拔分布上限和下限, 并以此划分山体垂直带谱。对于不同山体坡面和各基带调查情景的物种组成而言, 本文利用 R 语言(R-4.3.2)对珠峰绒布河流域各山体垂直带的物种组成进行统计分析, 同时利用 bray-curtis 距离描述群落之间的相异度, 通过主坐标分析(principal coordinates analysis, PCoA)对不同基带情景群落差异性进行可视化处理, 并利用多元置换方差分析比较群落物种组成是否存在显著差异。

2 结果

2.1 绒布河流域不同基带调查情景植物物种组成

总体上, 本次绒布河流域物种调查的结果发现, 在 3785~5281 m 的海拔区间内, 共监测到 76 种植物, 其中 M01~M08 等山体物种总数量分别为: 33, 26, 48, 29,

36, 33, 25, 15 (网络版附表1). 对整个绒布河流域不同坡向的4个基带调查情景的群落物种组成分析后发现, 阳坡的1/4基带调查情景物种组成与完整坡面(4/4基带情景) 群落物种组成存在显著差异(图2A), 而阴坡的1/4和2/4基带情景与完整坡面的物种组成差异均达到显著水平(图2B).

进一步分析群落物种组成的结果发现, 阴坡和阳坡优势种组成并不一致(图3). 其中, 基于重要值判断阳坡最优种均为黑褐苔草(*Carex alrofusca*), 而次优势种在不同基带情景下存在差异. 其中阳坡的1/4基带情景为垂穗披碱草(*Elymus nutans*) 和二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*), 而2/4, 3/4和4/4基带情景均为金露梅(*Po-*

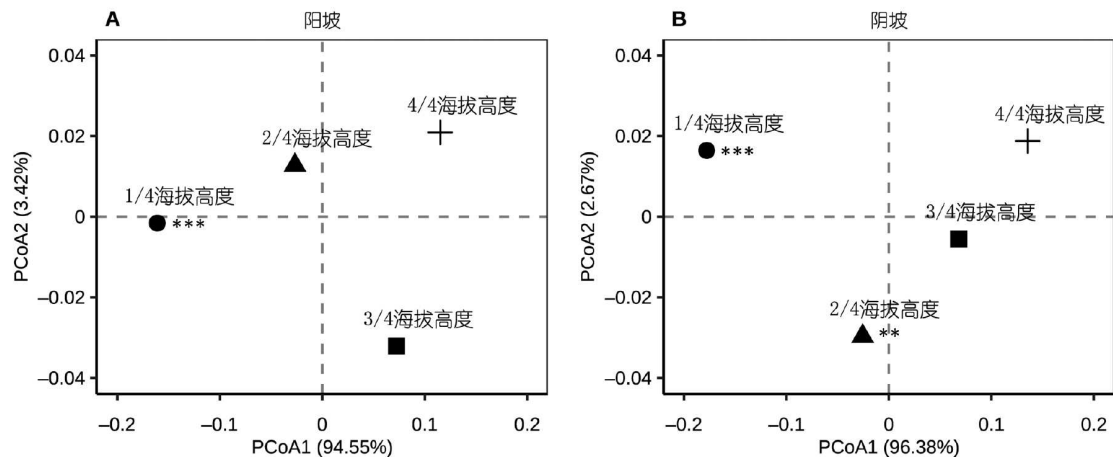


图 2 绒布河流域阴坡和阳坡不同基带调查情景群落相异度. A和B分别为阳坡和阴坡在4种调查情景下群落物种组成基于bray-curtis的相异度结果. *表示与4/4基带情景相比, 群落物种组成差异的显著性(*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$); PCoA1: 群落相异度第一特征向量; PCoA2: 群落相异度第二特征向量

Figure 2 Dissimilarity of community composition among different belts on the shady and sunny slopes of the Rongbu River Basin. A and B show the results of dissimilarity based on bray-curtis for community species composition under four different survey scenarios on the sunny and shady slopes, respectively. * indicates the significance of community species composition differences compared to the 4/4 baseline scenario (*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$); PCoA1: first principal coordinate of community dissimilarity; PCoA2: second principal coordinate of community dissimilarity

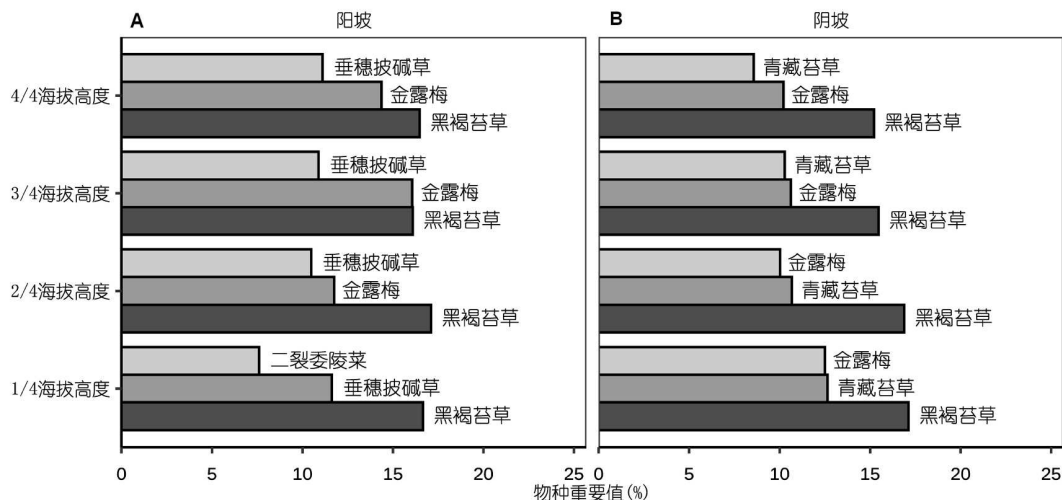


图 3 绒布河流域不同坡向及调查情景基带主要物种重要值的变化. A和B分别为4种调查情景下阳坡和阴坡3个优势物种的重要值

Figure 3 Changes in the importance values of dominant species and the composition of primary species in different slopes under different survey scenarios in the Rongbu River Basin. A and B illustrate the importance values of the three dominant species on the sunny and shady slopes under four different survey scenarios, respectively

tentilla fruticosa) 和垂穗披碱草(图3A)。此外, 随着基带海拔提高, 垂穗披碱草的优势度由第2逐渐下降到第3。与阳坡不同, 各基带情景下, 阴坡的主要物种组成均为黑褐苔草、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)和金露梅, 仅物种的优势度排序存在差异(图3B), 其中随着基带海拔上升, 青藏苔草优势度下降, 而金露梅优势度则有所上升(图3B)。此外, 对比不同植物群落优势种的盖度变化, 发现灌丛类主要以金露梅为最优种, 而草本植物主要以黑褐苔草为最优种在各基带区间分布。其中对于草本植物而言, 不同基带情景下阳坡黑褐苔草的盖度变化并不显著。对于阴坡, 1/4基带情景下, 黑褐苔草盖度显著高于其在完整坡面上的盖度约46.28%。对于灌丛而言, 阳坡1/4基带调查显著低估金露梅盖度约72.1%(图4A), 而阴坡1/4基带情景显著高估了金露梅盖度约54.82%(图4B)。

2.2 各山体不同基带调查情景的物种组成

对于具体山体的不同基带调查情景而言, 群落物种组成的变化并不一致(图5和6)。具体而言, M01和M02山体的4种基带调查情景下, 群落物种组成的差异并不明显(图5A和B)。其余6个山体的1/4和2/4(M08除外)基带上的物种组成均与各自完整山体坡面上(4/4基带情景)物种组成存在显著差异(图5C~H); 而3/4基带情景下物种组成与完整坡面的群落物种组成的差异则并不显著(图5)。

