

横断山区垂直带谱的分布模式与坡向效应

姚永慧¹, 张百平^{1*}, 韩芳^{1,2}, 庞宇^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 10049)

摘要: 根据收集到的横断山区山地垂直带谱数据, 对山地垂直带的坡向效应和空间分布规律进行了分析和研究。结果表明: 1) 主要的垂直带和垂直带界线如林线、暗针叶林带、雪线等的纬度和经度地带性分布规律明显并且分布模式都相似, 纬向上呈开口向下的二次曲线分布模式, 经向上呈开口向上的二次曲线分布模式, 两者共同形成“双曲抛物面”分布模式, 充分反映了横断山区的环境与生态的复杂性和独特性, 也进一步丰富和发展了山地垂直带谱的二次曲线假说; 2) 横断山区山地垂直带谱表现出明显的基于水分驱动的坡向效应, 主要表现为同一山体的东、西坡往往具有不同的基带和带谱结构, 相同类型的带谱出现的海拔和分布范围不同, 迎风坡表现出较为湿润的类型和带谱结构, 而背风坡则表现出更为干旱的类型和组成结构; 横断山区的坡向效应主要是由于山体对当地盛行季风的影响, 造成迎风坡和背风坡水热条件相差很大, 从而发育不同的山地垂直带谱类型。从横断山区山地垂直带谱的空间分布规律来看, $28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$ $98^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{E}$ 范围内, 即大致在澜沧江以东—雅砻江以西, 山地垂直带谱普遍表现出干热的特点, 为横断山区干热气候的核心地带。但如何定量分析山地的坡向效应尚有待于进一步的研究和讨论。此外, 数据质量和数据误差也对分析的结果, 尤其是空间分布模式的数学模拟结果产生一定的影响, 在以后的研究中尚需进一步完善。

关键词: 横断山区; 山地垂直带谱; 坡向效应; 二次曲线模式

中图分类号: Q142 Q15

文献标识码: A

近年来, 在山地垂直带谱数字集成及欧亚大陆 / 全球空间分布模式的研究过程中, 深刻感觉到山体坡向对垂直带谱的巨大影响。东西走向山脉的南北坡, 南北走向山脉的东西坡, 温带干旱半干旱地区山地的东西南北坡, 垂直带谱成分与结构在短距离内都发生了非常惊人的变化。我们认为无论建立垂直带谱全球模式还是区域模式, 必须将坡向考虑在内。否则任何模式都难以达到理想的程度。但目前垂直带谱坡向效应研究程度太低, 往往只有南北坡简单对比、东西坡差异的说明。其根本原因一方面在于山地垂直带谱数据缺乏且过度离散, 大部分研究中只有 1~2 个坡向的纪录, 难得有东西南北 4 个方向的数据; 另外一方面在于山地垂直带谱数据的精度过低, 在以往的研究中数据多是 100 m 的精度。在

我们的山地垂直带谱数字集成过程中, 收集到相当一部分的坡向数据, 例如横断山区东、西坡的垂直带谱数据, 有条件对山地垂直带谱的坡向效应作系统的对比研究。

近南北走向的横断山区, 其东西坡都表现出明显的受水分条件驱动的坡向效应, 是一个进行坡向效应分析的典型例子。横断山区是拥有全世界唯一一个满足世界自然遗产四个条件的“三江并流”自然遗产, 这里是东亚、南亚和青藏高原三大地理区域的交汇处, 是世界上罕见的高山地貌及其演化的代表地区, 也是世界上生物物种最丰富的地区之一, 这里集中了北半球亚热带、中亚热带、北亚热带、暖温带、温带、寒温带、温带、寒带的多种气候和生物群落, 是地球最直观的体温表和中国珍稀濒危动植物

收稿日期 (Received date): 2009-09-02 改回日期 (Accepted): 2009-11-28

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40971064), 中科院地理科学与资源研究所知识创新工程新进所青年人才领域前沿项目、IREIS 自主研究项目资助。 [Supported by Natural Science foundation of China (40971064), KSNRR youth innovation project and IREIS self-determined project]

作者简介 (Biography): 姚永慧 (1975-) 女, 湖北安陆人, 博士、助理研究员, 主要从事 GIS/RS 应用与山地环境研究。 [Yao Yonghui (1975-), born in Hubei Province, doctoral degree, mountain environment and applied GIS/RS] E-mail: yaoym@ireis.ac.cn

* 通讯作者 (Author for correspondence), E-mail: zhangbj@ireis.ac.cn

的避难所。同时,这里也具有多姿多彩的民族风情和古老的江边文化。在这种独特而复杂的自然地理、气候及人文条件下,这里也是欧亚大陆乃至全世界山地垂直带谱变化最大、最复杂的区域,对这一区域的山地垂直带谱的深入分析和对比有助于进一步揭示山地垂直带谱内在的分布规律和模式。

上世纪 50 至 80 年代,我国老一辈的科学家们,对这一地区进行过多次科学调查,对横断山区山地垂直带谱的基本类型、垂直带的分异规律等进行了研究和分析,这些研究成果发表在一些初步的考察报告和期刊文献中。李文华等根据植被演替规律,将横断山区的原生植被划分为干热河谷灌丛草丛、准热带山地雨林、准热带季雨林、山地湿性阔叶林、云南松林等 17 种类型,并对植被分布与水热因子的定量关系进行了系统研究^[1]。郑远昌等将横断山区自然垂直带的基本类型归纳为热带湿润型、南亚热带湿润型、南亚热带干湿交替型、中亚热带干湿交替型等 9 种类型,并对基带和带谱结构在纬度、经度方向上的变化以及东西坡的坡向变化进行了阐述^[2]。刘伦辉等将横断山区主要的植被类型划分为亚热带常绿阔叶林、硬叶常绿阔叶林、暖温性常绿针叶林、温性常绿针叶林、寒温性常绿针叶林等 11 种大类 18 种小类,并对植被垂直带的经向和纬向分布规律及坡向变化进行了阐述^[3]。以往的工作做

