

喜马拉雅山脉中段土地覆被的垂直分异特征

张懿铨^{1,2,3}, 吴雪^{1,3}, 郑度¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 喜马拉雅山脉中段的珠穆朗玛峰等地, 海拔高差巨大、生境复杂多变、土地覆被类型多样且植被垂直带谱完整, 是全球范围内研究土地覆被垂直变化的理想场所。本文基于30 m空间分辨率的土地覆被数据(2010年)和DEM数据, 在ArcGIS和Matlab平台的支持下, 提出并运用脊线法、样带法和扇区法3种山地南北坡划分方法, 研究了喜马拉雅山土地覆被垂直分布与结构差异。结果表明: ① 山地土地覆被分布具有明确的垂直地带性结构特征, 喜马拉雅中部土地覆被垂直带谱为南六北四式, 土地覆被垂直带谱中具有人类活动的特点。② 南北坡之间的土地覆被垂直带谱差异明显, 南坡土地覆被类型完整多样, 北坡相对简单; 对同类型土地覆被而言, 南坡较北坡分布高程低、幅度宽。③ 依据各类型分布面积比随海拔变化情况, 土地覆被类型在南北坡上的垂直分布可分为4种模式: 冰川雪被、稀疏植被和草地为单峰分布型, 裸地为南单峰北双峰分布型。④ 3种划分方法中, 南坡的土地覆被垂直带结构具有相似性, 而北坡的土地覆被垂直带结构存在差异, 扇区法较好地反映了土地覆被自然分布格局。

关键词: 土地覆被; 垂直带; 喜马拉雅山脉; 珠穆朗玛峰; 马卡鲁峰; 卓奥友峰

DOI: 10.11821/dlxb202005004

1 引言

人类通过改变土地覆被影响着陆地表层环境^[1], 土地覆被变化及其生态环境效应被众多国际组织及科学研究计划作为核心问题之一^[2-3], 是全球变化研究的前沿和重点领域^[4]。特定条件下, 自然带在垂直方向上变化的梯度是水平方向上的1000倍^[5], 对山地自然带的研究是揭示山地环境复杂性和异质性规律的有效手段, 也是传统自然地理学研究的重要内容。垂直带谱的变化不仅对气候变化具有指示作用, 还是气候变化信号的“放大器”^[6], 因此, 山地垂直带研究的意义更为广泛。目前, 全球范围内已开展了一系列的山地垂直空间格局对比研究, 尤其是对雪线和森林上下限的全球尺度比较分析^[5, 7-8]。相关研究表明, 在高山生态系统中, 气候变化影响植物群落的植物生理过程、物种组成和多样性, 进而可能改变群落的结构和功能特征; 这在不同植被类型间的过渡带或交错带表现得尤为敏感。如在阿尔卑斯山脉和北美山区^[9]及五台山^[10]等山地, 表现为植被垂直带界线上移、高山林线上升^[11]、极地林线植物生长改变^[12-13]等。此外, 一些研究还通过山地垂直

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761144081); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040201); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0603) [Foundation: National Nature Sciences Foundation of China, No.41761144081; Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20040201; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK0603]

作者简介: 张懿铨(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事生物地理与自然地理综合研究。

E-mail: zhangyl@igsnr.ac.cn; wuxuexl@163.com

带分布及其排列空间的统计分析和模拟及野外试验分析,进一步探讨气候空间变化与垂直带关系,如山地垂直带与气候因子的空间关系^[14]、增温效应对垂直带谱的影响^[15]、林线和树线对气候变化响应机理^[16-17]等。

位于喜马拉雅中段的珠穆朗玛峰(以下简称珠峰),海拔高、生境复杂、生态系统类型独特^[18],具有世界上最完整的自然垂直带谱,是研究高海拔植被垂直变化的理想场所。20世纪70年代,张经炜和姜恕根据中国珠穆朗玛峰登山队科学考察队(1959—1960年)、中国科学院西藏综合考察队(1960—1961年)和中国科学院西藏科学考察队(1966—1968年)的调查资料,系统地分析了珠峰地区植被垂直分带及其与水平地带的关系;80年代郑度等进一步阐明了东喜马拉雅地区植被垂直带特征。这些研究对认识珠峰地区植被垂直带构成及其三维地带性特征与自然环境的垂直分异规律有着深远的影响。

受研究条件的限制,以往山地垂直带研究大多基于有限的野外考察或其他资料判读,时效性强,但时空连续性低;主要关注单一或少数类型(如林线、雪线等)的垂直带界线,对整个山体垂直带谱的分析较少;常以单一点或单一线(空间位置)代表垂直带中类型分布的界线,弱化了垂直带界线的过渡特征。这些简单的线型结构带谱虽然刻画了山地植被垂直结构和特点,但是却无法表现山地垂直带形成过程与机制,增加了带谱结构演变定量分析的不确定性。本文尝试从南北坡划分的视角,利用高分辨率土地覆被数据和GIS空间分析技术,探讨喜马拉雅山脉中段南北坡土地覆被的垂直结构及分布规律,这对于揭示极高山土地覆被空间分异规律具有重要意义,也是研究山地垂直带方法的一种新探索。

2 数据与方法

以中国和尼泊尔境内的柯西河流域上中游为研究区,该区位于喜马拉雅山脉中段,85°22'E~88°21'E、26°47'N~29°12'N,北至雅鲁藏布江的南部,南到尼泊尔与印度交界处(图1a),西至加德满都附近,东到中国尼泊尔与印度接壤的地区,区域总面积53988.4 km²^[19]。平均海拔3783 m,海拔4500 m以上区域占研究区总面积的49%以上^[20],区内拥有珠峰(Mt. Qomolangma, MQ; 海拔8844 m,简写8844 m;下同)、马卡鲁峰(MM; 8463 m)、卓奥友峰(MC; 8201 m)、干城章嘉峰(MK; 8586 m)、洛子峰(ML; 8516 m)和希夏邦马峰(MX; 8012 m)等6座世界高峰^[19-20],山群之间沟谷分布,中国境内自西向东依次分布有波曲谷地、绒辖曲谷地和朋曲下游谷地。

2.1 数据

研究数据包括2010年土地覆被数据和地形数据,其中土地覆被数据由中国科学院地理科学与资源研究所青藏高原土地变化及区域适应研究组提供,数据空间分辨率为30 m,一级类型解译精度在71%~100%,平均为83.36%^[20];DEM数据(ASTER GDEM)从USGS网获得(<https://earthexplorer.usgs.gov>),分辨率为30 m。

2.2 方法

2.2.1 南北坡的划分与研究样区选择 为精确刻画土地覆被类型在南北坡分布形态与结构特点、研究其在山地垂直分布特性、垂直带形成过程与机制及土地覆被垂直带谱模式,进一步分析不同南北坡划分方法中土地覆被的垂直带谱结构异同,本文设计了脊线法、样带法和扇区法3种方法分析南北坡土地覆被垂直分布规律:

(1) 脊线法。以喜马拉雅山脉的主山脊线划分喜马拉雅山南坡和北坡(图1b),这是常规的南坡与北坡划分方法(以南坡或北坡的山底到山顶的单线来表达)。这种划分

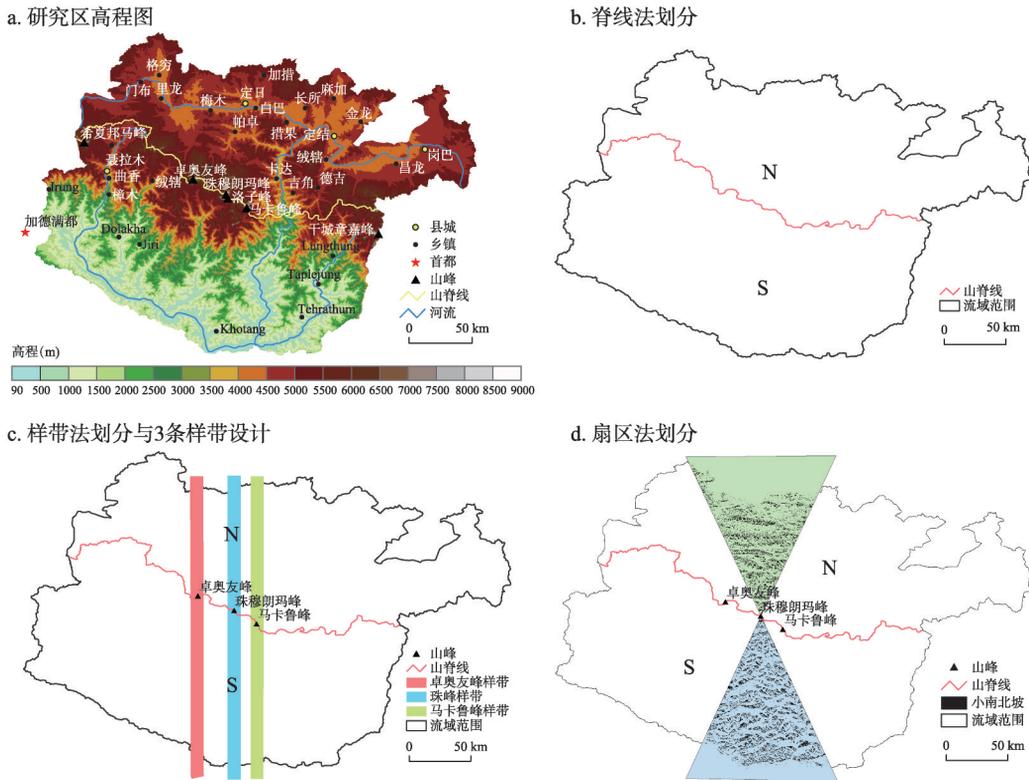


图1 研究区地形与南北坡的3种划分图示

Fig. 1 Map showing the terrains of the study area, and schema of three division methods for north and south slopes

中，脊线南坡包括南坡部分的低于喜马拉雅山脊的全部山地及山地的各个坡向，北坡亦如此。

(2) 样带法。以各山峰的峰顶为顶点，以0°方向为北坡坡向、180°方向为南坡坡向，按所接受阳光程度进行坡向划分。这种划分中，南坡包括山峰正南的样带内全部山地及山地的各个坡向的类型，北坡亦如此；为研究高海拔山地的土地覆被垂直分布规律，文中设计了跨越珠峰（MQ）、卓奥友峰（MC）和马卡鲁峰（MM）的3条南北坡（10 km宽）矩形样带，分别称为MQ样带、MC样带和MM样带（图1c）。

(3) 扇区法。以山峰的峰顶为顶点，东南（157.5°）—南（180°）—西南（202.5°）方向的扇形区域为南坡坡向；西北（337.5°）—北（0°）—东北（22.5°）方向的扇形区域为北坡坡向（图1d）。在这种划分方法中，南、北坡分别包括南、北坡全部山体的南坡或北坡坡向，南坡山体的南坡坡向为扇区南坡，北坡山体的北坡坡向为扇区北坡。文中选择珠峰为研究样区。

2.2.2 利用 ArcGIS 和 Matlab 软件提取土地覆被数据 样区土地覆被数据提取具体流程为：① 坡向划分：脊线法，以喜马拉雅主山脉为界划分南北坡；样带法，样带的坡向分别以峰顶为定点，以0°和180°方向为中心，作半径为10 km的缓冲区，形成向南和向北的南坡条带与北坡条带；扇区法中提取157.5°~202.5°（南）和337.5°~22.5°（北）方向的扇形区域，再使用ArcGIS中的Aspect工具提取扇形区域内全部山体南坡方向（157.5°~202.5°）和北坡方向（337.5°~22.5°）区域。② 利用划分的南北坡为Mask，分别提取各坡向土地覆被类型数据。

2.2.3 土地覆被的垂直分布统计分析 利用Matlab获取垂直梯度的土地覆被数据。首先将提取的南北两坡的土地覆被和高程数据分别转换成ASCII码，分别命名为land_south、land_north和dem_south、dem_north。再利用Matlab编程叠加土地覆被和高程数据，统计海拔100 m梯度上土地覆被类型的占比。

2.2.4 相关术语的界定 为了便于理解和分析土地覆被类型的垂直带的空间结构与组成特点，本文界定了以下几个阐释某类型垂直分布状态的术语：

分布上限/下限，指某覆被类型连续分布的最上部/最下部边缘的高程带（图2）。在实际运算和实现中，对于某类型而言，在某垂直分布带（百米带）中出现该类型的完整像元信息，则确定为该类型出现，如此（百米）带为该类型分布的最高海拔则该高程带为该类型的上限，相反则为下限。

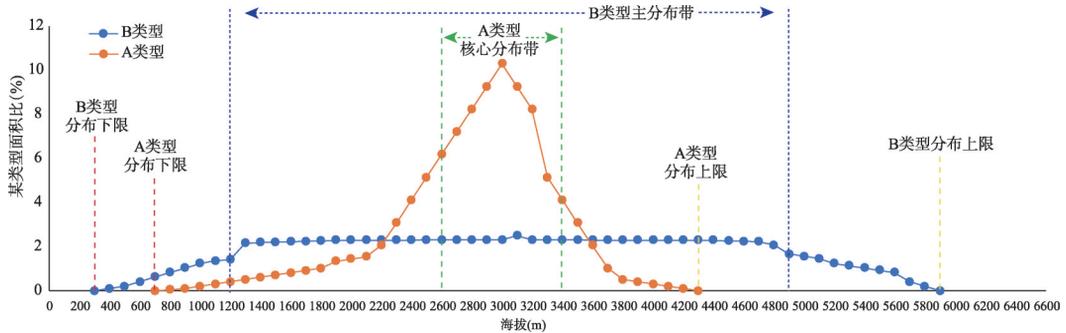


图2 某土地覆被类型的垂直分布状态中有关术语图示
Fig. 2 Schema of terms for altitudinal distribution of land cover types

核心分布带（核心分布范围）指某覆被类型在其垂直分布的高程范围内，高程带（如以100 m高程分割）数量占该类型分布范围内的总高程带数量的1/3以下，其分布面积占该类总分布面积的2/3以上的高程带分布区间（图2）。该类型整个占其分布带总量的1/3以下的垂直分布范围即确定为该类型的核心分布范围，其高程分布带区间称为该类型的“核心分布带”。运用中确定方式为，以该类型面积比最大的高程带为中心，等面积比向两侧（上、下）扩展，当该类型面积比例累积达2/3以上时，其垂直分布范围确定为该类型的核心分布范围，其高程分布带区间称为该类型的“核心分布带”。

主分布带，当某覆被类型在其垂直分布的范围内无明显的核心分布带时，指其垂直分布面积占该类型面积2/3以上的垂直分布高程带区间（图2）。运用中，从其垂直分布带面积比最大的带，向两侧（上与下）等面积比扩展，当其分布面积比例占该类型总分布区面积的2/3以上时，该类型的垂直分布范围定义为该类型的主分布范围，该高程带区间称为（该类型的）主分布带。

优势带，指某覆被类型在某高程带中各种覆被类型分布面积占比占绝对优势（占某高程带面积的2/3以上）的高程区间。通常，也是该类型在各个高程带中分布的面积比重最高的分布区间。在垂直分布上，各类型的优势带交替分布且不重叠。

复合优势带，指在某高程范围内，没有某一个覆被类型占绝对优势，而是两种或三种类型的面积比例几乎均等分布的高程分布区间。这种情况下，二者或三者组合被称为复合优势类型（图3），名称确定的顺序以该高程带中面积比大的为先；如在某海拔高程范围内，灌丛面积比例为52%、草地为42%，则该复合类型称为“灌丛—草地类型”，复合优势带确定为“灌丛—草地优势带”；又如某海拔高程带中，灌丛面积比为30%、森林