进一步对不同山坡基于物种的重要值分析优势物种组成的变化, 发现M07和M08山体的1/4和2/4基带情景下, 最优种均为变色锦鸡儿(*Caragana versicolor*), 次优势种为西藏早熟禾(*Poa tibetica*)、垂穗披碱草和鼠尾草(*Salvia miltiorrhiza*)。随着基带海拔上升, 变色锦鸡儿优势地位逐渐被西藏早熟禾替代(图6G和H), 同时与完整坡面相比, M08山体的1/4基带情景可能会显著高估其盖度约2倍(图7H)。对于M05和M06山体, 植被类型以高山草原为主, 优势种组成存在差异(图6E和F)。其中M05山体为阴坡, 对于1/4和2/4基带情景, 优势种主要由耐旱型沙生植物及禾本科植物为主(如藏沙蒿、西藏早熟禾和垂穗披碱草)(图6E)。而随着基带海拔提高, 莎草科黑褐苔草其优势地位逐渐上升(图6E), 其在3/4和4/4基带情景下盖度分别为2.3%和3.7%(图7E)。然而不同基带情景之间主要物种盖度变化并不显著(图7E)。M06山体为阳坡, 随着基带海拔上升, 最优种由杂类草二裂委陵菜(1/4基带, 盖度为9.0%)变为禾本科植物垂穗披碱草(2/4和3/4基带, 盖度分别为6.5%和4.7%)(图7F), 最后变为黑褐苔草(完整坡面, 盖度为4.4%)(图6F)。需要注意的是, 相比于完整坡面的调查结果, 较低海拔的基带调查(1/4基带情景)可能会显著高估垂穗披碱草盖度约94.3%(图7F)。对于M03和M04, 山体基线较高, 大约为4700 m, 植被类型由高山灌丛草原逐渐转变为高山草甸, 4种基带情景下最优种均为黑褐苔草(图6C和D), 其盖度随着基带海拔上升逐渐降

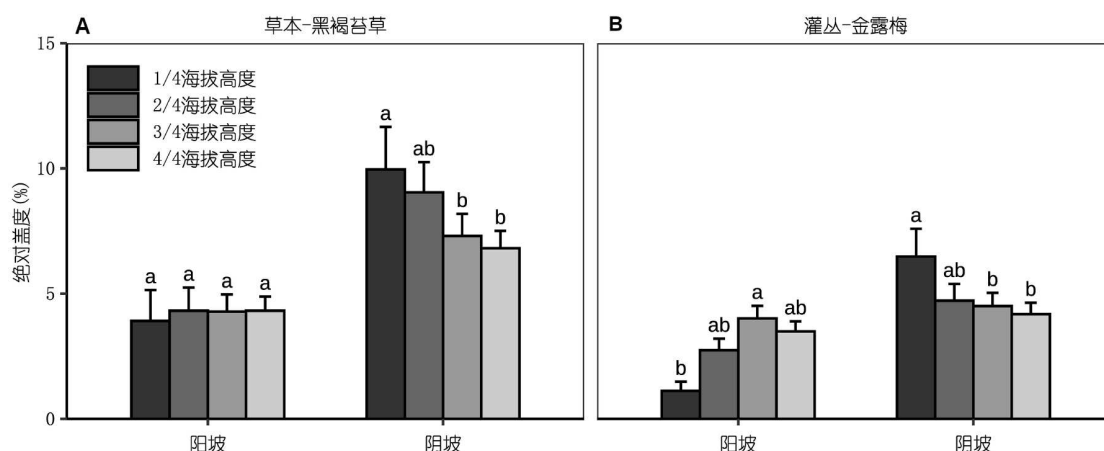


图4 绒布河流域不同坡向及调查情景基带草本及灌丛最优种盖度变化。A和B分别为4种调查情景下草本和灌丛最优种在阴坡和阳坡的盖度

Figure 4 Changes in the coverage of optimal herbaceous and shrub species in different slopes under different survey scenarios in the Rongbu River Basin. A and B show the coverage of optimal herbaceous and shrub species on the shady and sunny slopes under four different survey scenarios, respectively

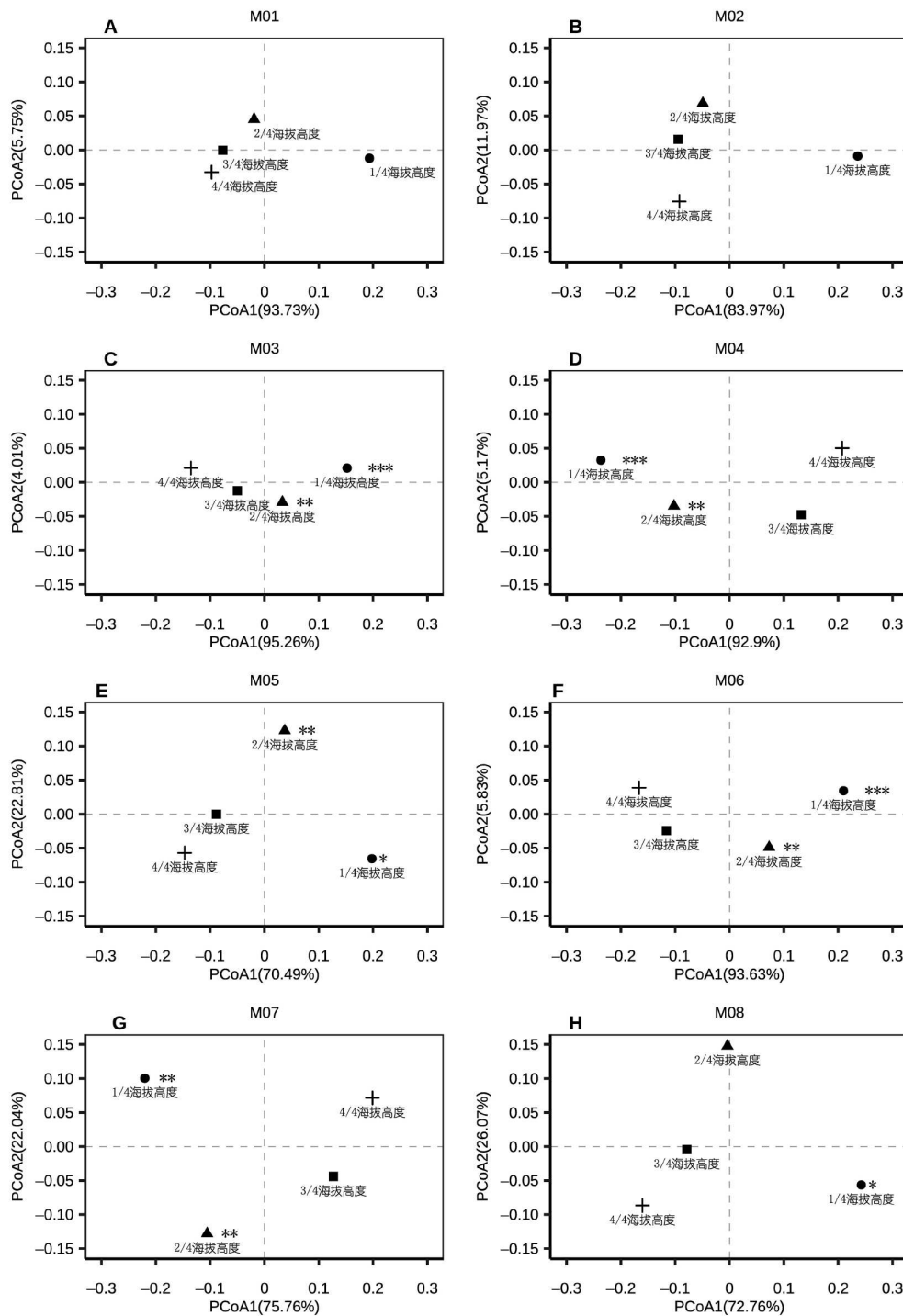


图 5 绒布河流域各山体不同基带调查情景群落相异度。A~H分别为M01~M08山体不同调查情景下群落物种组成基于bray-curtis的相异度结果。*表示与4/4基带情景相比, 群落物种组成差异的显著性(*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$); PCoA1: 群落相异度第一特征向量; PCoA2: 群落相异度第二特征向量