了很多基础性的研究,对横断山区的山地垂直带类型、分布规律作了初步的总结和探讨,积累了较为丰富的资料,但仍存在一些问题:(1)没有统一的分类标准和分类体系,分类系统间的差异、分歧导致难以进行区域内的对比分析;(2)缺乏对区域内整体垂直带谱结构类型的系统总结,对其总体分布规律及地域分异特征的认识,尚停留于区域性片段认识阶段;(3)对该区域内垂直带空间分布模式的研究,多限于几个山地的对比、归纳或单条垂直带界限的分析,对整体的垂直带分布格局及其尺度变化的认识尚不完整,很多重要的地生态学现象也未得到充分展示和研究;(4)由于数据的缺乏,对区域内的山地垂直带的坡向效应研究不足。

在欧亚大陆山地垂直带谱数字集成与空间分布模式研究的框架下,我们对横断山区垂直带谱资料进行了系统整理,并按统一的分类体系和分类标准对数据进行了标准化^[4],在此基础上,根据横断山区地形地貌及垂直带谱的分异特点,分东、西坡系统分析了这一区域山地垂直带谱的空间分布模式及特征。本文收集到横断山区完整垂直带谱 109 个^[5-20],但有明确位置可以使用的 76 个,(西坡 41 个,东坡 35 个),还收集到若干独立的雪线数据。这些带谱数据主要分布在 24°~32°N 98°~104°E 的范围内(图 1)。

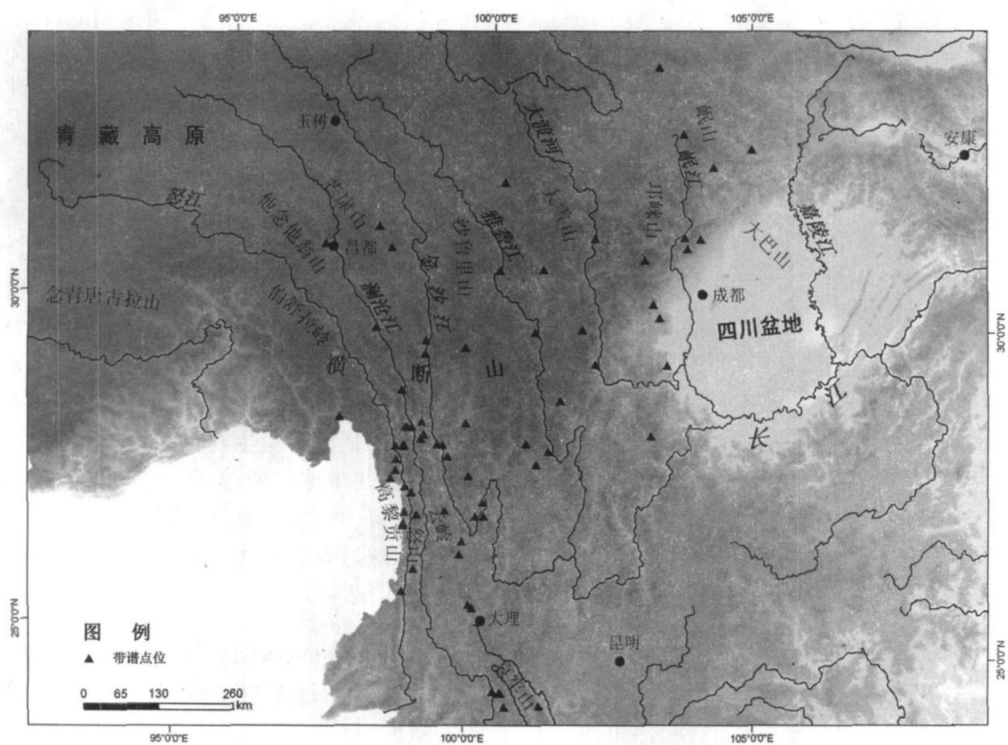


图 1 横断山区山地垂直带谱数据点分布示意图

Fig. 1 Location of altitudinal belt spectra in the Hengduan Mountains

1 山地垂直带谱的分布规律

主要的山地垂直带类型

1. 基带类型: 横断山区的基带类型主要为亚热带季风常绿阔叶林带、亚热带常绿阔叶林带、亚热带常绿针叶林带、亚热带常绿硬叶阔叶林带、亚热带干热河谷稀树灌丛带、亚热带常绿硬叶灌木林/灌丛带和寒温带阴暗针叶林带(表 1)。

亚热带季风常绿阔叶林带主要分布于受暖湿气流影响的迎风坡, 多见于怒山以西山地的西坡以及邛崃山以东山地的东坡, 分布的海拔主要在 1 100 m ~2 200 m 的范围内。亚热带常绿阔叶林带是横断山区较为常见的一种基带类型, 主要分布于海拔

1 200 m~2 800 m 的范围内, 东、西坡均有分布。亚热带常绿针叶林带是横断山区东坡基带的一种常见类型, 主要分布于海拔 1 000 m~3 200 m 的范围内。亚热带常绿硬叶阔叶林带主要分布于比较干旱的阳坡或者气候干热的河谷地区, 其分布的海拔范围多见于 2 400 m~4 200 m。亚热带干热河谷稀树灌丛带在横断山区广泛出现, 主要分布在海拔 1 000 m~3 500 m 的范围内。在 28°~29°N 范围内干热河谷稀树灌丛带最为普遍, 此外, 区内几条大江的中下游地区也比较普遍。亚热带常绿硬叶灌木林/灌丛带, 主要分布于海拔 1 800 m~2 000 m 的范围内, 常见于夏季比较干燥的地区。寒温带阴暗针叶林带主要分布于横断山区北部地区, 海拔范围在 3 000 m~4 300 m 的范围内。

表 1 横断山区基带类型及其在东、西坡的分布范围
Table 1 Base types and their distribution extent in the Hengduan Mountains

基带类型	东坡	西坡	基带类型	东坡	西坡
亚热带季风常绿阔叶林带 SI01	2 200~3 000 m	1 100~2 200 m	亚热带干热河谷稀树灌丛带 SI06	800~3 200 m	1 000~3 400 m
亚热带常绿阔叶林带 SI02	600~2 800 m	1 200~2 700 m	亚热带常绿硬叶灌木林/灌丛带 SI07	2 700~2 900 m	1 780~1 980 m
亚热带常绿针叶林带 SI03	1 000~3 200 m	1 500~3 200 m	寒温带阴暗针叶林带 B01	——	2 900~4 300 m
亚热带常绿硬叶阔叶林带 SI04	——	2 400~4 200 m			

2. 垂直带类型: 横断山区垂直带类型复杂, 有 24 个之多, 往往东、西坡具有不同的基带或垂直带类型。各垂直带类型及其在东、西坡的分布范围如表 2 所示, 山地暗针叶林带是横断山区的特征带谱, 在绝大多数山地垂直带谱中均有出现。