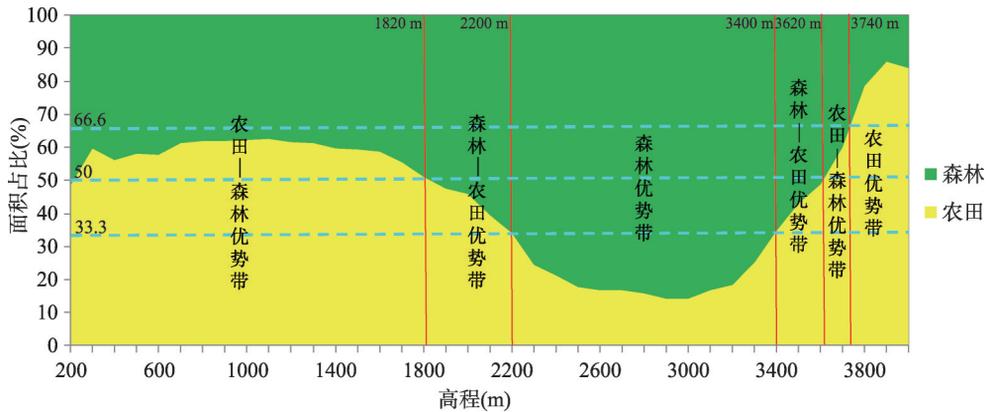


图3 土地覆被类型垂直分布的优势带与复合优势带示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing vertical distribution of composite dominant land cover types

为31%、农田为29%、建设用地为10%，该类型则称为“森林—灌丛—农田类型”，该复合优势带称为“森林—灌丛—农田优势带”。

根据各土地覆被类型分布面积比随海拔变化的模态，依据某类型在南北两个坡向上的面积比分布峰值区的形状、数量和位置，将土地覆被类型在南、北两个坡向上的分布模式划分为：

无峰型，指某类型在某坡向上分布的面积比曲线中出现一个峰值区，而在另一个坡向上无明显峰值区的分布型，如“南单峰北无峰分布型”等。

单峰分布型，指某类型在南和北坡向上分布的面积比曲线中均出现一个峰值区的分布型。按峰值海拔高程可分为“单峰南低北高分布型”和“单峰南北一致分布型”等。

单双峰复合分布型，指某类型在某坡向上分布的面积比曲线图出现一个峰值区，而在另一个坡向上出现两个峰值区的分布型。可分为“南单北双峰分布型”和“南双北单峰分布型”等。

双峰型，指某类型在两个坡向上分布的面积比曲线图均出现两个峰值区的分布型。如“南北双峰分布型”。

3 结果与分析

3.1 土地覆被类型与组成特点

研究区土地覆被类型包括建设用地、农田、湿地、水体、森林、灌丛、草地、稀疏植被、裸地、冰川与永久积雪（简称冰川雪被）等10个一级类型及21个二级类型^[22]。南坡高程范围处于海拔96~8844 m之间（表1），土地覆被类型包括10个一级类型和21个二级类型，以森林、灌丛、水体、农田和建设用地区为主（表2）；北坡高程范围在海拔2100~8844 m之间，有7~10个一级类型（及10~20个二级类型），以草地、稀疏植被、湿地和裸地为主。3种划分方法中，南坡的一级土地覆被类型基本一致；而北坡，扇区法和样带法则较脊线法少2~3个低海拔分布为主土地覆被类型；同样，在土地覆被二级类型中，脊线法北坡较南坡少1个类型，这一结果与该划分方法中北坡中包括北坡山地的各个坡向类型直接相关；扇区法和样带法的北坡二级类型仅10~11个较脊线法少9~10个，这个结果充分反映了北坡的高海拔区域分布特点。

研究区南坡面积略高于北坡面积（表2）。南坡的土地覆被类型以森林和农田为主，

表1 3种坡向划分方法中南、北坡高程范围及其土地覆被类型组成

Tab. 1 Elevation range and composition of land cover types on north and south slopes based on three division methods

南北坡划分	高程范围(m)		类型组成		无分布的主要类型		
	南坡	北坡	南坡	北坡	南坡	北坡	
脊线法	96~8844	2100~8844	一级类型10个 二级类型21个	一级类型10个 二级类型20个		常绿阔叶林	
样带法	珠峰样带	146~8844	4167~8844	一级类型9个 二级类型20个	一级类型7个 二级类型10个	建设用地	森林、灌丛 和建设用地
	马卡鲁峰样带	115~8463	3962~8460	一级类型10个 二级类型21个	一级类型9个 二级类型13个	湖泊	森林
	卓奥友峰样带	228~8200	3962~8200	一级类型9个 二级类型20个	一级类型7个 二级类型10个	建设用地	森林、灌丛 和建设用地
扇区法	96~8844	4000~8844	一级类型10个 二级类型21个	一级类型8个 二级类型11个		森林、灌丛	

占南坡面积的60%~86%；北坡以草地和裸地为主，二者占北坡面积的74%~80%。扇区法结果为：南坡以森林和农田为主（共占86%），二者比例相近（表2）；北坡以草地为主（占63%），其次是裸地和稀疏植被（分别占16.33%和12.89%）；冰川雪被面积北坡占比高。样带法结果为：南坡主要以农田和森林为主（占60%~75%），北坡以草地和裸地为主（占73%）；冰川分布面积北坡大于南坡。而脊线法的南坡以森林、农田与冰川雪被分布为主，北坡以草地、裸地与冰川雪被为主；其中北坡草地分布面积远高于南坡，是南坡的6.7倍，森林主要分布在南坡。

3.2 土地覆被类型在南北坡垂向分布形态、位置与核心分布特征

各种土地覆被类型分布随环境梯度而改变，图4呈现了土地覆被类型分布面积比重在3种南北坡划分中的垂直分布状态。土地覆被类型在南北坡上的垂直分布模式包括四大类五小类。分述如下：

南单北无峰分布型。分别发生在珠峰样带与卓奥友峰样带及扇区法的南北坡中，其共同特征为森林和灌丛仅分布在南坡。在珠峰，森林和灌丛在扇区法与样带法的南坡分布差异表现为：扇区法南坡森林（海拔100~4000 m，下同）和灌丛（1700~5100 m）的分布幅度大于样带法南坡森林（1700~3100 m）和灌丛（3200~4100 m）的分布幅度，峰值区略有差异。马卡鲁峰样带的森林分布属该类型。

单峰分布型。在单峰型分布模式中，有些类型的南坡分布峰值明显低于北坡，如冰川雪被在扇区法和样带法的珠峰南坡分布高程中分别低于北坡700 m和800 m。有些类型分布模式有南宽北窄的特点，如珠峰样带的草地、扇区法的农田和稀疏植被、脊线法的森林、灌丛和农田等；脊线法分布的沼泽湿地等也属本类型。在脊线法中，分布于高海拔的草地、稀疏植被和冰川雪被类型，由于多个独立高山多坡向成分的加入，几乎抵消山地南北坡分布的差异，故这几个类型分布的南北差异不明显。

南单北双峰分布型。属单双峰复合分布型的一种，在3种南北坡划分中，裸地峰值区在南北坡向上出现的位置各异。在珠峰样带南北坡中，稀疏植被、沼泽湿地和农田类型均为本分布模式。

南双北单峰分布型。是单双峰复合分布型的一种，如扇区法和脊线法分布的居民建设用地，珠峰样带南北坡和脊线法分布的水体（河流与湖泊）等。

南双北双峰分布型。扇区法分布的水体（河流与湖泊）属于本分布型，南坡水体分布的两个峰值分别出现在海拔200~300 m带（占比31%，下同）和海拔4900~5000 m（4.9%），北坡的两个峰值分别出现在4300~4400 m带（38.2%）和5200~5300 m（10.6%），高海拔区域的水体以冰湖为主。

表2 南、北坡土地覆被类型面积组成
 Tab. 2 Composition of area of land cover types on north and south slopes