Figure 5 Community dissimilarity across various elevation zones in the Rongbu River Basin under different survey scenarios. A~H, dissimilarity based on bray-curtis for community species composition under different survey scenarios at sampling sites M01 to M08. * indicates the significance of community species composition differences compared to the 4/4 baseline scenario (*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$); PCoA1: first principal coordinate of community dissimilarity; PCoA2: second principal coordinate of community dissimilarity

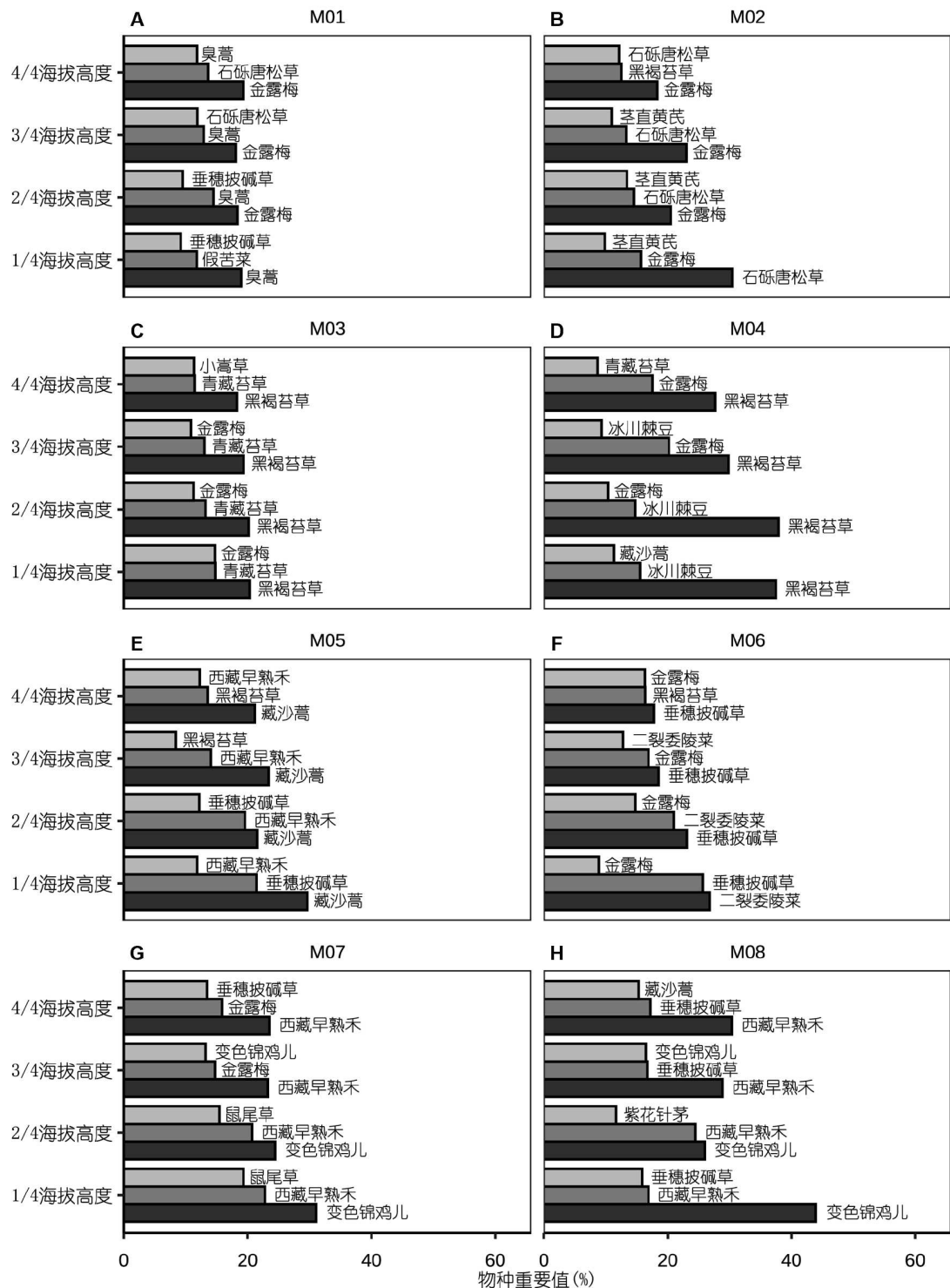


图 6 绒布河流域各山体不同基带调查情景主要物种重要值变化。A~H分别为M01~M08山体在4种基带情景下主要物种重要值变化

Figure 6 Changes in the importance values of dominant species across various elevation zones in the Rongbu River Basin under different survey scenarios. A~H illustrate the changes in the importance values of dominant species across sampling sites M01 to M08 in four different elevation zones