山地垂直带谱的水平分异规律

1. 纬度方向的分异规律

西部(99°E 以西)山地垂直带的基带由亚热带季风常绿阔叶林或亚热带常绿阔叶林逐渐过渡到亚热带常绿针叶林、亚热带干热河谷稀树灌丛带、亚热带硬叶常绿灌木林(灌丛)带、寒温带阴暗针叶林带。带谱结构整体上来看由南向北由简单变复杂再变简单, 但差异不是太大, 南部和北部一般为 3~4 个带, 中部一般 4~5 个带。

中部(99°~101°E)的范围内, 山地垂直带谱的基带由亚热带季风常绿阔叶林带逐渐过渡为亚热带常绿阔叶林带、亚热带常绿针叶林带或亚热带常绿硬叶阔叶林带、亚热带常绿硬叶灌木林(灌丛)带、

亚热带干热河谷稀树灌丛带、亚热带常绿针叶林带、寒温带阴暗针叶林带。垂直带谱结构则是南部和北部简单, 一般也只有 2~3 个带; 中部复杂, 一般 5~7 个带, 在深切峡谷处有的带谱多达 8~9 个。

东部地区(101°E 以东)山地垂直带的基带自南向北也是由亚热带季风常绿阔叶林带逐渐过渡为亚热带常绿阔叶林带、亚热带常绿针叶林带、亚热带常绿硬叶灌木林(灌丛)带、亚热带干热河谷稀树灌丛带、寒温带阴暗针叶林带。垂直带谱结构也是中部复杂, 一般 6~7 个带; 南、北部简单, 一般 3~4 个带。

总的来看, 自南向北, 横断山区山地垂直带的纬度地带性分异规律明显, 基带自南部的亚热带季风常绿阔叶林带或亚热带常绿阔叶林带向中部的亚热带常绿针叶林带、亚热带干热河谷稀树灌丛带变化, 至北部基带为寒温带阴暗针叶林带。南部受海洋季风气候的影响明显, 阔叶林带是在带谱结构中占有绝对优势的地位; 北部受海洋季风气候的影响减弱

表 2 横断山区垂直带类型及其在东、西坡的分布范围
Table 2 Altitudinal belts and their distribution in the Hengduan Mountains

垂直带类型	东坡	西坡	垂直带类型	东坡	西坡
山地季风常绿阔叶林带 MF03	N25°以南的迎风坡, 1 300~1 900 m	——	亚高山/山顶寒温性矮曲林带 SK03	4 000~4 200 m	——
山地常绿阔叶林带 MF05	1 600~3 100 m	1 400~3 200 m	山地常绿硬叶灌木林带 MH01	3 700~4 000 m	3 700~4 000 m
山地半常绿阔叶林带带 MF06	1 900~2 800 m	——	亚高山/山顶常绿灌丛带 SH01	2 800~3 300 m	2 800~3 300 m
山地常绿硬叶阔叶林带 MF07	2 500~3 100 m	2 800~4 300 m	亚高山/山顶落叶灌丛带 SH02	——	3 680~4 280 m
山地常绿—落叶阔叶林带 MF08	1 600~2 400 m	——	亚高山/山顶灌丛草甸带 SM01	3 800~4 600 m	3 800~4 200 m
山地常绿阔叶—落叶阔叶—针叶混交林带 MF09	2 700~3 000 m	2 700~3 000 m	高山常绿草叶灌丛带 AH01	3 500~4 800 m	3 500~4 700 m
山地落叶阔叶林带 MF11	——	2 300~2 500 m	高山落叶灌丛带 AH02	3 500~4 100 m	3 500~4 700 m
山地针阔混交林带 MF12	1 600~3 300 m	2 000~3 500 m	高山灌丛草甸带 AM01	3 500~4 500 m	3 800~4 800 m
山地暖性常绿针叶林带 MF14	2 200~3 200 m	2 400~3 450 m	高山草甸带 AM03	3 700~4 600 m	3 500~4 900 m
山地温性针叶林带 MF15	2 500~3 6000 m	2 500~3 700 m	高寒荒漠带 AD01	4 200~5 000 m	——
山地明亮针叶林带 MF16	3 000~3 800 m	2 700~3 600 m	高山荒漠草原带 AS01	3 800~4 500 m	——
山地暗针叶林带 MF17	2 500~4 500 m	3 000~4 500 m	高山亚冰雪带 AN02	4 000~5 000 m	4 200~5 100 m
亚高山/山顶常绿苔藓矮曲林带 SK01	2 800~2 900 m	2 800~2 900 m	高山冰雪带 AN01	4 500 m以上	4 600 m以上

而大陆性气候逐渐加强, 针叶林带在带谱结构中占重要的位置; 中部除受季风气候的影响外, 在地形的作用下受焚风效应和山谷风的影响, 表现出干热的特点, 基带的水平地带性被破坏, 亚热带干热河谷稀树灌丛带比较普遍, 带谱结构变化也最为复杂。

2. 经度方向上的分异规律

横断山区山地垂直带谱的经向变化主要受水分条件和地形的影响, 并且横断山区南、北部具有不同的经向分异规律。南部(26°N以南), 带谱结构比较简单, 但西部带谱结构比东部的复杂, 一般西部有4~5个带, 但东部一般只有3~4个带, 且带谱结构越往南越简单。中部, 在27°~28°N一带自中部地区(99°E)向东、西两侧, 山地垂直带谱的结构由简单变得复杂。东坡山地垂直带谱由中部的2~3个带向东和向西变为4~5个带; 西坡的山地垂直带谱则由中部向西变为4~5个带, 向东变为4~7个带。在28°~29°N一带, 这一地区是横断山区的干热中心, 西南季风和东南季风在这一地带的影 响由于高大山体的阻挡逐渐减弱, 再加上焚风效应的影响, 这

一地区的基带基本上都是干热河谷稀树灌丛带, 西坡的带谱结构自中部(100°E)左右向东、西两侧变复杂, 由中部的3~4个带变为5~7个带; 东坡的带谱结构变化不明显, 但总体上是西部的带谱结构比东部的略简单, 一般西部是4~5个带, 而东部有5~7个带。

