

山地景观垂直分异研究进展*

孙然好¹ 陈利顶^{1**} 张百平² 傅伯杰¹

(¹中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085; ²中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要 山地景观的垂直梯度大约是水平梯度的 1000 倍,仅利用景观格局指数很难反映垂直梯度上的规律性.山地垂直带是表征景观垂直分异的经典地学模型,在地理学和生态学研究中具有不可忽视的地位,但表达模式的离散性、垂直带界线的不准确性等限制了其在准确描述局域尺度景观格局、解释生态过程方面的作用.本文总结了有关山地垂直带的国内外研究现状和存在的问题,提出利用现代信息技术建立全方位的、连续的“山地景观信息图谱”,同时论述了构建山地景观信息图谱的思路、进展和展望,对于准确描述山地景观格局并解释特定的生态过程等具有一定的参考价值,有望促进山地生态学研究方法的进一步完善.

关键词 景观格局 垂直带 垂直分异 数字识别

文章编号 1001-9332(2009)07-1617-08 **中图分类号** Q149 **文献标识码** A

Vertical zonation of mountain landscape: A review. SUN Ran-hao¹, CHEN Li-ding¹, ZHANG Bai-ping², FU Bo-jie¹ (¹State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2009, 20(7): 1617-1624.

Abstract: Vertical gradient of mountain landscape is about 1000 times of its horizontal gradient, and hence, only using landscape pattern index is quite difficult to reflect the landscape regularity along vertical gradient. Mountain altitudinal belt is a kind of classic geographic models representing the vertical differentiation of landscape, being of significance in geographic and ecological researches. However, the discrete expression pattern and the inaccuracy of the borderlines of mountain vertical belts limit the roles of mountain vertical belt in accurately describing landscape pattern in regional scale and in explaining ecological processes. This paper reviewed the research progress and existing problems on mountain altitudinal belt, put forward a suggestion of using modern information technology to establish a comprehensive and continuous mountain landscape information chart, and discussed the framework and prospect of the establishment of the chart, which would have reference value for accurately describing mountain landscape pattern and explaining specific ecological processes, and promote the further improvement of the methodology for mountain ecological research.

Key words: landscape pattern; altitudinal belt; vertical differentiation; digital identification

山地具有浓缩的环境梯度、高度异质化的生境以及相对较低的人类干扰强度,是景观多样性和生物多样性的集聚地,蕴涵了极为丰富的生态和地理信息,同时,山地也是贫困地区、脆弱地区和环境变化敏感区的代名词,对维护区域和全球生态安全及可持续发展具有重要的战略意义^[1-2].山地景观垂直变化梯度较大,大约是水平变异梯度的 1000

倍^[3],短短数千米的山地垂直距离甚至能涵盖从赤道到极地的各种植被类型,堪称水平地带性规律的“缩微模型”^[4],如果再考虑坡向、坡度、地质结构与地面物质组成的差异,山地环境的复杂性和异质性给科学研究带来了严峻挑战.应对这种挑战是山地科学的核心任务.山地景观的垂直梯度变化对人类生产、生活具有重要影响,相关研究涉及多个方面,如山地垂直梯度的季节利用模式^[5]、气候变化及人类干扰引起的垂直景观动态及其对人类的影响等^[6].因此,研究山地景观垂直格局对于推动地学

*城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-1-02)和国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421104)资助.

**通讯作者. E-mail: liding@rcees.ac.cn

2008-11-21收稿,2009-04-28接受.