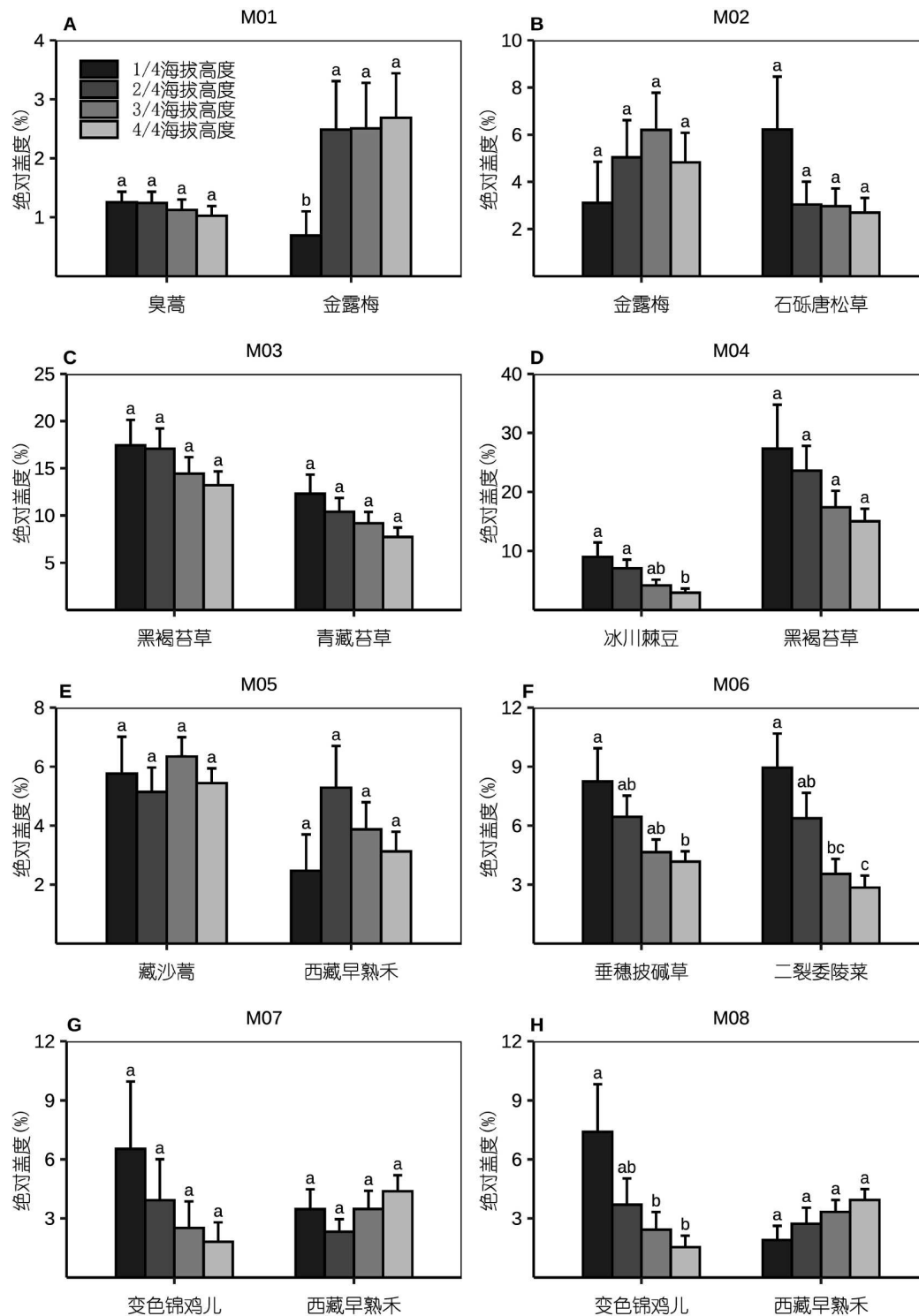


图 7 绒布河流域各山体不同基带调查情景主要物种盖度的变化. A~H分别为M01~M08山体在4种基带情景下主要物种盖度变化

Figure 7 Changes in the coverage of dominant species under different survey scenarios across various mountains in the Rongbu River Basin. A~H, the changes in the coverage of dominant species for mountains M01~M08 under four different elevation zones

低,然而变化并不显著(图7C和D).此外,相较于完整坡面调查,1/4基带情景下,M03山体的冰川棘豆(*Oxytropis glacialis*)盖度被显著高估约2倍(图7D).对于更高基线海拔的山体(M01和M02),植物主要分布在流石坡上,植被盖度相对较低,优势种组成主要包括金露梅、臭蒿(*Artemisia hedinii*)、石砾唐松草(*Thalictrum squamiferum*)和黑褐苔草(图6A和B).随着基带海拔上升,金露梅盖度显著提高并逐渐成为最优种(图6和7A).

2.3 相同或相似海拔高度的山顶与山脚处植物物种组成差异

为探究高海拔山脚基带植物组成是否与低海拔山顶处(两者海拔高度相同或相似)的物种组成存在差异,我们对两段存在海拔重叠区间的山体按其所处位置划分为山顶和山脚,其中第一段海拔区间为4250~4400 m,第二段海拔区间为4610~4760 m.置换方差分析的结果表明,两个海拔区间内,山顶和山脚的物种组成均存在显著差异(表2).

具体来看,在相对较低的海拔区间内(4250~4400 m),基于物种重要值划分山脚优势种组成排序分别为:垂穗披碱草、二裂委陵菜和藏沙蒿(图8A),盖度分别为:5.7%,4.93%和2.52%(图9A).山顶的优势种组成分别为西藏早熟禾、香柏(*Sabina pingii*)和垂穗披碱草(图8A),盖度依次为5.26%,3.63%和3.5%(图9A),而共有种垂穗披碱草在山脚和山顶的差异并不显著(表3),仅

表 2 绒布河流域相同海拔区间山顶和山脚群落相异度表
Table 2 Dissimilarity of community composition between mountain tops and foothills within the same elevation zone in the Rongbu River Basin

海拔区间(m)	处理	Bray-curtis相异度	P
4250~4400	山顶-山脚	0.600	<0.001
4610~4760	山顶-山脚	0.685	<0.001

优势地位从第1 (山脚)下降到第3 (山顶).在4610~4760 m的海拔区间上,优势种组成也存在差异.其中山脚植物按重要值排序依次为:黑褐苔草、青藏苔草和金露梅(图8B),盖度分别为:17.74%,11.55%和9.17%(图9B),而山顶的优势种组成分别为:青藏苔草、藏沙蒿和金露梅(图8B),盖度分别为:5.49%,2.27%和2.17%(图9B).其中黑褐苔草在山脚的盖度显著高于山顶(表3和图9B),而次优势种也从山脚的青藏苔草变成山顶的藏沙蒿,同时金露梅的盖度也显著高于其在山顶的盖度,大约提高76.3%(表3和图9B).

2.4 不同山体垂直带群系组成的差异

本研究的调查结果发现,不同坡向的山体垂直带谱在4种基带情景中存在差异(图10).具体而言,1/4,2/4,3/4和4/4基带情景下,阴坡和阳坡的山体均划分出4个完整的垂直带,自下而上依次为:高山灌丛带、高山草原带、高山草甸带和流石坡稀疏植被带.尽管垂直带上植被类型相同,然而不同基带情景下的群系组

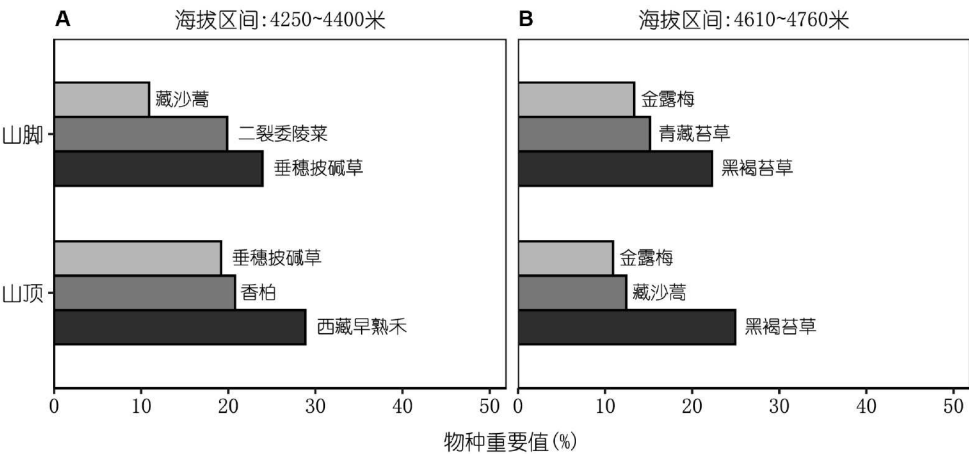


图 8 绒布河流域相同海拔区间山顶和山脚主要物种重要值. A和B分别为4250~4400 m以及4610~4760 m两个海拔区间的山顶和山脚主要物种重要值变化

Figure 8 Composition of dominant species between mountain tops and foothills within the same elevation zone in the Rongbu River Basin. A and B illustrate the changes in the importance values of dominant species at mountain tops and foothills for the elevation ranges of 4250~4400 m and 4610~4760 m, respectively