北部(29°N以北的地区), 山地垂直带谱的结构基本上呈自东向西变得简单的趋势。东部一般有6~7个带, 有的达9个带(如贡嘎山); 西部一般4~5个带。越往北部, 带谱结构越简单。

横断山区山地垂直带谱在经向上的变化规律可以总结为南部(26°N以南)自西向东由复杂变简单, 而北部(29°N以北)则自西向东由简单变复杂, 中部地区的垂直带谱则由横断山腹地(99°~100°E)向东西两侧逐渐变复杂。这种变化趋势与横断山区水分条件的变化规律极其吻合, 水分条件好的地方, 带谱结构复杂; 而水分条件差或干旱的地方, 带谱结构则相对简单。

3. 干热河谷的分布规律

干热河谷在横断山区分布极广, 从 $24^{\circ} \sim 32^{\circ} \text{N}$ 范围内都有分布, 但从垂直带谱的对比研究发现, 无论是东坡还是西坡, 在 $28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$ 范围内, 自西向东 ($98^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{E}$) 各个山地垂直带谱中几乎均出现干热河谷稀树灌丛带, 并且干热河谷带的幅宽都较大。因此, 分析认为, 横断山区 $28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$ $98^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{E}$ 范围内是该区域干热气候的核心地带。

山地垂直带谱的坡向变化规律

1. 基带的坡向变化特征

由于受海洋暖湿气流的强烈影响, 山地垂直带的分异随西南季风和东南季风的方位而变化, 主要体现在东、西坡的带谱类型和带谱结构的差异上。总体上来看, 28°N 以南地区山地, 东、西坡垂直带谱的分异规律表现为: 在 101°E 以西的山地, 西坡处于迎风坡, 湿润而多雨, 基带常为湿性的常绿阔叶林带 (如亚热带季风常绿阔叶林和亚热带常绿阔叶林); 而东坡为背风坡, 相对干燥, 基带常为相对干性的针叶林带 (如亚热带常绿针叶林带)。在 101°E 以东的山地, 受东南季风的影响较大, 东坡为迎风坡而西坡为背风坡, 则出现东坡基带相对西坡基带出现相对湿润的类型。

在 $28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$ 的范围内, 这一地区由于高大山体对季风的屏障作用与焚风效应的影响, 是横断山区的干旱中心, 表现为无论东、西坡, 基带几乎都为亚热带干热河谷稀树灌丛带; 但在 101°E 以西, 西坡的带谱结构比东坡复杂; 101°E 以东地区则东坡的带谱比西坡的复杂。

在 29°N 以北, 海洋暖湿气流的影响逐渐减弱, 大陆性植被分布特征逐渐加强, 东、西坡山地垂直带的差异逐渐减少, 至北部丘原地貌景观区, 坡向差异逐渐转换为南、北坡的垂直带分异。

东、西坡基带的高度均分布在 $1\,500 \sim 4\,500 \text{ m}$ 的范围内, 但西坡基带高度由南向北呈逐渐升高、由西向东表现出升高—降低—再升高的变化趋势, 并且在 100°E 左右基带高度最低, 仅 $1\,600 \text{ m}$ 左右; 东坡基带高度由南向北呈先升高再降低的趋势、由西向东呈逐渐降低的趋势, 并且在 30°N 附近, 基带高度最高, 达 $4\,300 \text{ m}$ 。西坡基带的宽度自西向东呈先升高—再降低—升高的变化趋势, 在 99°E 基带宽度最大 ($1\,700 \text{ m}$), 而在 100°E 左右基带宽度最窄 (500 m); 自南向北则呈一个开口向下的二次抛物线型式, 顶点在 28.5°N 附近 ($1\,700 \text{ m}$)。东坡基带宽度自西向东有先下降后上升的趋势, 在 100°E 左

右达最低 (600 m); 自南向北也呈先升高后降低的趋势, 在 30°N 附近发生转折。从上述分析来看, 东、西坡基带高度和宽度发生显著变化的地区主要在澜沧江以东、金沙江以西的山地, 即芒康山一带。

2. 主要垂直带和带谱结构的坡向变化特征

横断山区东、西坡的带谱结构也有明显差异, 首先, 出现在东坡的垂直带类型比西坡的丰富。其次, 除特征带暗针叶林带外, 东坡的垂直带谱中山地针阔混交林带和高山常绿革叶灌丛带也较常出现; 西坡的带谱中山地常绿阔叶林带、山地落叶阔叶林带、高山常绿革叶灌丛带、高山灌丛草甸带也在多个山地的垂直带谱中出现。另外, 垂直带谱结构在东、西坡方向上也有较大差异, 东坡尤其是金沙江以东的山地垂直带带谱结构最为复杂, 一般有 $7 \sim 9$ 个带; 西坡的垂直带谱结构则相对较为简单, 一般为 $5 \sim 7$ 个带。同一类型的垂直带, 一般在东坡的分布高度要高于西坡, 但在金沙江以东的山地, 则在西坡的分布高度要高于东坡。

3. 特征带山地暗针叶林带在不同坡向上的变化特征

山地暗针叶林带无论在西坡还是东坡都广泛出现, 是横断山区的特征垂直带。暗针叶林的分布范围西坡较东坡海拔要高, 西坡主要分布在 $3\,000 \sim 4\,500 \text{ m}$ 的范围内; 东坡主要分布在 $2\,500 \sim 4\,500 \text{ m}$ 的范围内, 有些山地 $2\,000 \text{ m}$ 左右就有暗针叶林分布。东、西坡暗针叶林上限高度在经向和纬向上的变化规律大致相同, 经向上都自西向东有先下降后上升的趋势, 在 100°E 左右为上限海拔最低的区域; 纬向上都自南向北上限高度逐渐升高再降低的趋势, 大约在 30°N 附近上限高度最高。

4. 林线高度的坡向变化规律

以 28°N 附近的山地垂直带谱为例, 金沙江以西, 西坡林线高度要低于东坡的林线高度; 金沙江以东, 西坡林线高度要高于东坡的。

从上述分析来看, 横断山区山地垂直带谱表现出明显的基于水分驱动的坡向效应特征, 主要表现在基带、带谱结构和组成的变化与水分条件的变化一致: 迎风坡基带类型、带谱组成表现出更湿润的特点, 带谱结构也比背风坡复杂; 东、西坡带谱结构和类型在经向上的变化特征也与水分条件的分布规律一致, 即自东、西两侧向中部带谱结构由复杂变简单、带谱类型由湿润变干旱。一直以来, 许多研究者都认识到坡向效应对山地垂直带的影响, 也进行了