和生态学的基础理论,指导山地生态建设具有很强的现实意义^[7]。

分析山地景观格局可从看似无序的景观要素镶嵌中发现潜在的、有意义的规律,并确定产生和控制空间格局的因子和机制^[8]。在局域山地尺度,景观格局分析通常借助各种格局指数的设计和分析来实现,该方面研究多集中于景观格局几何特征的分析 and 描述,较少考虑不同景观类型空间分布的影响,忽略了对景观格局意义或内涵的理解,因此,这种仅依靠几何特征及其数量关系计算出来的指数往往无法真正反映格局的生态效应,有时甚至存在误用和滥用的问题^[9]。除此之外,景观格局分析与尺度转换的信息完备性没有得到重视,而水平方向和垂直方向上景观信息的完整性表达对于格局分析和尺度转换尤为重要。水平空间格局是地表景观信息表达的一个方面,三维地表在地面投影形成的地图是最重要的载体。这种传统的二维地图表达模式能够较好地表达水平空间上的格局和规律,而对于山区或其他地形起伏较大的区域,直接使用地图或来自地图的景观格局指数,将导致地表景观信息表达的残缺和不完整^[10-12]。

山地景观区别于二维平面景观的最大特征是其第三维(即垂直梯度)属性。垂直地带性分异是导致山区景观格局变化的驱动力。在传统的自然地理学和生态学研究,山地垂直带的认识和归纳不仅是重要的研究内容,也是重要的思路和方法,为人们认识山地复杂的环境提供了经典的手段和框架,是理解山地景观垂直分异的重要途径。山地垂直带研究有着悠久的历史,本文重点综述了以植被为代表的山地垂直带规律、山地景观格局的研究现状和存在的问题,以及最新的研究进展和可能的发展方向,旨在为山地垂直带规律与局域尺度山地景观格局分析的结合提供参考。

1 山地景观垂直分异的研究进展

由于山地的重要性,人类关于山地生态和地理的研究源远流长。近代山地生态研究与近代生态学和自然地理学的诞生几乎同步,1799—1803年,Humbolt在南美 Andes 山脉对植被垂直分布的考察、不同海拔高度温度的测定以及温度与植被分布关系的研究中,开辟了近代山地生态研究的先河,并对后来的宏观生态学和自然地理学的形成产生了深远影响^[7]。中世纪以前,山地垂直带谱的研究伴随着人类认识世界开始萌芽,15—17世纪的地理大

发现极大激发了人们对山地及垂直带现象的研究兴趣,到19、20世纪才真正出现了理性的科学定义及系统的研究方法。系统开展山地生态学研究大致始于20世纪60年代,标志之一是国际地理学联合会于1968年成立了山地生态学委员会。1981年,国际山地学会(International Mountain Society, MS)正式成立,并创办了山地研究的学术刊物《Mountain Research and Development》。1992年,在巴西里约热内卢召开的环境与发展世界首脑峰会上通过了《21世纪议程》,其中的专门一章讨论了山区的可持续发展问题。之后,联合国将2002年定为国际山地年,进一步引起了国际社会对山地问题的关注。

山地景观随着海拔高度变化是所有学者的共识^[13],但这种变化是渐变还是突变,一度是争议的焦点。有些研究者认为植被随着海拔高度递变,它们是一个连续体^[14-15],不论是在温带山地^[16],还是水热丰富的热带山地^[17-19];而另一些学者则认为存在许多临界高度,植被在此出现分带现象,并且对不同的垂直带进行研究^[20-24],偶尔也对整个植被区系进行垂直带划分^[20,23,25]。垂直带地学/生态学研究的不发展为这些问题的验证提供了有效手段,普遍认为,山地景观最明显的特征是:随海拔增高,山地气候、植被、土壤及整个自然地理综合体都发生明显的垂直分异,自下而上形成多种有相互联系的气候带、植被带、土壤带,特别是具有一定排列顺序和结构的、以植被为主要标志的垂直自然带^[26-27]。山地垂直分带的研究既体现在对山地景观垂直分异规律的描述^[18,28-29],也包括对其界线的控制因子和形成机理的探讨方面^[22,23,30-35]。近年来,山地垂直分异规律在生物多样性、生态系统服务、植被恢复和重建等方面也有较多的探讨和应用^[36-38]。