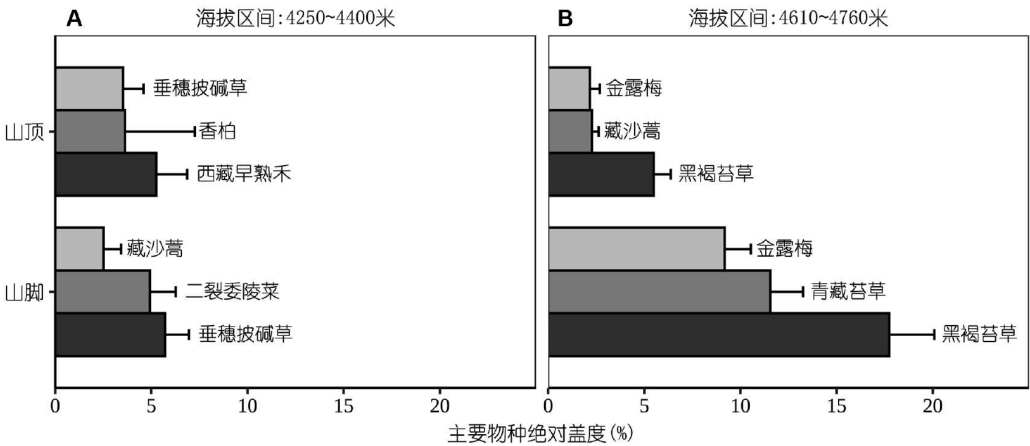


图 9 绒布河流域相同海拔区间山顶和山脚主要物种绝对盖度. A和B分别为4250~4400 m以及4610~4760 m两个海拔区间的山顶和山脚主要物种盖度变化

Figure 9 Composition of dominant species between mountain tops and foothills within the same elevation zone in the Rongbu River Basin. A and B show the changes in the coverage of dominant species at mountain tops and foothills for the elevation ranges of 4250–4400 m and 4610–4760 m, respectively

表 3 绒布河流域相同海拔区间山顶和山脚最优种差异显著性

Table 3 Significance of differences in optimal species between mountain tops and foothills within the same elevation zone in the Rongbu River Basin

海拔区间(m)	物种名称	处理	F	P
4250~4400	垂穗披碱草	山顶-山脚	0.017	0.896
4610~4760	黑褐苔草	山顶-山脚	48.886	<0.001
4610~4760	金露梅	山顶-山脚	13.409	<0.001

成却存在差异. 对于阳坡而言, 随着基带海拔的上升, 灌丛带的分布上限逐渐增加, 分别为: 3869 m (1/4基带情景), 4060 m (2/4基带情景), 4128 m (3/4基带情景) 和 4396 m (4/4基带情景), 同时, 优势种也从变色锦鸡儿灌丛逐渐转变成金露梅灌丛(图6G和H). 在灌丛带以上, 主要以高山草原植被类型为主, 4种基带情景下 (1/4, 2/4, 3/4和4/4基带情景), 其分布上限比较接近, 分别为: 4425, 4505, 4515和4512 m, 同时优势种组成相似, 以垂穗披碱草、藏沙蒿和西藏早熟禾的垂直分布为主(图6E和F). 然而由于灌丛带分布上限的差异, 高山草原带的垂直分布范围越来越小(图10). 高山草原带以上分布高山草甸植被带, 4种基带情景下, 其分布上限分别为: 5167, 5163, 5146和5179 m (图10), 同时不同基带情景下的群系组成相似, 以黑褐苔草、青藏苔草的分布为主(图6C和D). 而流石坡稀疏植被带分布范围很小, 群系组成主要以稀疏金露梅灌丛、臭蒿以及石砾唐松草等为主, 分布上限依次为5182, 5213, 5241, 5274 m. 阴坡的植被带分布与阳坡类似, 其中完

整坡面(4/4基带情景)垂直带分布范围上限分别为: 高山灌丛带(4074 m)、高山草原(4579 m)、高山草甸(5220 m)和流石坡稀疏植被(5281 m)(图10). 3/4基带情景的垂直带植被分布与完整坡面植被分布接近, 而2/4基带情景的灌丛带分布上限仅为3960 m, 比完整坡面的灌丛分布上限低114 m, 而高山草原分上限与完整坡面的分布接近, 为4575 m (图10). 因此2/4基带情景的高山草原带的分布范围更宽(图10). 此外, 高山草甸植被带的分布上限为5074 m, 因此相较于完整坡面, 约低估了160 m的高山草甸垂直带分布(图10). 对于1/4基带情景, 高山灌丛、高山草原带和高山草甸的分布上限依次为: 4127, 4413和4986 m, 因此相对于完整坡面 (4/4基带情景), 高山灌丛带分布被高估约53 m, 同时高山草原和高山草甸分布分别被低估约220和70 m, 而流石坡稀疏植被的分布大约被高估了近130 m (图10).

此外, 对比流域和个山体垂直带谱发现, 流域的垂直带谱包含4种植被类型, 分别是高山灌丛、高山草原、高山草甸和流石坡稀疏植被带. 然而对M08和

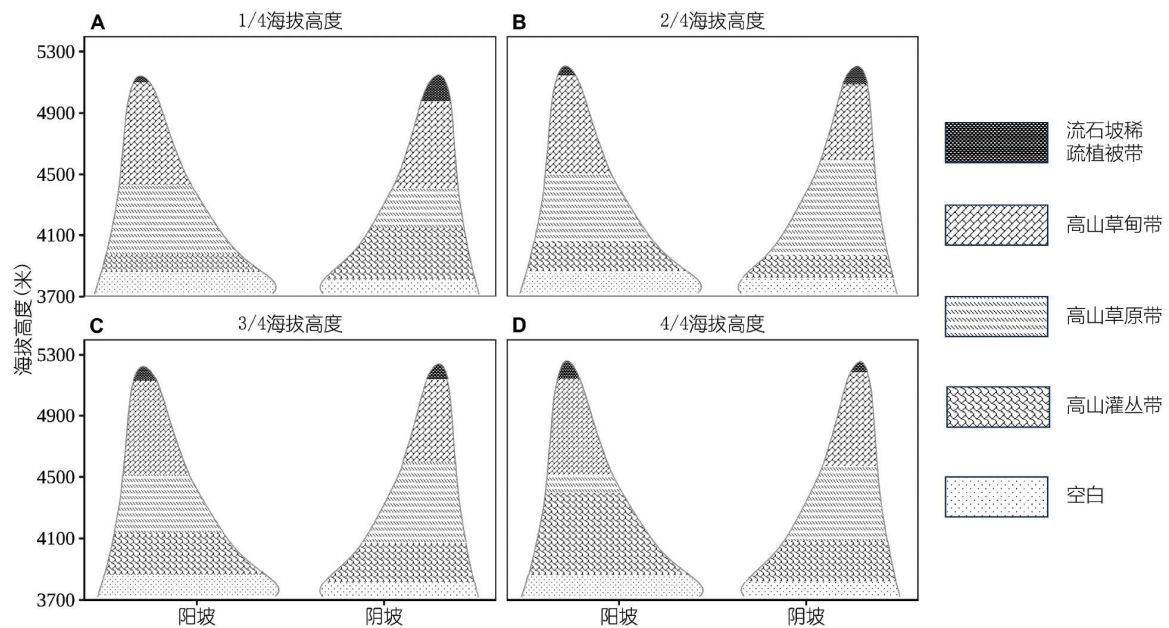


图 10 绒布河流域不同山体垂直带谱. A~D分别为1/4, 2/4, 3/4和4/4基带情景下阴坡和阳坡植被垂直带分布情况
Figure 10 Vertical zone spectrum of different mountains in the Rongbu River Basin. A~D depict the vertical distribution of vegetation on shady and sunny slopes under the base scenarios of 1/4, 2/4, 3/4, and 4/4

M07山体划分垂直带时, 由于其基线在3700 m附近, 年均温约2.2℃, 年降水量约734 mm (表1), 因此垂直带谱包括高山灌丛和温性草原植被带(表4), 其中温性草原的分布区间分别为: 3954~4123 m (M07), 4155~4313 m (M08), 主要物种分布为西藏早熟禾和垂穗披碱草. 对于M05和M06山体主要以高山草原带为主, 主要分布藏沙蒿、垂穗披碱草等禾本科植物, 其中M06山体的顶部(4381~4621 m)植被类型为高山草甸(表4). 而M03和M04山体年均温在1℃左右, 主要以高山草甸为主要植被类型, 主要物种组成为黑褐苔草、青藏苔草等莎草科植物. 而M01和M02山体的年均温均在0℃以下, 同时由于其海拔高差小, 其植被分布区间与流域对应垂直带分布接近. 因此, 相比于流域垂直带谱, 基于各山体垂直带植被类型更多, 同时灌丛类植被分布上限大约降低150 m, 而高山草原带分布上限大约提高200 m, 因此高山草原带分布区间增加约300 m (表4). 高山草甸带分布下限大约在4800 m, 分布区间相比于流域垂直分带高度缩减大约350 m, 而流石坡稀疏植被带分布与流域垂直带谱接近(表4).