很多相关的探讨,但如何定量的评价和研究山地垂直带谱的山地效应还没有成熟的方法,也未见有公开的报道。

2 山地垂直带谱的空间分布模式

由于复杂的地形和气候条件,横断山区的山地垂直带谱的分布规律也极其复杂,是整个欧亚大陆垂直带谱最难总结和最难分析的地区。那么,本区的山地垂直带谱变化是否也遵循一定的水平地带性分布规律?它们的空间分布模式又是如何?为了进一步揭示横断山区山地垂直带的分布规律,本文对横断山区重要的垂直带和垂直带界限的空间分布模式进行了系统的总结。

林线的空间分布模式

分别对东、西坡的林线数据进行二次曲线拟合分析。纬度方向上,东、西坡林线与纬度都具有很好的空间相关性,并且它们的分布模式相似,都可以用开口向下的二次曲线模式来模拟(图2)即都表现出自南向北林线高度先升高然后降低的趋势,但东、西坡林线高度最高值的分布区域却不相同,东坡约在 $30^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 的范围内达到最高,然后林线随纬度升高而下降;西坡林线则在 $31^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 的范围内达到最高,其后随纬度升高而降低。

在分析林线沿经度方向的空间分布模式时,为了避免纬度的影响,选择 $28^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$ 范围内的林线数据进行分析。分析结果表明,东、西坡林线的空间分布模式也非常相似,无论东坡还是西坡,林线均呈

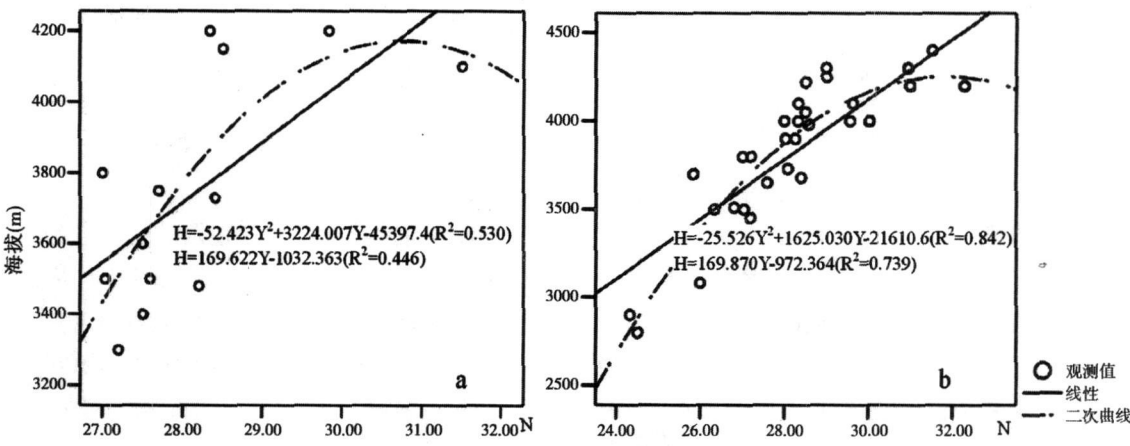


图2 横断山区东、西坡林线高度的纬向分布模式(a 东坡 $98^{\circ}\sim 99^{\circ}\text{E}$;b 西坡)
Fig. 2 Latitudinal patterns of forest line for east slope and west slope of mountains in the Hengduan Mountains (a: east slope, b: west slope at $98^{\circ}\sim 99^{\circ}\text{E}$)

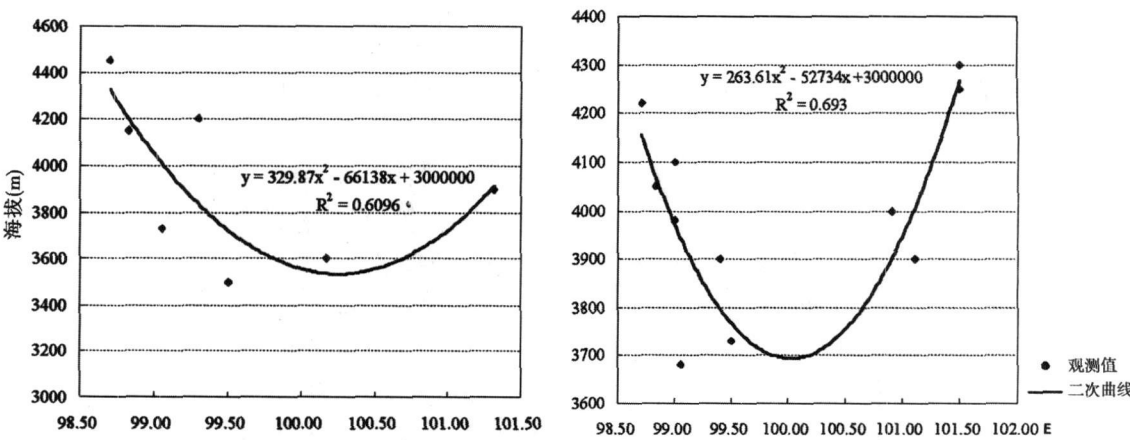


图3 横断山区东、西坡林线高度的经向分布模式(左:东坡;右:西坡)
Fig. 3 Longitudinal patterns of forest line for east slope and west slope of mountains in the Hengduan Mountains (Left: east slope; Right: west slope)

自西向东先下降、后上升的趋势, 在 $99.5^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{E}$ 的范围内林线最低 (图 3)。

山地暗针叶林带的空间分布模式

山地暗针叶林带是横断山区的特征垂直带, 它的空间分布特征在很大程度上能反映区域内山地垂直带的分布特征。本文分别对横断山区东、西坡山地暗针叶林带数据进行二次曲线拟合分析。从分析来看, 横断山区的特征垂直带山地暗针叶林带的分布与纬度有密切的关系, 其上限高度有自南向北逐渐升高然后又降低的趋势, 东坡暗针叶林带大概在 30°N 左右达到最高点; 西坡则在 32°N 左右达到最高点。横断山区暗针叶林带的空间分布模式与林线

的分布模式极其相似 (图 4)。

暗针叶林带在经向上的变化同林线的经向分布模式极为相似, 仍然以 $28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$ 范围内的暗针叶林来进行分析, 东、西坡暗针叶林也均呈开口向上的二次曲线模式, 即也呈先下降后上升的变化趋势, 在 $99.5^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{E}$ 的范围内暗针叶林带的上限分布范围最低 (图 5)。