20世纪以来,随着全球变化研究的不断深入,人们认识到山地垂直带界限对气候变化特别敏感,能够比周围低地较早地反映气候变化,是气候变化早期预警系统,甚至是气候变化的信号“放大器”^[6]。之后,许多学者逐渐开始在全球尺度上对主要山地的垂直空间格局进行对比,特别是对雪线及森林上下限的全球比较^[3,5,13]。在高山生态系统中,气候变化影响植物群落的物种组成和多样性,从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的比较敏感,如在阿尔卑斯山脉和北美山区的垂直带界线上移^[39-40]、极地林线植物生长发生变化^[41]、高山林线发生上升^[42]以及我国长白山地区的落叶松(*Larix gmelinii*)、白

桦 (*Betula platyphylla*) 沼泽生态交错带^[43]和大兴安岭的兴安落叶松与蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 等交替演进趋势^[44]、五台山植被带界线的上升^[45]等,都反映了山地植被带对气候变化的敏感响应。同时,气候变化常伴随着强烈的人类活动干扰及非气候因子的影响,如二氧化碳的增肥效应、大气氮沉降等,这些变化在某种程度上可能会掩盖气候变化的影响,多因子作用下植物的响应方式和变化方向将更加复杂。这是今后需要继续关注 and 深入研究的领域。

中国是一个多山的国家,山地面积约占国土面积的 66.4%,山地垂直带现象丰富而多样,为地理学研究提供了广阔的舞台,近代中国学者对地域分异及垂直带规律的研究做出了独创性的贡献。20世纪 60 年代以来,我国学者开始注重研究垂直带与水平带的关系,概括出中国湿润森林地区和干旱草原荒漠地区 2 种垂直带区域变化模式^[46],并对垂直带空间分布规律、模式和结构进行了探讨^[26-27,47],与相邻学科的综合也不断加强,甚至出现了“山地气候垂直带谱”的研究^[48]。

山地垂直带模式的研究始于垂直带谱的区域列举,包括分区列举和全国系统列举,由于不同阶段所掌握资料的详细程度不同,出现了不同的归纳体系,包括对重要垂直带界线(雪线、林线等)的经向、纬向变化进行归纳^[49]。郑度^[50]进行了垂直带空间规律的图形组合与归纳,对区域垂直带的分布及空间关系有了更直观的认识。山地垂直带谱的结构分类是基于区域列举的进一步工作,主要尝试从带谱的功能、结构方面进行划分和归纳,包括欧亚大陆温带山地垂直带谱的结构分类^[46]、青藏高原垂直带谱的 2 个体系、9 个结构类型组及图形模式^[50]、青藏高原垂直带谱的 2 个系统、12 个结构类型组、19 个结构类型^[51]以及中国山地垂直带谱的 2 个体系、7 个结构类型组、18 个结构类型^[52]。上述分类的共同特点是先分为大陆性和季风性 2 个体系,再根据湿润程度分出结构类型组,最后以基带划分结构类型。随着野外作业的增加,山地垂直带的空间表达逐渐从一种类型(单个山体)到多个类型组合,再到整个山体的连续表达,并开始根据基带、优势带、特征带、垂直带组合垂直带谱进行结构分类^[52]。从南迦巴瓦地区 9 个垂直带组成的极端复杂的带谱结构^[53]到青藏高原极干旱地区以高寒荒漠为基带直接衔接亚冰雪带的极端简单的带谱类型^[54],从基本带谱到人类活动产生的扰动带谱和次生带谱^[55],为研究山地垂直带提供了极为广阔的空间和丰富的内容。张百平

等^[55]综合前人的研究,将整个中国大陆范围确定为 31 个水平自然带(基带)、32 个山地垂直带,建立了统一的垂直带谱体系,归纳出垂直带谱的 3 个层次、5 种生态类型,将垂直带谱系列根据地域关系及带谱变化的幅度区分出 7 种类型,并开发了“中国山地垂直带谱信息系统”^[56-57]。

20 世纪 80 年代以来,受全球气候变化研究的影响,我国学者在重要山地垂直带界线(包括林线、雪线等)的机理方面进行了探讨^[58-62],并构建了不同形式的垂直带界线的数学模型^[63-67]。中国山地垂直分异规律研究具有自己的特色,尤其是对全国和区域尺度的规律总结和模式归纳方面,提出了不同的数学模式和统计模型,而国外则多侧重于山体尺度的垂直带界线影响因素和形成机理方面的研究。