类型	划分方法	南坡		北坡		南北面积比
		面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)	南:北
农田	扇区法	374.20	44.94	5.66	1.05	66.11:1
	样带法—MM样带	304.75	27.24	23.35	2.08	13.05:1
	样带法—MQ样带	240.29	19.52	8.21	0.87	29.27:1
	样带法—MC样带	406.96	31.88	9.04	1.02	45.02:1
	脊线法*	7917.95	26.91	243.64	0.99	32.50:1
森林	扇区法	342.38	41.12	—	—	—
	样带法—MM样带	516.34	46.16	—	—	—
	样带法—MQ样带	559.99	45.50	—	—	—
	样带法—MC样带	406.80	31.87	—	—	—
	脊线法	11177	37.99	262.54	1.08	42.60:1
灌丛	扇区法	13.62	1.64	—	—	—
	样带法—MM样带	38.65	3.45	10.41	0.93	3.71:1
	样带法—MQ样带	34.85	2.83	—	—	—
	样带法—MC样带	36.13	2.83	—	—	—
	脊线法	1433.42	4.87	660.56	2.69	2.17:1
草地	扇区法	22.17	2.66	340.08	62.99	0.07:1
	样带法—MM样带	41.97	3.75	553.23	49.38	0.08:1
	样带法—MQ样带	43.26	3.51	522.06	55.10	0.08:1
	样带法—MC样带	106.15	8.31	450.42	50.94	0.24:1
	脊线法	2041.39	6.94	11886.72	48.40	0.17:1
稀疏植被	扇区法	10.16	1.22	69.57	12.89	0.15:1
	样带法—MM样带	28.04	2.51	96.74	8.63	0.29:1
	样带法—MQ样带	28.56	2.32	72.77	7.68	0.39:1
	样带法—MC样带	66.06	5.17	35.49	4.01	1.86:1
	脊线法	1016.77	3.46	1073.82	4.37	0.95:1
水体	扇区法	9.50	1.14	0.01	0.00	950:1
	样带法—MM样带	9.67	0.86	6.90	0.62	1.40:1
	样带法—MQ样带	7.90	0.64	1.43	0.15	5.52:1
	样带法—MC样带	13.69	1.07	2.40	0.27	5.70:1
	脊线法	182.87	0.62	152.43	0.62	1.20:1
建设用地	扇区法	0.32	0.04	1.17	0.22	0.27:1
	样带法—MM样带	0.19	0.02	0.48	0.04	0.40:1
	样带法—MQ样带	—	—	—	—	—
	样带法—MC样带	—	—	—	—	—
	脊线法	13.68	0.05	0.79	0.00	17.30:1
裸地	扇区法	34.37	4.13	88.18	16.33	0.39:1
	样带法—MM样带	87.34	7.81	277.88	24.80	0.31:1
	样带法—MQ样带	176.45	14.34	192.32	20.30	0.92:1
	样带法—MC样带	145.79	11.42	203.95	23.06	0.71:1
	脊线法	4010.33	13.63	7750.94	31.56	0.52:1
	扇区法	3.18	0.38	14.93	2.77	0.21:1

续表 2

类型	划分方法	南坡		北坡		南北面积比
		面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)	南:北
沼泽湿地	样带法—MM样带	8.35	0.75	12.86	1.15	0.65:1
	样带法—MQ样带	9.07	0.74	22.95	2.42	0.40:1
	样带法—MC样带	11.91	0.93	81.77	9.25	0.15:1
	脊线法	279.49	0.95	787.95	3.21	0.36:1
冰川雪被 ^{**}	扇区法	22.83	2.74	20.26	3.75	1.13:1
	样带法—MM样带	83.27	7.44	138.51	12.36	0.60:1
	样带法—MQ样带	130.48	10.60	127.74	13.48	1.02:1
	样带法—MC样带	83.11	6.51	101.19	11.44	0.82:1
总计	脊线法	1355.58	4.61	1740.59	7.09	0.78:1
	扇区法	832.73	100.00	539.87	100.00	1.54:1
	样带法—MM样带	1118.57	100.00	1120.36	100.00	1.00:1
	样带法—MQ样带	1230.85	100.00	947.48	100.00	1.30:1
	样带法—MC样带	1276.59	100.00	884.27	100.00	1.44:1
	脊线法	29428.43	100.00	24559.97	100.00	1.20:1

注: *脊线法数据在Wu等(2017)基础上更新; **指冰川与永久积雪。

就单一土地覆被(一级)类型在南北坡分布与构成特点而言,除森林主要分布在南坡外,其他土地覆被类型在南坡垂直分布幅度均宽于北坡,而分布高程与核心分布带均低于北坡(图4、表3)。各类型在分布顺序和具体组成上也有明显不同。在南坡,由低至高海拔,各土地覆被类型的分布范围与核心分布带分别为:农田(分布在海拔100~4000 m,核心分布带在海拔500~2200 m,下同)、森林(100~4000 m,500~3100 m)、灌丛(300~5100 m,3300~4600 m)、草地(1400~5900 m,4100~5100 m)、稀疏植被(3000~5300 m,4100~5300 m)、裸地(>3000 m,4300~5900 m)、冰川雪被(>4100 m,4700~6000 m);此外,沿山谷分布有水体(100~5400 m,100~5400 m)、沼泽湿地(100~5200 m,100~1400 m)、建设用地(400~2400 m,1000~1600 m)(表3)。在北坡,从低至高海拔,各类型的分布范围与核心分布带依次为:农田(4000~4600 m,4000~4500 m)、灌丛(4300~5300 m,4500~5000 m)、草地(3900~5100 m,4200~5000 m)、稀疏植被(4600~5400 m,5000~5400 m)、裸地(>4200 m,5000~5900 m)、冰川雪被(>4300 m,5200~6700 m);而水体(4200~6100 m,4200~5000 m)、沼泽湿地(3900~5500 m,4000~4500 m)和建设用地(4200~4400 m,4300~4400 m)等沿山谷依次分布。

3.3 垂直分布特征与喜马拉雅山中部“南六北四式”土地覆被垂直带谱

南坡土地覆被类型垂直分布幅度宽且带谱完整,北坡以极高海拔类型为主且分布幅度窄、结构简单(图5),南、北坡的垂直带结构组合不同,具有明显的山地垂直带性分异特点。而体现人类活动特点的建设用地与农田从低海拔至高海拔多沿山(河)谷分布,在低中海拔区建设用地和农田常与森林和灌丛交错分布,这种包含人类活动特点的垂直带谱恰是该地区土地覆被垂直带谱的特征之一。从图5可见南北坡各土地覆被类型的分布与组合特点。在南坡,森林、灌丛、草地、稀疏植被、裸地、冰川雪被等类型呈带状分布,而农田、建设用地、湿地、水域等从低至高海拔均有分布(图5);3种南北坡划分方法,都一定程度地展示了这个类型组成特点,仅是其分布的海拔高程及面积不同。在北坡:农田、草地、稀疏植被、裸地、冰川雪被等类型呈带状分布,农田和建设用地在北坡海拔4400 m以下山谷分布,湿地与水域相伴或分布在冰雪边缘区域。