2.5 物种分布上限

2005年, 珠峰地区综合考察发现香柏的分布范围

表 4 各山体与流域垂直带植被类型分布
Table 4 Vertical zone vegetation distribution across mountains and the basin in the Rongbu River

编号	垂直带谱	分布下限(m)	分布上限(m)
M01	流石坡稀疏植被带	5129	5275
M02	流石坡稀疏植被带	5159	5281
M03	高山草甸带	4803	5041
	高山草原带	4616	4803
M04	高山草甸带	4720	5029
M05	高山草原带	4329	4755
M06	高山草甸带	4381	4621
	高山草原带	4621	4652
M07	高山温性草原带	3954	4123
	高山灌丛带	3785	3954
M08	高山温性草原带	4155	4313
	高山灌丛带	3810	4155
	高山灌丛带	3785	4091
	高山草原带	4091	4547
流域	高山草甸带	4547	5185
	流石坡稀疏植被带	5185	5281

为4700~4900 m, 然而, 这次调查发现在海拔5052 m处仍然有香柏分布, 且丛幅达到3 m以上, 同时其他物种如金露梅和垫状点地梅的分布上限分别为5270和

5274 m. 另外, 还首次发现变色锦鸡儿和醉鱼草(*Buddleja lindleyana*)的分布上限分别为5000 m左右.

3 讨论

3.1 绒布河流域植被分布的独特性

珠穆朗玛峰作为全球最高的山峰, 其北坡与南坡在气候、地形以及生物多样性上都有显著的差异. 这些差异导致北坡与南坡之间显著不同的植被分布格局. 绒布河流域的植被则是珠穆朗玛峰北坡植被的重要组成部分. 其中绒布河流域的植被分布展现从低海拔到高海拔的梯度变化, 这种梯度在珠穆朗玛峰北坡的生态系统中具有代表性. 例如, 低海拔地区的锦鸡儿灌丛和金露梅灌丛不仅在绒布河流域广泛分布, 而且在珠穆朗玛峰北坡的其他地区也有类似的分布, 表明其适应北坡的独特气候条件. 中海拔地区的禾本科植物, 如垂穗披碱草、西藏早熟禾和藏沙蒿等, 则展示高山草甸植被的典型特征. 此外, 中高海拔的莎草科植物分布, 如黑褐苔草、青藏苔草和冰川棘豆等, 不仅体现绒布河流域的植被特征, 更是青藏高原生态系统的键物种. 这些莎草科植物在高寒环境中具有强大的适应能力, 是高海拔地区土壤保持、水源涵养以及防风固沙等生态服务功能的重要贡献者. 其存在不仅确保绒布河流域生态系统的稳定性, 也对整个珠穆朗玛峰北坡的生态平衡起到关键作用. 因此, 绒布河流域的植被类型不仅反映珠穆朗玛峰北坡特有的气候、土壤及海拔变化对植物的选择压力, 同时也揭示青藏高原高寒植被在全球气候变化中的潜在响应机制. 这为研究者进一步探讨青藏高原生态系统的稳定性、保护策略以及可持续发展提供宝贵的科学依据.

3.2 基于不同基带调查情景下物种分布的差异

以往关于西藏植被调查的研究主要以空间上的样带植被调查或者在垂直带上沿着公路或铁路沿线进行调查, 并以植物的水平地带分布或公路沿线确定基带和垂直带植物物种分布^[15], 这样的结果往往很难准确反映高原植物在垂直带上的真实分布情况. 一方面是因为以往的调查结果多是基于大尺度遥感模型的结果反映植被类型的变化, 无法在相对较小的空间尺度上准确描述物种组成的变化^[32], 另一方面, 坡向差异以及海拔高度的上升, 环境条件发生变化, 植物种类和

组成可能也会发生改变^[33], 因此, 仅在较低海拔的物种调查可能会对山体垂直带的评估造成很大的不确定性. 例如, 本调查结果显示, 阴坡和阳坡的不同基带情景下, 物种组成均存在显著差异, 同时不同坡向灌丛类和草本类优势种盖度在不同基带情景下也存在显著差异(图4), 这可能与不同坡向土壤水分有效性以及温度变化有密切联系^[28]. 对于特定山体, 高度相对较低的M07和M08, 随着基带海拔上升, 群落优势种从灌丛类的变色锦鸡儿逐渐转变禾本科植物西藏早熟禾(图5). 这可能与海拔高度上升, 温度降低同时降水量发生变化有关^[26,28]. 而在4600~5000 m海拔区间(M03和M04), 不同基带情景下最优种未发生变化(均为黑褐苔草), 然而其在群落中的盖度会降低, 同时与次优势种的组合也都会发生变化(图4), 表明调查的基带海拔越低, 越可能高估优势种在群落中的优势地位. 而随着基带海拔的上升, 植被类型的变化可能改变优势种组成, 因为原优势群落中的物种可能会随着海拔高度的上升, 环境因素的改变逐渐不适于自身的生长发育, 使其在群落中竞争优势逐渐降低并被适应性更强的其他物种替代, 最终导致物种组成发生显著改变^[27].

3.3 相同海拔区间物种组成的差异

当前的研究普遍认为, 植物的垂直分布主要受气候影响, 其中不同海拔区间温度和降水的变化可能是物种分布变化的主要驱动因子^[4,33], 然而相同海拔区间内, 不同山体的重叠空间在位置上也会有所不同, 例如在4250~4400 m的海拔区间内, M08山体的山顶与M05山体的山脚物种组成存在显著差异(图8A), 同时优势种物种组成也发生变化(表2). 而在更高的海拔区间内(4610~4760 m), M05山体的山顶和M03的山脚的群落相异度也存在显著差异(表2). 尽管山顶和山脚的最优种种类相同(均为黑褐苔草), 然而其在群落中的盖度相差近3倍, 同时优势种组成也有所不同(图8B). 这种山体植被的物种分布格局变化与温度和降水的变化紧密相关^[26,28], 较高海拔的降水量更高, 同时山脚土壤水分有效性由于径流等因素也会高于山顶^[28]. 所以即使在相同的海拔区间内, 水热条件不同, 土壤环境以及群落结构的差异可能主导群落物种组成及优势种竞争地位^[21]. 因此, 对于珠峰绒布河流域而言, 海拔可能并不是决定植物群落物种组成的唯一因素.