雪线的空间分布模式

根据收集到的横断山区 9 个雪线数据的空间回归拟合分析来看, 横断山区的雪线与纬度的分布关系也很密切, 也呈开口向下的二次曲线空间分布模式 ($R^2=0.879$), 雪线的最高值大约出现在 30°N 附

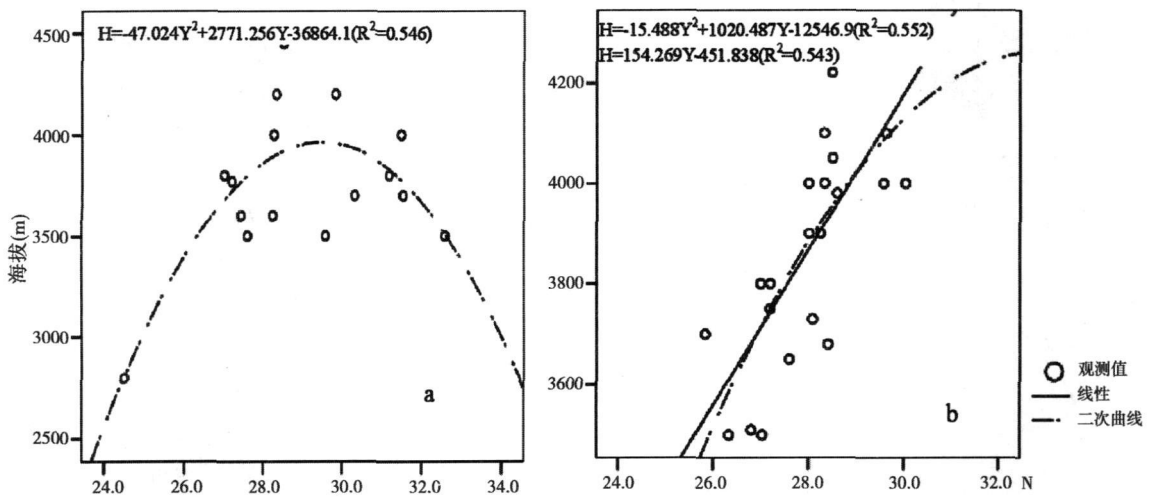


图 4 横断山区东、西坡暗针叶林带上限的纬度分布模式 (a 东坡; b 西坡)

Fig. 4 Latitudinal patterns of Dark-coniferous forest for east slope and west slope of mountains in the Hengduan Mountains (a: east slope of mountains; b: west slope of mountains)

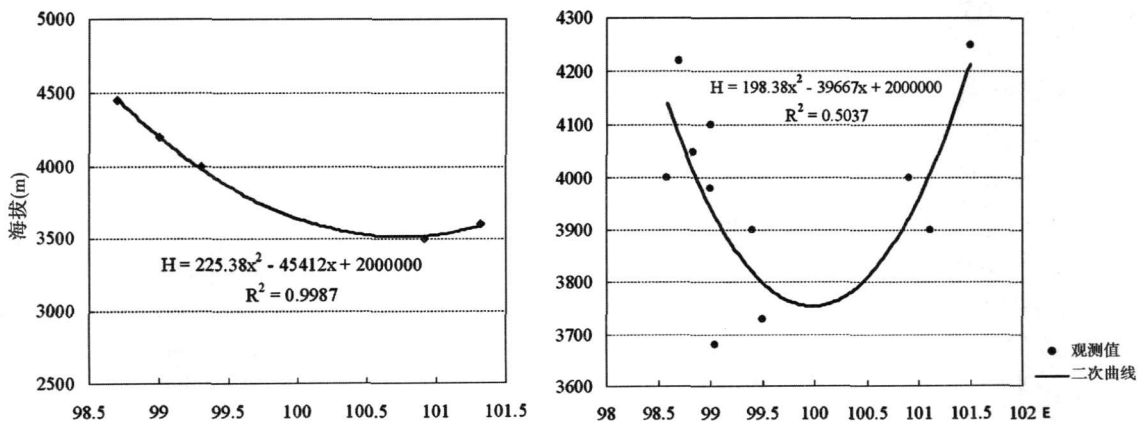


图 5 横断山区东、西坡暗针叶林带上限的经度分布模式 (左: 东坡; 右: 西坡)

Fig. 5 Longitudinal patterns of Dark-coniferous forest for east slope and west slope of mountains in the Hengduan Mountains (Left: east slope; Right: west slope)

近, 向南向北雪线高度都逐渐降低, 这与本区地势分布及雪线的实际情况是相符合的(图6)。同样的, 由于同纬度的经向方向的雪线数据不足, 雪线沿经度方向的分布模式目前还无法进一步分析。

从上述分析来看, 横断山区重要的垂直带和垂直带界限的纬度、经度地带性分布规律明显并且沿纬度、经度方向上的分布模式相似, 纬度上自南向北均呈开口向下的二次曲线分布模式(见图2图4图6); 而经向上呈开口向下的二次曲线分布模式, 在 $99.5^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{E}$ 的范围内达到最低, 这个区域大概为澜沧江以东、金沙江以西的地带(见图3图5)。由于南北走向高大山岭的层层阻挡, 无论是西南季风、还是东南季风都很难到达这一区域, 以此为中心, 降水从东、西两侧向中心逐渐降低, 因而山地垂直带的重要分布界线在经向上分布高度也表现出自从东、西两侧向中心逐渐降低的特点。

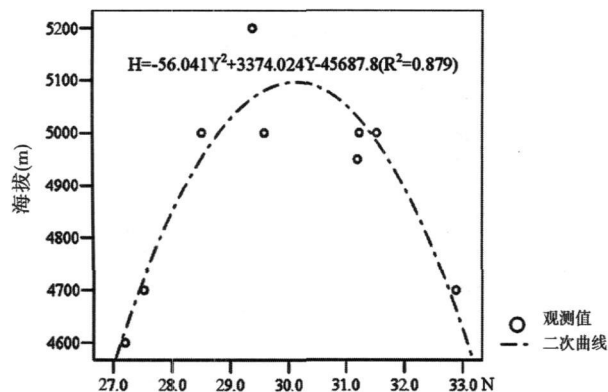


图6 横断山区雪线的纬度分布模式

Figure 6 Latitudinal Patterns of snow line in the Hengduan Mountains

3 结论与讨论

从上述研究来看, 本文可以得出如下结论:

1. 主要的垂直带及其界线(如林线、暗针叶林带、雪线等)纬向上呈现自南向北呈开口向下的二次曲线分布模式, 经向上则表现为开口向上的二次曲线分布模式。这种模式可以称之为“双曲抛物面”模式, 充分反映了横断山区的环境和生态的复杂性和独特性。本区的山地垂直带是整个欧亚大陆中变化最大、最复杂的, 其纬向和经向的分布模式进一步地验证了山地垂直带的二次曲线假说^[21-24]。从横断山区山地垂直带谱的分布规律来看, 横断山区澜沧江以东—雅砻江以西($28^{\circ} \sim 29^{\circ} \text{N}$ $98^{\circ} \sim 101^{\circ} \text{E}$)是该区域干热核心地带。这一区域由于南

北走向高大山岭的层层阻挡, 无论是西南季风还是东南季风都很难到达。

2. 山地垂直带谱表现出明显的基于水分变化的坡向效应。同一山体的东、西坡往往具有不同的基带、带谱结构和组成; 相同类型的带谱出现的海拔和分布范围不同; 迎风坡表现出较为湿润的类型和带谱结构, 而背风坡则表现出更为干旱的类型和组成结构。横断山南北走向的特殊地形对西南海洋季风和东南海洋季风产生层层阻挡, 造成迎风坡和背风坡水热条件相差很大, 从而发育不同的山地垂直带谱类型。但如何定量分析山地的坡向效应将在以后的研究工作中进一步的分析和讨论。

3. 经向上横断山区垂直带界线在中心区域降低并由此形成的“双曲抛物面”分布模式, 是本文的重要结论。但其机理需要进一步探讨, 因为, 通常认为向中心地带山体阻隔、水分减少, 垂直带界线应该上升, 而不是下降。而且这种分布模式需要提出更精确和统一的表达方式。

4. 数据质量与误差对分析结果有影响。虽然本研究中收集到横断山区 109 个完整垂直带谱数据, 但位置明确的可以使用的只有 70 余个。而且, 这些数据并不是均匀分布在整个研究区域, 有些区域还是空白或缺乏有效的山地垂直带谱数据。另外, 这些数据大多数是从文献中收集整理来的, 有些带谱数据虽然指明是哪个山, 但并没有明确标出这个带谱获取的经纬度位置, 所以只能用这个山体的中心位置或最接近文献描述的经纬度位置来表示, 这样就会影响经向和纬向分布模式的结果; 最后, 目前垂直带谱数据的记录精度都很低(100 m级), 而且都为离散的数据, 缺乏高精度的、连续的带谱数据来进行数学模型模拟。因此, 进一步发展和完善利用遥感和 GIS 技术提取连续的、多方位的带谱数据也是非常重要的^[25]。

参考文献 (References)

- [1] Li Wenhua, Lin Yunfa, Hu Rong. The distribution of forest vegetation in Hengduan Mountain in relation to the hydrothermal conditions. In: The Research of Tibet. Survey report of Hengduan Mountains. Q. Kuiming. Yunnan Peoples Press, 1983. 李文华, 冷允法, 胡涌. 云南横断山区森林植被分布与水热因子相关的定量研究. 见: 青藏高原研究——横断山考察专集(一). Q. 昆明: 云南人民出版社, 1983.
- [2] Zheng Yuanchang, Gao Shengshuai, Chai Zongxin. A preliminary study on the vertical natural zones in the Hengduan Mountains region. J. Journal of Mountain Science, 1986, 4(1): 75 ~ 83. 郑远昌, 高生