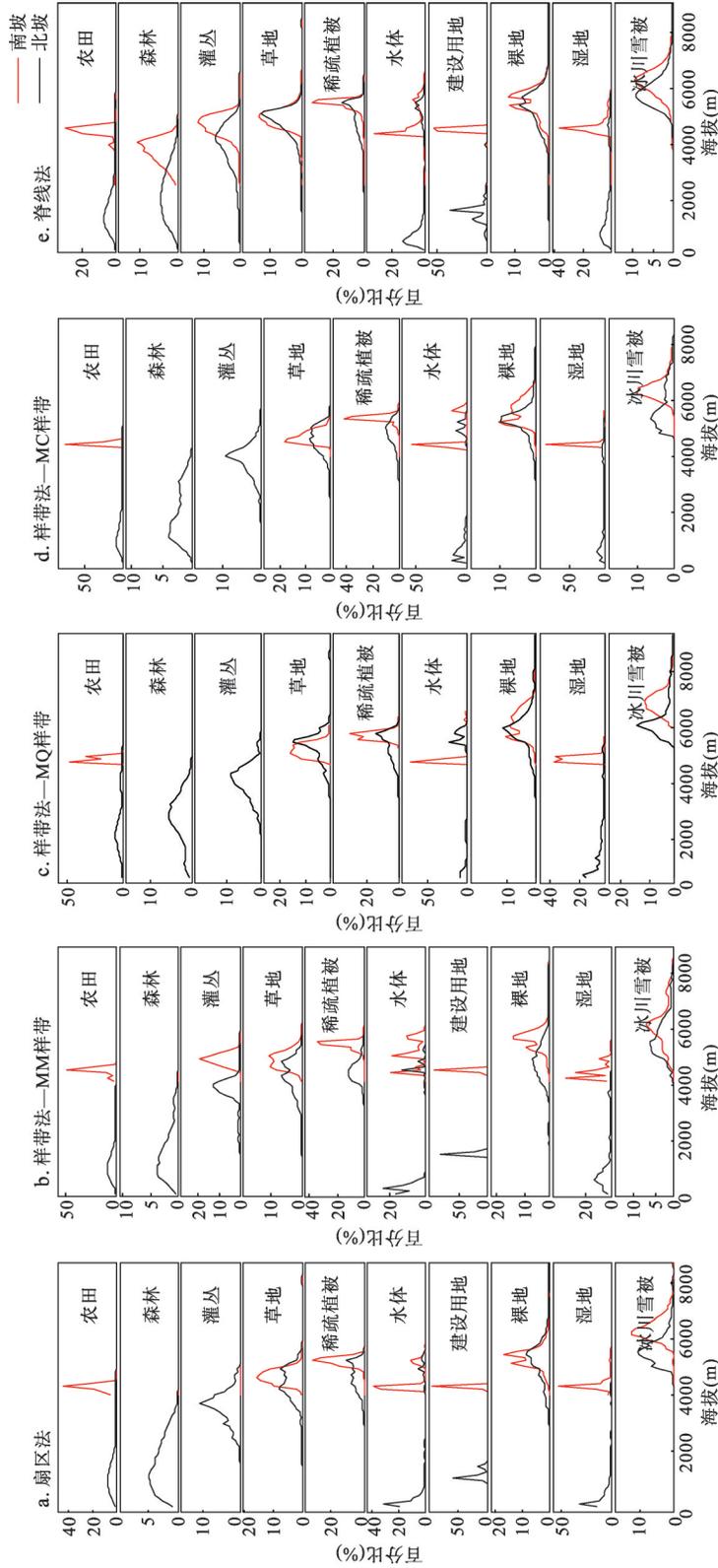


图4 土地覆被类型在3种划分方法中的垂直分布模式

Tab. 4 Altitudinal distribution mode of three land cover types on north and south slopes

表3 南、北坡土地覆被类型垂直分布范围(m)

Tab. 3 Altitudinal distribution range of land cover types on north and south slopes based on different division methods

类型	划分方法	南坡			北坡		
		海拔范围	核心分布带	优势带	海拔范围	核心分布带	优势带
农田	扇区法	100~4000	600~1700	100~1800	4000~4500	4100~4500	-
	样带法—MQ样带	100~4000	1100~2200	1000~1700	4200~4600	4200~4500	-
	样带法—MM样带	100~4000	700~1500	-	3900~4500	4300~4500	-
	样带法—MC样带	200~4000	500~1400	200~1400	4200~4500	4400~4500	-
	脊线法	96~4300	700~1700	100~1500	2300~4500	4100~4500	-
森林	扇区法	100~4000	500~2000	1800~3600	-	-	-
	样带法—MQ样带	100~4000	1700~3100	100~1000 1700~3900	-	-	-
	样带法—MM样带	100~4000	600~1900	100~3700	-	-	-
	样带法—MC样带	200~4000	700~2200	1400~3800	-	-	-
	脊线法	100~4000	1100~2600	1500~3800	2100~4000	3200~4000	2300~3900
灌丛	扇区法	1700~5100	3300~4200	3600~4000	-	-	-
	样带法—MQ样带	1700~5000	3200~4200	3900~4100	-	-	-
	样带法—MM样带	1600~5000	3700~4200	3700~4200	4300~5300	4500~5000	-
	样带法—MC样带	1600~5100	3500~4300	3800~4000	-	-	-
草地	扇区法	300~4800	3400~4600	3800~4200	2400~4800	4200~4800	3900~4100
	样带法—MQ样带	1600~5900	4100~5100	4000~5000	4000~5100	4500~5000	4000~5100
	样带法—MQ样带	3000~5100	4600~5100	-	4200~5100	4400~4900	4200~5100
	样带法—MM样带	1500~5100	4100~5000	-	3900~5100	4400~5000	4000~5100
	样带法—MC样带	2500~5100	4300~5000	4000~5000	4200~5100	4300~4700	4400~5000
稀疏植被	脊线法	1400~5100	4400~5000	4400~5000	2500~5100	4400~5000	4100~5100
	扇区法	3000~5300	4400~5300	-	4600~5400	5000~5400	5100~5400
	样带法—MQ样带	3000~5300	4500~5300	-	4700~5300	5000~5300	5100~5300
	样带法—MM样带	3300~5300	4100~4800	-	4700~5300	5200~5300	5100~5300
	样带法—MC样带	3100~5300	4500~5200	-	4700~5300	5200~5300	5200~5300
水体	脊线法	2100~5300	4600~5300	-	4000~5400	5000~5400	5100~5400
	扇区法	100~2500 4200~5300	100~500	-	4200~4500 5000~5800	4200~4400	-
	样带法—MQ样带	100~800 1400~2200 4600~5400	4900~5400	-	4200~4400 5700~6100	4200~4300	-
	样带法—MM样带	100~900 3700~5300	100~500	-	4200~5300	4200~4300 4800~5000	-
	样带法—MC样带	200~1800 4200~5300	200~700	-	4200~4400 5500~5800	4300~4400	-
建设用地	脊线法	96~2900 3700~5300	200~700 4900~5300	-	2200~5300	4100~4600	-
	扇区法	1000~1700	1100~1300 1500~1600	-	4200~4400	4300~4400	-
	样带法—MQ样带	-	-	-	-	-	-
	样带法—MM样带	1500~1700	1500~1600	-	4200~4400	4300~4400	-
	样带法—MC样带	-	-	-	-	-	-
脊线法	400~2400	1000~1600	-	4200~4400	4200~4400	-	

续表3

类型	划分方法	南坡			北坡		
		海拔范围	核心分布带	优势带	海拔范围	核心分布带	优势带
裸地	扇区法	> 3000	4800~5900	5000~5700	> 4200	5100~5600	5400~6000
	样带法MQ样带	> 3000	5000~5900	4100~5500	> 4200	5000~5900	5300~6100
	样带法MM样带	> 3400	4300~5200	4200~5100	> 4300	5100~5700	5300~5900
	样带法MC样带	> 3100	5000~5500	5000~5900	> 4300	5000~5800	5000~5200 5300~6100
	脊线法	> 1100	4700~5700	4200~4400 5000~5700	> 3000	5000~5700	5400~6000
沼泽湿地	扇区法	< 2800	100~500	-	4000~5000	4200~4500	-
	样带法MQ样带	< 4900	100~1000	-	4200~5200	4200~4500	-
	样带法MM样带	100~4500	400~1100	-	3900~5300	4000~4400	3900~4000
	样带法MC样带	< 5200	200~1400	-	< 5500	4300~4400	-
	脊线法	< 5100	200~1400	-	3500~5300	4100~4400	-
冰川雪被	扇区法	> 4400	5200~5900	> 5700	> 5100	6000~6600	> 6000
	样带法MQ样带	> 4800	5100~5800	> 5500	> 5400	6000~6700	> 6100
	样带法MM样带	> 4100	5000~6000	> 5100	> 4300	5200~6300	> 5900
	样带法MC样带	> 4600	4700~5700	> 5900	> 5400	6000~6600	> 6100
	脊线法	> 4000	5100~5900	> 5700	> 3800	5400~6300	> 6000

实际上,从低海拔至高海拔的每个高程带上,土地覆被类型构成由复杂至简单,即由南坡的3或4类至1类、或北坡的2或3类至1类(图5)。与海拔变化相应,某些高程带的土地覆被类型构成会发生相应变化,这显示了生态系统适应环境或受人类影响的综合结果。

为清晰阐释和模式化分析山地土地覆被垂直带结构特点,本文基于一级土地覆被类型在坡面上分布的优势带范围(表3),构建了山地土地覆被垂直带结构图(图6)。结果显示,喜马拉雅山中中部珠峰地区土地覆被垂直带谱为南六北四(五)垂直结构模式(图6a、图6b)。南六包括:农田、森林、灌丛、草地、裸地和冰川雪被;北四(五)包括:草地、稀疏植被、裸地、冰川雪被(湿地)。这种结构反映了土地覆被与珠峰垂直自然带和植被垂直带结构的内在联系,同时南坡的农田或农田—森林复合带(图6b)也反映了人类活动的基本特征。