3.4 山体垂直带植被类型及物种分布

以往对珠峰植物垂直带谱的划分主要分为南坡和北坡, 其中南坡海拔高度更高, 同时受印度季风的影响, 其温暖湿润的气候形成以龙脑香科的婆罗双树为主的森林及以印栲和木荷为主的山地常绿阔叶林带, 随着海拔高度上升依次分布有长叶松、乔松、冷杉为主的山地针叶林, 以铁杉和高山栎为主的针叶阔叶混交林, 高海拔地区更多以桧柏灌丛为主要植被类型^[3], 其完整的垂直带分布使其植被类型要远多于北坡。然而本文的植被调查主要集中在珠峰绒布河流域, 地处北坡受高原季风影响, 调查区海拔在3700 m以上, 低温以及喜马拉雅山南麓对水汽的阻隔导致北坡相对干旱^[3], 主要形成以高山灌丛、高山草原、高山草甸, 以及流石坡稀疏灌丛的垂直带谱。然而不同坡向的4种基带情景下, 垂直带上植被类型分布存在差异, 例如随着基带区间的扩张, 阳坡灌丛带分布上限逐渐增加, 同时流石坡稀疏植被带分布区间也在增加(图10)。这种差异可能与调查区间涵盖的物种分布变化有关^[21], 因为物种的最适分布范围可能不会局限于低海拔物种调查的结果, 基带物种调查的海拔区间越大, 植被类型越接近真实的分布情况。同时, 由于低海拔植被调查往往会忽略掉坡面和山顶的物种组成。因此, 更多的物种信息加入会逐渐完善物种分布信息, 植被类型的分布边界也会逐渐清晰。而对于3/4海拔高度的基带调查, 垂直带谱的种类和边界趋近于完整坡面的真实分布, 仅在各分带的上限和区间范围存在微小差异。这与调查高度增加, 物种组成、盖度信息逐渐完善以及各物种

在垂直区间上的分布信息更加完整有关^[34,35]。因此, 仅在山脚的物种调查可能无法准确反映山体垂直带谱, 提高基带调查海拔更能准确评估珠峰绒布河流域山体垂直带的植被分布。同时, 相比于以往的调查结果, 本文的植被调查结果发现香柏的分布上限提高约160 m, 同时有研究认为金露梅属灌丛以及垫状植被等主要分布于西藏南部海拔5000 m以下, 而本文却在5000 m海拔以上发现垫状点地梅和垫状金露梅, 这对于西藏植被的分布上限提供更准确的数据支持和理论修正。

4 结论

本次珠峰绒布河流域各山体植物垂直分布调查结果显示, 调查基带的海拔高度决定群落内物种组成的变化。不同基带海拔的物种调查结果显示, 优势种组成及其垂直分布存在差异, 同时垂直带谱的划分也会有所不同。其中阳坡1/4, 2/4和3/4基带情景下, 高山灌丛带分布区间的垂直高度分别低估了527, 336和268 m, 而高山草原带的分布区间分别被高估440, 329和271 m。结果表明, 以往沿公路或铁路沿线的植被调查会大大增加山体垂直带物种组成及分布的不确定性, 同时基于各山体划分的垂直带谱能够在更精细的空间尺度上区分流域植被类型及分布情况。此外, 相同海拔区间的山顶与山脚的物种组成与优势种类也有所不同, 表明海拔高度可能并不是决定物种的垂直带分布的唯一因素, 需要同时考虑区域内地形地貌、土壤环境以及群落内的种间关系。

参考文献

- 1 Yao T D, Chen F H, Cui P, et al. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2017, 32: 24–31 [姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, 2017, 32: 24–31]
- 2 Zhang H, Zhu W Q, Shi P J. The differences of vegetation characteristics and environmental conditions among main vegetation types on the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2024, 44: 2955–2970 [张慧, 朱文泉, 史培军, 等. 青藏高原各主要植被类型特征及环境差异. 生态学报, 2024, 44: 2955–2970]
- 3 Zhang J W, Jiang S. A preliminary study on the vertical zoning of vegetation and its relationship with horizontal zone in Mount Qomolangma area (in Chinese). *Acta Bot Sin*, 1973, 2: 77–94 [张经纬, 姜恕. 珠穆朗玛峰地区的植被垂直分带及其与水平地带关系的初步研究. 植物学报, 1973, 2: 77–94]
- 4 Zheng D, Chen W L. A preliminary study on the vertical zone of vegetation in the eastern Himalayas (in Chinese). *Acta Bot Sin*, 1981, 3: 62–68 [郑度, 陈伟烈. 东喜马拉雅植被垂直带的初步研究. 植物学报, 1981, 3: 62–68]
- 5 Wang J T, Li B S. Main types and characteristics of high-cold steppe in the Qingtang Plateau of Xizang (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 1982, 6:

- 1–13 [王金亭, 李渤生. 西藏羌塘高原高寒草原的基本类型与特征. 植物生态学报, 1982, 6: 1–13]
- 6 Wang J T. A preliminary study on alpine vegetation of the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 1988, 12: 81–90 [王金亭. 青藏高原高山植被的初步研究. 植物生态学报, 1988, 12: 81–90]
- 7 Hou X Y. Vegetation Atlas of China (1:1000000) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 129–132 [侯学煜. 1:1000000中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001. 129–132]
- 8 Zhang X S. Plateau zonality of vegetation in Xizang (in Chinese). *Acta Bot Sin*, 1978, 2: 46–55 [张新时. 西藏植被的高原地带性. 植物学报, 1978, 2: 46–55]
- 9 Zhang X S. Indirect gradient analysis, quantitative classification and environmental interpretation of plant communities in Ngari, Xizang (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 1991, 2: 101–113 [张新时. 西藏阿里植物群落的间接梯度分析、数量分类与环境解释. 植物生态学报, 1991, 2: 101–113]
- 10 Luo T, Li W, Zhu H. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau. *Ecol Appl*, 2002, 12: 980–997
- 11 Sun H Y, Shi H X, Ma L. Floristic study on Sanjiangyuan National Nature Reserve (in Chinese). *Chin J Grassl*, 2013, 35: 85–91 [孙海群, 石红霄, 马雷. 三江源自然保护区种子植物区系分析. 中国草地学报, 2013, 35: 85–91]
- 12 Yang Y, Guo K, Zhao L Q, et al. Community characteristics of *Stipa roborowskyi* steppe in Xizang (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38: 635–639 [杨瑶, 郭柯, 赵利清, 等. 西藏昆仑针茅草原的基本特征. 植物生态学报, 2014, 38: 635–639]
- 13 Zhong Y M, Wang J M, Zhang T H, et al. Composition of seed plant species and floristic features in the Gobi area of the northern Qinghai-Xizang Plateau of China (in Chinese). *Dokl Bot Sci*, 2017, 35: 525–533 [钟悦鸣, 王健铭, 张天汉, 等. 中国青藏高原北部戈壁区种子植物物种组成及其区系特征. 植物科学学报, 2017, 35: 525–533]
- 14 Zhu Q, Ning P, Hou L, et al. Characteristics of *Juniperus* community types in the Three-River-Source Region (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2022, 46: 114–122 [朱琴, 宁盼, 侯琳, 等. 三江源地区刺柏属植物群落类型特征. 植物生态学报, 2022, 46: 114–122]
- 15 Ding M J, Shen Z X, Zhang J L, et al. Vegetation change along the Qinghai-Xizang Highway and Railway from 1981 to 2001 (in Chinese). *Res Sci*, 2005, 27: 128–133 [丁明军, 沈振西, 张镜铨, 等. 青藏公路与铁路沿途 1981年~2001年植被覆盖变化. 资源科学, 2005, 27: 128–133]
- 16 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 (in Chinese). *Sci Bull*, 2019, 64: 2865–2875 [张镜铨, 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: 2865–2875]
- 17 Huai H Y, Wei W H, Zhang Y L. The characteristics of *Achnatherum splendens* community along the Qinghai-Xizang railway (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2007, 27: 497–503 [淮虎银, 魏万红, 张镜铨. 青藏铁路沿线温性草原区芨芨草(*Achnatherum splendens*)群落特征. 生态学报, 2007, 27: 497–503]
- 18 Ma T, Zhou J X. Species diversity of plant communities along Qinghai-Xizang railway (in Chinese). *Bull Soil Water Conserv*, 2012, 32: 261–266 [马涛, 周金星. 青藏铁路沿线植物群落物种多样性研究. 水土保持通报, 2012, 32: 261–266]
- 19 Wang J, Wang G P, Si G C, et al. Vegetation species diversity characteristics in relation to environmental factors along Qinghai Tibetan highway (in Chinese). *Pratac Sci*, 2013, 9: 1320–1329 [王建, 王光鹏, 斯贵才, 等. 青藏公路沿线植被多样性特征及其与环境因子的关系. 2013, 9: 1320–1329]
- 20 Zhu D Q, Wang J H, Zhang S G, et al. Changes in species diversity and community structure of *Abies georgei* var. *smithii* forest along altitudinal gradients on the Western Slope of Sejila Mountain in Xizang (in Chinese). *J Northwest Univ*, 2008, 23: 1–6 [朱登强, 王军辉, 张守攻, 等. 西藏色季拉山西坡急尖长苞冷杉林物种多样性及群落结构的垂直分布格局. 西北林学院学报, 2008, 23: 1–6]
- 21 Liang H Z, Liu L L, Fu T G, et al. Vertical distribution of vegetation in mountain regions: a review based on bibliometrics (in Chinese). *Chin J Eco Agric*, 2022, 30: 1077–1090 [梁红柱, 刘丽丽, 付同刚, 等. 山地植被垂直分布变化格局研究进展与述评. 中国生态农业学报, 2022, 30: 1077–1090]
- 22 Fan Z M. Scenario simulation of vertical distribution changes of vegetation ecosystem in the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2021, 41: 8178–8191 [范泽孟. 青藏高原植被生态系统垂直分布变化的情景模拟. 生态学报, 2021, 41: 8178–8191]
- 23 Li Z G. Glacier and lake changes across the Tibetan Plateau during the past 50 years of climate change. *J Resour Ecol*, 2014, 5: 123–131
- 24 Guo Z, Wang N, Shen B, et al. Recent spatiotemporal trends in glacier snowline altitude at the end of the melt season in the Qilian Mountains, China. *Remote Sens*, 2021, 13: 4935
- 25 Wang G, Bai W, Li N, et al. Climate changes and its impact on tundra ecosystem in Qinghai-Xizang Plateau, China. *Climatic Change*, 2011, 106: 463–482
- 26 Pickett S T A, Carson W P, Begon M, et al. Ecology: individuals, populations and communities. *Brittonia*, 1987, 39: 407