- 准, 柴宗新. 试论横断地区自然垂直带 [J]. 山地研究 (现山地学报) 1986 4(1): 75~83]
- [3] Liu Lunhui Yu Youde Zhang Jianhua Discussion upon the regularities of vegetational distribution in the Hengduan Mountains [J]. Acta Botanica Yunnanica 1985 7(3): 323~325[刘伦辉, 余有德, 张建华, 横断山区植被分布规律探讨 [J]. 云南植物研究, 1985 7(3): 323~325]
 - [4] Tan Jing Digital integration and analysis of Mountain altitudinal belt spectra in the Eurasian Continent [D]. Beijing Graduate University of Chinese Academy of Sciences 2009 [谭靖. 欧亚大陆山地垂直带谱数字集成与分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院博士论文, 2009]
 - [5] Hou Xueyu Characteristics of vegetation altitudinal belt spectra of China [A]. In: Botanical Society of China The Collection of the 30th Annual Symposium of Botanical Society of China [C]. 1963[侯学煜. 论中国各植被垂直带谱的特征 [A]: 见: 中国植物学会 30周年年会论文摘要汇编 [C]. 中国植物学会, 1963]
 - [6] Hou Xueyu China Vegetation Geography and Dominant Plant Components [M]. Beijing: Science Press 1982[侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分 [M]. 北京: 科学出版社, 1982]
 - [7] Jiang Hanqiao Distributional features and zonal regularity of vegetation in Yunnan [J]. Acta Botanica Yunnanica 1980 2(1): 22~32[姜汉侨. 云南植被分布的特点及其地带规律性 [J]. 云南植物研究, 1980 2(1): 22~32]
 - [8] Jiang Hanqiao Distributional features and zonal regularity of vegetation in Yunnan [J]. Acta Botanica Yunnanica 1980 2(2): 142~151[姜汉侨. 云南植被分布的特点及其地带规律性 (续) [J]. 云南植物研究, 1980 2(2): 142~151]
 - [9] Li Changyu The natural vertical zones on the east slope of Mt Emei in Sichuan [J]. Journal of Mountain Science 1990 8(1): 39~44 [黎昌谷. 峨眉山东坡垂直自然带 [J]. 山地研究 (现山地学报), 1990 8(1): 39~44]
 - [10] Liu Lunhui Yu Youde Zhang Jianhua The division of vertical vegetation zone in Hengduan Mountains based on the analysis of vegetation at 28° N of Jinsha River [J]. Laboratory of Ecology Kunming Branch of Chinese Academy of Science 1983 [刘伦辉, 余有德, 张建华. 从金沙江北纬 28 度半附近植被的分析兼谈横断山区自然垂直带的划分 [J]. 中国科学院昆明生态研究室, 1983]
 - [11] Liu Lunhui Yu Youde Zhang Jianhua The division of vertical vegetation zone in Hengduan Mountains [J]. Acta Botanica Yunnanica 1984 6(2): 205~216[刘伦辉, 余有德, 张建华. 横断山自然植被垂直带的划分 [J]. 云南植物研究, 1984 6(2): 205~216]
 - [12] Qian Chongpeng Wu Chenyi Chen Changdu The vegetation types of China [J]. Acta Geographica Sinica 1956 22(1): 37~92[钱崇澍, 吴徵镒, 陈昌笃. 中国的植被类型 [J]. 地理学报, 1956 22(1): 37~92]
 - [13] Department of Biology of Yunnan University Survey report of Mt Yulong in Lijiang [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 1957 4: 19~23[云南大学生物系, 丽江玉龙山植被考察专辑 [J]. 云南大学学报 (自然科学), 1957 4: 19~23]
 - [14] Yunnan agricultural geography writing group Agricultural Geography of Yunnan Province [M]. Kunming: Yunnan People Press 1980 [云南农业地理编写组. 云南农业地理 [M]. 昆明: 云南人民出版社, 1980]
 - [15] Geography Institute of Chendai CAS Geography of Mt Gongga [M]. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Document Press 1983[中国科学院成都地理研究所. 贡嘎山地理考察 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983]
 - [16] Institute of Geography CAS Integrated Physicogeographical regionalization and mountain altitudinal belts in the Hengduan Mountains the western north of Yunnan [R]. In: Annual report in 1981 of the Integrated Survey Group of Tibet CAS 1982[中国科学院地理研究所. 滇西北横断山地区的垂直自然带、横断山地区综合自然区划 [R]. 中国科学院青藏高原综合考察队自然地理专业一九八一年年度报告, 1982]
 - [17] Investigating group for South-to-North Water Transfer Project Forest in the West of Sichuan and in the North of Yunnan [M]. Beijing: Science Press 1966[中国科学院南水北调考察队. 川西滇北地区的森林 [M]. 北京: 科学出版社, 1966]
 - [18] Investigating group for South-to-North Water Transfer Project Survey Report of Vegetation in Hengduan Mountains in the Northwest of Yunnan [R]. Reprinted by Yunnan University 1980 [中国科学院南水北调考察队. 滇西北横断山区植被踏查报告 [R]. 云南大学翻印, 1980]
 - [19] Integrated Survey Group of Tibet CAS Xizang Forest [M]. Beijing: Science Press 1985[中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏森林 [M]. 北京: 科学出版社, 1985]
 - [20] Zhong Xianhao Zheng Yuanchang A preliminary study on the natural vertical zonation in the middle part of the eastern periphery of Qinghai-Xizang Plateau [A]. In: The Research of Tibet—Survey report of Hengduan Mountains [C]. Kunming: Yunnan Peoples Press 1983 [钟祥浩, 郑远昌, 青藏高原东缘中段地区自然垂直带的初步研究 [A]: 见: 青藏高原研究——横断山考察专集 (一) [C]. 昆明: 云南人民出版社, 1983]
 - [21] Bai Ping Z, Hongzhi W., Fei X., Al E. Integration of data on Chinese mountains into a digital altitudinal belt system [J]. Mountain Research and Development 2006 26(2): 163~171]
 - [22] Zhang Bai ping Progress in the study on digital mountain altitudinal belts [J]. Journal of Mountain Science 2008 26(1): 12~14[张百平. 数字山地垂直带谱研究进展 [J]. 山地学报, 2008 26(1): 12~14]
 - [23] Zhang Bai ping Xu Juan Wu Hongzhi et al Digital integration and pattern analysis of mountain altitudinal belts in China [J]. Journal of Mountain Science 2006 24(2): 144~149[张百平, 许娟, 武红智, 等. 中国山地垂直带的数字集成与基本规律分析 [J]. 山地学报, 2006 24(2): 144~149]
 - [24] The Geoinfo spectrum of mountain altitudinal belts in China [J]. Acta Geographica Sinica 2003 58(2): 163~171[张百平, 周成虎, 陈述彭. 中国山地垂直带信息图谱的探讨 [J]. 地理学报, 2003 58(2): 163~171]
 - [25] Sun Ranhao Zhang Bai ping Xiao Fei et al Exploring the meth-

of digital identification of mountain altitudinal belts [J]. Journal
of Remote Sensing, 2008, 12(2): 305~311 [孙然好, 张百平,

肖飞, 等. 山地垂直带谱的数字识别方法探讨 [J]. 遥感学报,
2008, 12(2): 305~311]

Spatial Pattern and Exposure Effect of Altitudinal Belts in the Hengduan Mountains

YAO Yonghui, ZHANG Baiping, HAN Fang, PANG Yu

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper analyses the exposure effects and spatial pattern of altitudinal belts in the Hengduan Mountains based on nearly 80 spectra of altitudinal belts in the study region. The result shows that: 1) The main altitudinal belt lines, such as forest line, the upper limit of dark coniferous forest and snow line, have similar latitudinal and longitudinal spatial patterns, namely, arched quadratic curve as with changing latitudes and concave quadratic curve along longitudinal direction. This pattern can be called "Hyperbolic paraboloid model", revealing the environmental and ecological complexity and speciality of the study region. This result further validates the hypothesis of the quadratic model for the spatial pattern of mountain altitudinal belts. The spatial pattern of altitudinal belt limits also clearly shows that the region between the Lancang River and the Yalong River (28° — 29° N and 98° — 101° E) is the drought and hot core of the study region. 2) The spatial pattern of altitudinal belt spectra is closely related with moisture-related exposure effect in the Hengduan Mountains. Different combination (spectra) of altitudinal belts and different base belt types appear in windward and leeward flanks and even in the same flanks of different ranges. This is closely related with the parallel mountain ranges of the Hengduan Mountains, which at nearly right angle with the moving direction of prevailing moisture-laden air masses from west and east, hold up the warm and wet monsoon wind from moving into the core region and result in different moisture condition in windward and leeward flanks. However, how to quantitatively describe the moisture-related exposure effect needs in-depth study. In addition, data quality and data accuracy at present also affect the result of quantitative modeling and should be improved with RS/GIS in the future.

Key words: Hengduan Mountains; altitudinal belt spectra; exposure effect; quadratic model