4 讨论

4.1 土地覆被垂直分布与气候带类型和土壤带类型分布的关系

珠峰地区巨大的地势差异使得水热组合状况随海拔升降而发生变化,区域的气候、土壤及生态系统的垂向变化明显,成为自然带垂直分异的基础。珠峰南北坡气候和土壤垂直构成迥异^[21](表4);仅以土地覆被优势带的垂直分布与气候和土壤带类型垂直分布的比较结果而论,珠峰南北坡各自形成了独特的土地覆被垂直组合系列,反映了主要土地覆被类型适应特殊环境的特点。同时,部分土地覆被类型优势带分布的上下限与气候和土壤带类型分布略有差异,这可能是由于形成三者的研究样区、样带和样点位置、研究方法以及数据时空尺度不同等所致。

4.2 珠峰土地覆被与植被垂直分布比较

将扇区法优势带构成的珠峰土地覆被垂直带结构图与珠峰植被垂直带结构图^[22]进行

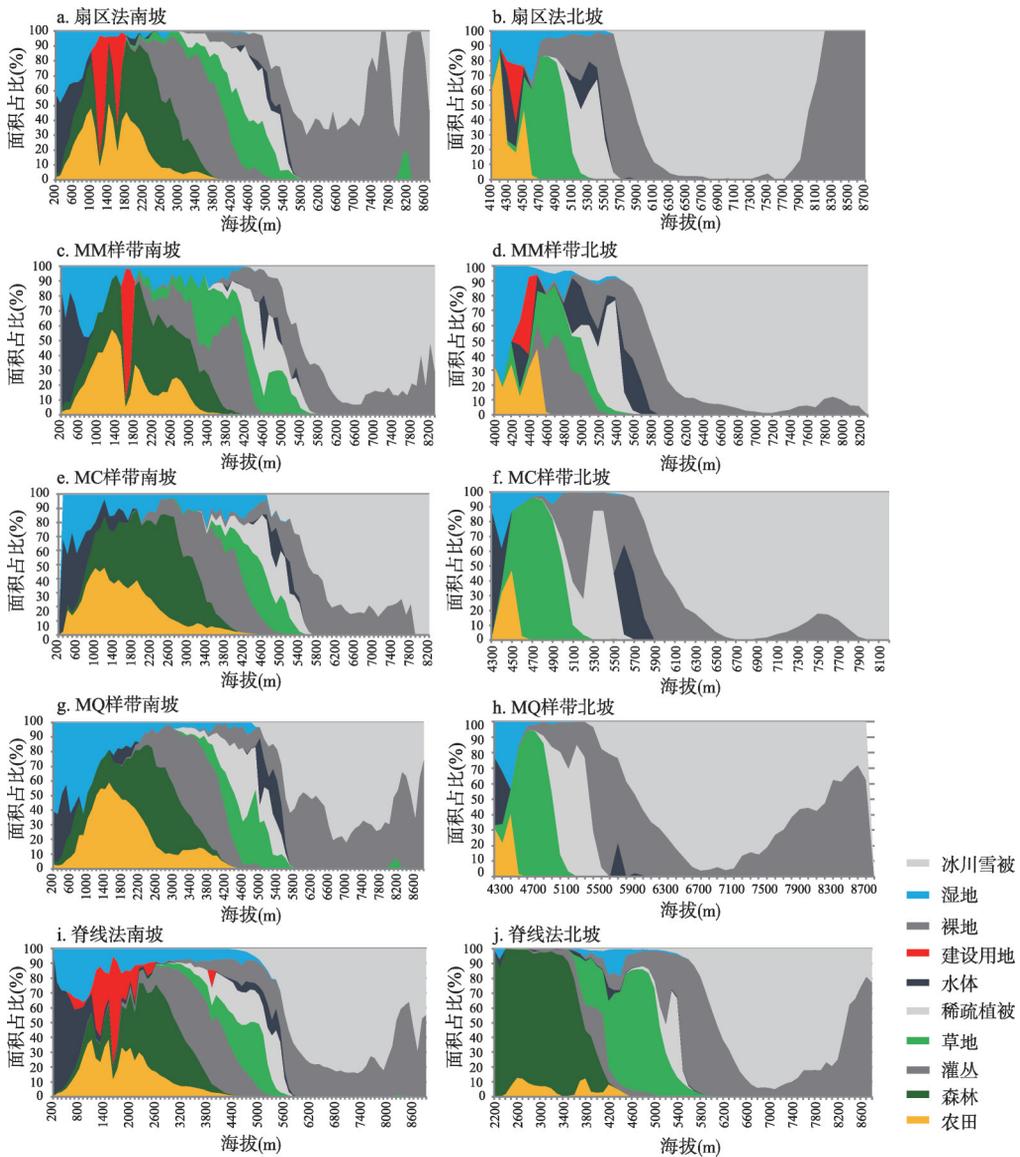
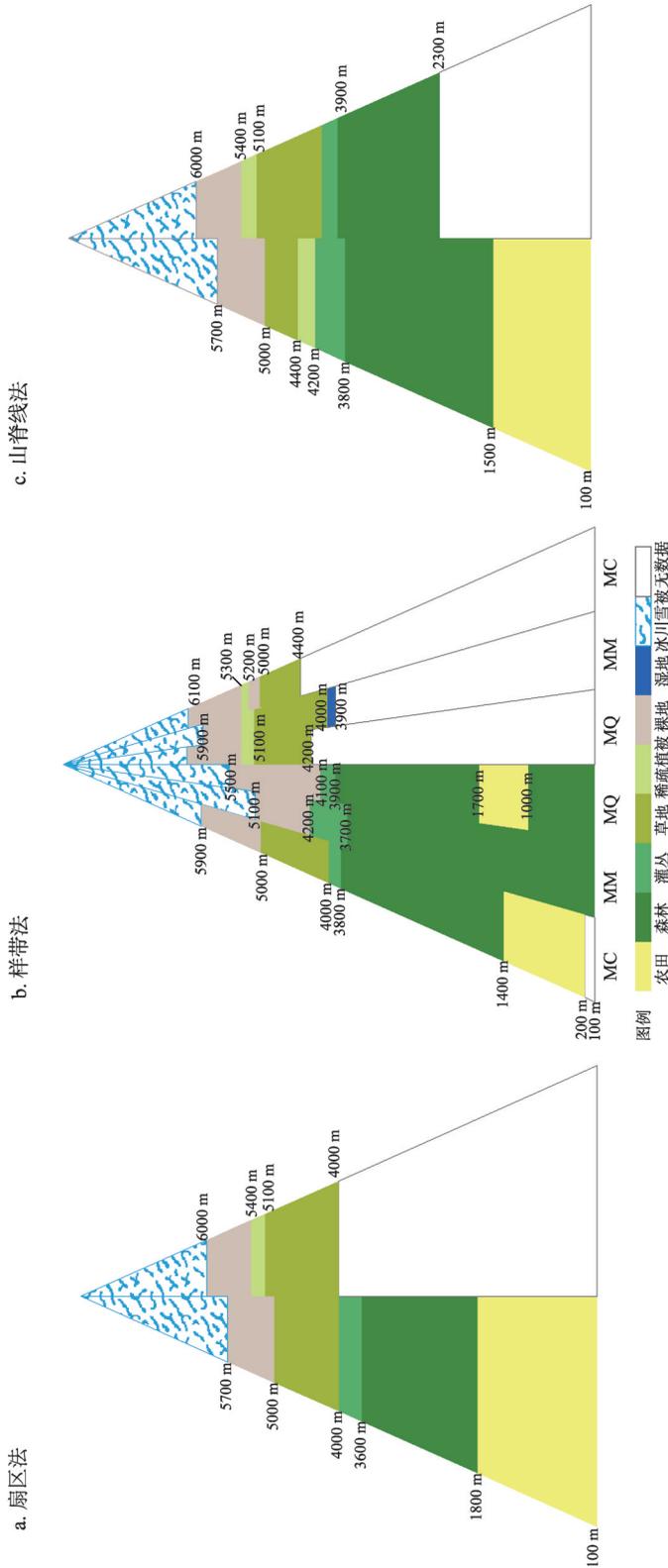