- 27 Whittaker R J, Willis K J, Field R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity. *J Biogeogr*, 2001, 28: 453–470
- 28 Magurran A E. *Ecological Diversity and Its Measurement*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. 192
- 29 Wu Z Y. *Flora of Xizang*. Vol.2 (in Chinese). Beijing: Science Press. 1985. 956 [吴征镒. 西藏植物志. 第二卷. 北京: 科学出版社, 1985. 956]
- 30 Hou X Y. *Vegetation of China* (in Chinese). Beijing: People's Education Press, 1960. 210 [侯学煜. 中国的植被. 北京: 人民教育出版社, 1960. 210]
- 31 Comprehensive Investigation Team of Qinghai-Xizang Plateau, Chinese Academy of Sciences. *Vegetation of Xizang* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1988. 589 [中国科学院青藏高原综合考察队. 西藏植被. 北京: 科学出版社, 1988. 589]
- 32 Nie Y, Liu L S, Zhang Y L, et al. NDVI Change Analysis in the Mount Qomolangma (Everest) National Nature Preserve during 1982-2009 (in Chinese). *Prog Geo*, 2012, 31: 895–903 [聂勇, 刘林山, 张镡锂, 等. 1982-2009 年珠穆朗玛峰自然保护区植被指数变化. 地理科学进展, 2012, 31: 895–903]
- 33 Zhang W, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Analysis of vegetation change in Mt. Qomolangma Natural Reserver (in Chinese). *Prog Geo*, 2006, 25: 12–22 [张玮, 张镡锂, 王兆锋, 等. 珠穆朗玛峰自然保护区植被变化分析. 地理科学进展, 2006, 25: 12–22]
- 34 Wang C T, Cao G M, Wang Q L, et al. Changes in species composition and biomass of alpine meadow plant communities along environmental gradients on the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Sci China Ser C-Life Sci*, 2007, 5: 585–592 [王长庭, 曹广民, 王启兰, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落物种组成和生物量沿环境梯度的变化. 中国科学: 生命科学, 2007, 5: 585–592]
- 35 Liu Z, Li Q, Chen D D, et al. Patterns of plant species diversity along an altitudinal gradient and its effect on above-ground biomass in alpine meadows in Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Biodivers Sci*, 2015, 23: 451–462 [刘哲, 李奇, 陈懂懂, 等. 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响. 生物多样性, 2015, 23: 451–462]

The vertical distribution pattern of alpine vegetation in the Rongbu River Basin of Mount Qomolangma

ZHOU Yang¹, LI BoWen¹, LV JingYa^{1,4}, A Wang^{1,4}, CHEN LanYing², LIU ShiZhang², WU Jing², LV WangWang¹, SUN JianPing¹, JIA YueFeng³, ZHAO Kuang⁵, JIA XiaoHua⁵ & WANG ShiPing^{1*}

¹ State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources (TPESER), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

² School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa 850000, China

³ Xizang Low-carbon Grassland and Animal Husbandry Technology Co., Ltd., Lhasa 850030, China

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁵ Xizang Autonomous Region Department of Ecology and Environment, Lhasa 850000, China

* Corresponding author; E-mail: wangsp@itpcas.ac.cn

Vegetation on the Qinghai-Xizang Plateau exhibits a distinctive “three-dimensional” distribution along latitudinal, longitudinal, and vertical gradients. However, due to ecological limitations and accessibility challenges, previous vegetation surveys were primarily conducted along roads, railways, or foothill areas. These surveys often inferred montane vertical zonation based on relationships between vegetation and climatic factors in baseline regions, introducing significant uncertainty. In this study, we selected four baseline elevations and surveyed eight mountains (including both shady and sunny slopes) in the Rongbu River Basin of Mount Qomolangma to assess plant composition across the entire vertical band. We examined the effects of different baseline elevation survey scenarios on plant composition and vegetation types. Our findings revealed significant differences in community species composition under 4 baseline conditions, with shifts in species dominance. Specifically, plant composition and vegetation types at high-altitude foothills differed markedly from those at similar altitudes near mountain summits. Moreover, incomplete slope surveys severely distorted the vertical distribution of montane vegetation. In particular, surveys conducted at 1/4, 2/4, and 3/4 of the baseline underestimated the vertical distribution height of the alpine shrub zone by 527, 336, and 268 m, respectively, while overestimated the alpine meadow zone by 440, 329, and 271 m, respectively. These results indicate that vegetation types derived from foothill elevations do not accurately reflect the vertical species composition and vegetation distribution of the mountains.

Rongbu River basin, species composition, species distribution, vertical spectrum, Mount Qomolangma

doi: [10.1360/SSV-2024-0232](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0232)