图5 扇区法、样带法和脊线法土地覆被分布及其在各高程带构成

Fig. 5 Land cover distribution and its composition of area ratio of each elevation zone on northern and southern slope

对比可以发现 (表5), 除农田外, 两者在南北坡分布组成和结构的主要特征一致。如南坡由低至高海拔依次分布着森林、灌丛、草地、稀疏植被、裸地和冰川雪被, 北坡依次为草地、稀疏植被、裸地和冰川雪被。二者在 (一级) 大类型上基本一致, 仅分布幅度上存在差异。

与植被垂直带结构不同, 土地覆被的类型构成与分布具有自己的特点, 因其基于高分辨率的遥感影像数据和高精度的空间解译, 识别出了人类土地开发活动的直接结果, 包括农田和居民用地的分布及相应的对山地森林、灌丛和草地的利用; 表现在分布格局上, 南坡海拔1800 m以下区域形成了伴有农田优势带的农林相间分布, 北坡农田和居民用地则在海拔4400 m以下分布为主。同时, 也识别出河流湖泊及湿地等类型。



注：左为南坡，右为北坡。

图6 3种南北坡划分方法的土地覆被优势垂直带结构示意图

Fig. 6 Dominant altitudinal band structure of land cover on south and north slopes based on different division methods in the Koshi basin

表4 珠穆朗玛峰南北坡土地覆被与气候和土壤带类型垂直分布关系

Tab. 4 Comparison of altitudinal distribution of land cover, climate and soil on south and north slopes of Mt. Qomolangma

珠峰气候垂直带 ^a			珠峰土壤垂直带 ^a		珠峰(扇区法)土地覆被优势带 ^b	
海拔(m)	垂直气候带类型	海拔(m)	垂直土壤带类型	优势带	土地覆被类型	
南坡	1600~2500	山地亚热带	1600~2500	山地黄棕壤	100~1800	农田
	2500~3100	山地暖温带	2400~3100	山地酸性棕壤	1800~3600	森林
	3100~3900	山地寒温带	3100~4100	山地漂灰土	3600~4000	灌丛
	3900~4700	亚高山寒带	4100~4500	亚高山灌丛草甸土		
			4100~4500	亚高山草甸土	4000~5000	草地
			4500~4800	高山草甸土		
	4700~5500	高山寒冻带	4800~5600	高山寒漠土	5000~5700	裸地
> 5500	高山冰雪带	> 5600	冰和雪	> 5700	冰川雪被	
北坡	4000~5000	高原寒冷带	4400~4700	亚高山草原土	4000~5100	草地
	5000~6000	高山寒冻带	4700~5200	高山草甸草原土	5100~5400	稀疏植被
			5200~5500	高山寒漠土	5400~6000	裸地
	> 6000	高山冰雪带	> 5500	冰和雪	> 6000	冰川雪被

注：^a文献[21]数据；^b本文数据。

将本文结果与1959—1968年间的植被垂直带结构进行比较发现，珠峰地区植被垂直带的结构特征未发生实质改变，但高海拔区域地衣砾石带（土地覆被类型的裸地）因气温增高和人类活动、低海拔区森林因人类活动影响而出现局部变化：砾石区分布范围显著增大（向下拓展主要来自放牧引起的草地退化后所致^[19]，而向上发展更多的是高海拔冰川退缩形成的新的裸地区域^[23]），森林分布范围减小与农田和居民用地分布增大有关。这些变化影响着高山总体生态系统服务功能，凸显出在珠峰地区中尼两国共同面临生态与环境保护的问题和挑战。比较而言，土地覆被垂直带研究可以更系统地反映人类活动对土地系统和植被影响的格局和过程。

5 结论

基于土地覆被和DEM等多源数据，采用3种山地南北坡向划分方法，从垂直带视角，对喜马拉雅中段土地覆被垂直带结构、组成、类型和分布特征进行研究，结果表明：

(1) 喜马拉雅中部土地覆被主体垂直结构与自然垂直带谱的结构基本一致，具有明确的垂直地带性结构特点。同时，土地覆被垂直带谱中反映了人类活动的特征。喜马拉雅中部土地覆被垂直带谱为南六北四式。

(2) 南北坡土地覆被类型构成差异显著，南坡土地覆被类型多样、分布幅度宽，北坡类型简单且以高海拔类型为主、分布幅度窄。从低至高海拔，南坡土地覆被由森林、灌丛、草地、稀疏植被、裸地、冰川雪被等类型呈带状依次分布，北坡由草地、稀疏植被、裸地、冰川雪被等类型呈带状依次分布，而水域、湿地、农田、建设用地等多沿山(河)谷分布。

(3) 3种南北坡划分方法分析结果显示，南坡的土地覆被垂直带结构相似，脊线法因其南或北坡内均包含各坡向分布类型而导致其结果不确定性较大，是形成北坡分布类

表5 珠穆朗玛峰土地覆被与植被垂直分布比较

Tab. 5 Comparison of altitudinal distribution of land cover and vegetation on the slope of Mt. Qomolangma

	珠峰(扇区法)土地覆被类型垂直分布 ^a				珠峰植被垂直分带 ^b	
	分布范围 (m)	核心分布 (m)	优势带 (m)	土地覆被类型 及构成信息	分布范围 (m)	植被类型及组成
南坡	100~4000	600~1700	100~1800	农田 < 1000 m, 农田—常绿阔叶林交错分布。 1400~1800 m, 农田—常绿落叶阔叶混交林交错分布。 农作物主要有水稻、玉米、小麦、黍类、土豆。	< 1000(1200)	季雨林带 婆罗双树季雨林带的上限一般在海拔1000 m左右, 局部达1200 m。
	100~4000	500~2000	1800~3600	森林 常绿落叶阔叶混交林	1000~2500	常绿阔叶林带 通常海拔2000 m以下以印栲、木荷为主, 2000 m以上中国境内被铁桐、粗穗石柯替代, 尼泊尔境内被 <i>L.spicata</i> 为主的山地常绿阔叶林替代。
					2500~3000 (3100)	山地针叶阔叶(常绿、落叶)混交林带 局部上限达海拔3100m, 是整个南坡植被垂直带谱中幅度较窄的一个带。主要由铁杉和高山栎的纯林或混交林组成。
					3000~3800 (4100)	亚高山针叶林带 主要由冷杉林构成。阴坡分布冷杉林和糙皮桦林, 阳坡高山栎林、还有松柏梳林和灌丛。
	1700~5100	3300~4200	3600~4000	灌丛 优势种以钟花杜鹃、高山柏和刚毛杜鹃等为主。	3800(4100)~ 4500	高山灌丛 南坡以扁芒草禾草甸和松柏灌丛为主。北坡以杜鹃为主的小叶矮灌丛。
	1600~5900	4100~5100	4000~5000	草地 伴有撂荒地。	4500~5200	高山草甸 冰草苔原和多种垫状植物、杂草类的高山草甸。
	3000~5300	4400~5300		稀疏植被		
	> 3000	4800~5900	5000~5700	裸地	5200~5500 (5600)	地衣砾石带 地面覆盖砾石、冰碛物, 表面生有地图黄绿衣、粗糙碟衣、鸡皮衣、裂叶石耳、红橙衣、菊叶梅衣印等。
	> 4400	5200~5900	> 5700	冰川雪被	> 5500(5600)	永久冰雪带
	100~2500 4200~5300 < 2800	100~500 100~500		水体 河流与湖泊 沼泽湿地		
1000~1700	1100~1300 1500~1600		建设用地			
北坡	4000~4500	4100~4500	4000~5100	草地 以高寒草地分布为主, 在河谷中分布农田。	3900~4400	草原带 以白草、固砂草原为主。
	4000~5100	4500~5000		草地 高寒草原, 以藏沙蒿, 藏白蒿, 细裂叶莲蒿, 固沙草等为主。	4400~5000	高山草原带 以紫花针茅草原为主。

续表5

	珠峰(扇区法)土地覆被类型垂直分布 ^a				珠峰植被垂直分带 ^b	
	分布范围 (m)	核心分布 (m)	优势带 (m)	土地覆被类型 及构成信息	分布范围 (m)	植被类型及组成
北坡	4600~5400	5000~5400	5100~5400	稀疏植被 主要植物为垫状点地梅, 山地蚤缀, 绢毛棘豆。	5000~5700	高山草甸与稀疏垫状植 被带 分布冰川苔原、嵩草草 甸, 并且杂有多种垫状 植物。
	> 4200	5100~5600	5400~6000	裸地	5700~5800 (6200)	地衣、砾石带
	> 5100	6000~6600	> 6000	冰川雪被	>5800~6200	永久冰雪带
	4200~4500	4200~4400		水体		
	5000~5800			河流与湖泊		
	4000~5000	4200~4500		沼泽湿地		
	4200~4400	4300~4400		建设用地		

注: ^a本文数据; ^b文献[22]数据。

型差异大的主要因素。野外调查实证表明, 扇区法划分结果很好地体现了山地南北坡的土地覆被自然分布格局。

(4) 与40多年前植被垂直带比较, 珠峰地区植被垂直带主体结构特征未发生实质改变。变化主要表现在: 裸地向上向下拓展, 分布幅度显著增大; 南坡低海拔地区森林转换为农田和居民用地的面积增加显著。

致谢: 王秀红、摆万奇和朱会议先生在论文撰写和修改中提出了宝贵的建议, 刘林山和王兆锋等在研究中给予支持和帮助, 特此感谢。

参考文献(References)

- [1] Haberl H, Erb K H, Krausmann F, et al. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(31): 12942-12945.
- [2] Pitman A, Avila F, Abramowitz G, et al. Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate. *Nature Climate Change*, 2011, 1(9): 472-475.
- [3] He F, Vavrus S, Kutzbach J, et al. Simulating global and local surface temperature changes due to Holocene anthropogenic land cover change. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 623-631.
- [4] Mooney H, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110: 3665-3672.
- [5] Walter H. *Vegetation of the earth in relation to climate and the eco-physiological conditions*. London: The English Universities press Ltd., 1973.
- [6] Dullinger S. Modelling climate change-driven treeline shifts: Relative effects of temperature increase, dispersal and invisibility. *Journal of Ecology*, 2004, 92: 241-252.
- [7] Allan N J R. Accessibility and altitudinal zonation models of mountains. *Mountain Research & Development*, 1986, 6(3): 185-194.
- [8] Callaway R M. Positive interactions in plant communities and the individualistic-continuum concept. *Oecologia*, 1997, 112(2): 143-149.
- [9] Grabherr G, Gottfried M, Paull H. Climate effects on mountain plants. *Nature*, 1994, 369(6480): 448.
- [10] Mu Changcheng. Succession of *Larix olgensis* and *Betula platyphlla*-marsh ecotone communities in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied ecology*, 2003, 14(11): 1813-1819. [牟长城. 长白山落叶松和白桦—沼泽生态

- 交错带群落演替规律研究. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1813-1819.]
- [11] Beniston M. Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, 2003, 59(1/2): 5-31.
- [12] Gian-Reto W, Eric P, Peter C, et al. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [13] Liang E, Wang Y, Piao S, et al. Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(16): 4380-4385.
- [14] Xu Juan, Zhang Baiping, Tan Jing, et al. Spatial relationship between altitudinal vegetation belts and climatic factors in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Mountain in Reserach*, 2009, 27(6): 663-670. [许娟, 张百平, 谭靖, 等. 青藏高原植被垂直带与气候因子的空间关系. 山地学报, 2009, 27(6): 663-670.]
- [15] Yao Yonghui, Xu Mei, Zhang Baiping. Implication of the heating effect of the Tibetan Plateau for mountain altitudinal belts. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 407-419. [姚永慧, 徐美, 张百平. 青藏高原增温效应对垂直带谱的影响. 地理学报, 2015, 70(3): 407-419.]
- [16] Li X X, Liang E Y, Grisar J, et al. Critical minimum temperature limits xylogenesis and maintains treelines on the southeastern Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2017, 62(11): 804-812.
- [17] Liang E Y, Wang Y F, Piao S L, et al. Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(16): 4380-4385.
- [18] Cidanlunzhu. Survey of Mount Qomolangma Nature Reserve. *China Tibetology*, 1997(1): 3-22. [次旦伦珠. 珠穆朗玛峰自然保护区概况. 中国藏学, 1997(1): 3-22.]
- [19] Zhang Y L, Gao J G, Liu L S, et al. NDVI-based vegetation changes and their response to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayans. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 139-148.
- [20] Wu X, Gao J G, Zhang Y L, et al. Land cover status in the Koshi River Basin, Central Himalayas, *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(1): 10-19.
- [21] Mount Qomolangma Group of Nanjing Institute of Soil Research, Chinese Academy of Sciences. The characteristics of soil geographical distribution in the Mount Qomolangma area//Tibet Scientific Expedition Team of the Chinese Academy of Sciences. A Report on the Scientific Investigation of the Mount Qomolangma Area. Beijing: Science Press, 1975. [中国科学院南京土壤研究所珠峰组. 珠穆朗玛峰地区土壤地理分布特点//中国科学院西藏科学考察队. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告. 北京: 科学出版社, 1975.]
- [22] Zhang Jingwei, Jiang Shu. A primary study on the vertical vegetation belt of Mt. Jolmo-Lungma (Everest) Region and its relationship with horizontal zone. *Acta Botanica Sinica*, 1973, 15(2): 221-236. [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, 15(2): 221-236.]
- [23] Nie Yong, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Monitoring glacier change based on remote sensing in the Mt. Qomolangma National Nature Preserve, 1976-2006. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 13-28. [聂勇, 张懿铨, 刘林山, 等. 近30年珠穆朗玛峰自然保护区冰川变化的遥感监测. 地理学报, 2010, 65(1): 13-28.]

Vertical variation of land cover in the Central Himalayas

ZHANG Yili^{1,2,3}, WU Xue^{1,3}, ZHENG Du¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Qomolangma Mountain region within the Central Himalayas is characterized by obvious altitudinal variation, habitat complexity, and land cover diversity. This region is therefore one of the most sensitive areas to climate change in the world. Besides, because this region has the most complete natural vertical spectrum in the world, it is ideal for studying the vertical structure of alpine land cover. Utilizing land cover data for 2010 (30 m resolution) along with digital elevation model outputs, three division methods were defined that encompass the northern and southern slopes of Qomolangma Mountain. These comprised the ridgeline method, the sample transect method, and the sector method. The study investigated altitudinal distributions, similarities and differences, and changes in the degree of land cover on the northern and southern slopes of the Himalayas area using the software ArcGIS and MATLAB tools and division models. The main results of this analysis are listed as follows:

Firstly, the distribution of land cover in mountainous areas was characterized by an obvious vertical spectrum structure, with the south- six and north- four pattern of vertical spectrum of land cover in the Central Himalayas marked by the influence of human activities. Secondly, zonal distribution was exhibited by forests, grasslands, sparse vegetation, barren land, glaciers, and snow covers from low to high altitudes. It was markedly different in the composition and structure of land cover vertical spectrum between the northern and southern slopes of this mountain area. The vertical spectrum of land cover types on the southern slope was complete and diverse, but it was relatively simple on the northern slope. The study shows that given the same land cover type, the amplitude of elevation distribution on the southern slope was wide, while that on the northern slope was narrow. The distribution of land cover types on the southern slope was low. Thirdly, the results show that the area distribution ratio of each land cover type varied with elevation according to change mode. Vertical distribution patterns of land cover types on the southern and northern slopes were therefore divided into four categories, with glaciers, snow, sparse vegetation, and grasslands conforming to unimodal distribution patterns. The bare land also followed a unimodal distribution pattern on the southern slope, but it followed a bimodal one on the northern slope. Fourthly, all kinds of vertical belt structures and land cover divisions on the southern slope were similar, but they were different from one another on the northern slope due to division methods. In comparison with field survey data, results reported here for the sector method were more in line with the actual situation.

Keywords: land cover; altitudinal zonation; Central Himalayas; Mt. Qomolangma; Mt. Makalu; Mt. Cho Oyu