2 山地垂直带研究的特点及存在的问题

2.1 资料来源

传统垂直带资料以单个点来表示整个山体(系),离散性的特点影响了其机理研究的深入。带谱界限的精度多在百米级别,模糊性的特点直接影响对带谱进行定量研究。带谱资料多来源于野外考察或其他资料判读,缺乏时效性。

2.2 研究对象

研究工作一般只涉及某一个或少数几个垂直带界线(林线、雪线)的分布规律及地学/生态学解释,缺乏对整个带谱的全面分析。“带、线”研究多,“谱”研究少。

2.3 研究尺度

地学规律具有尺度性,而且控制因素也各异。但由于资料残缺,山地垂直带研究多局限在大陆尺度上,研究尺度比较单一,很多巨大山系仅用一个垂直带谱来代表,区域和局域尺度上的规律基本上未能涉及,从而掩盖了中小尺度上垂直带的变化规律。而这些局地规律往往是当地山地利用模式的控制因素,对山地可持续发展和生态建设极为重要。

2.4 控制因素

垂直带界线及带谱的解释基本上仍限于气候指标及其选择,即“水热控制”方法。在区域和局域尺度上,目前还没有考虑山体走向、地形、风甚至树种的生态适应性等山地环境因子的影响。

3 山地景观垂直分异的研究展望

3.1 发展具有生态学意义的景观格局分析方法

景观格局分析的目的不是简单的描述规律,而

是理解和解释其中存在的生态过程和现象,同时还应考虑到生态过程的尺度效应。因此,如何建立具有生态学意义的景观格局指数,或挖掘现有景观格局指数的含义,已成为目前景观生态学工作者面临的突出问题之一。这方面已经有了一些理论思考和方法探讨,如“从静态格局分析到动态格局刻画”、“多种景观格局指数的联合使用”、“发展基于过程的景观格局指数”、“多维景观格局分析”和“多尺度景观格局分析”等^[9,68],目前这些方法还处在探索阶段,进一步实践和推广还需要很多的工作。相对比较成功的是“源-汇”景观理论的提出和应用,它考虑了不同景观类型对生态过程的影响(权重),建立的景观格局评价指数具有一定的生态学意义,如陈利顶等^[69-70]建立的“景观空间负荷对比指数”在非点源污染与土壤侵蚀等方面已经表现出了相当大的应用价值。因此,发展具有生态学意义的景观格局分析方法是解决现有静态格局指数问题的重要途径之一。

3.2 建立山地景观的图谱分析方法

现代信息技术的发展使遥感影像和高分辨率地形图的获取越来越方便,据此进行景观信息的识别和格局分析逐渐得到重视,如基于模式识别的景观格局与尺度研究等^[9]。但是,遥感影像图和专题地图都仅反映了平面二维的信息,在地形复杂的山区,大量的垂直变化、随坡向变化的信息无法得到充分展示,特别是不能得到连续的显示和分析;而GIS技术由于被限定在点、线、面的框架内,对山区的复杂变化也显得力不从心。因此,建立全方位的、连续的“山地景观信息图谱”成为一种可能的解决途径。

山地景观信息图谱具有图形思维、全数字化和动态模拟分析的特点,其基本框架是利用遥感数据/专题地图和DEM,用特殊二维形式来表达三维地表信息。建立山地景观信息图谱需考虑尺度问题,单一模式无法表达多尺度的景观格局信息,如对于大范围的高原或狭长的山系,更关注的是其总体模式,需要识别其单侧的景观格局;对于局域尺度,相对周边地区比较孤立的山体,围绕360方位的景观具有很大差异,需从山体360方位识别该区域的景观信息;在地形比较破碎的山区,既不能从单侧对其进行识别,也无法有效地归纳其360全方位的变换,可按照地面坡向进行识别,综合考虑山地区域各起伏山峰的景观。山地景观信息图谱的构建可用数学方法识别不同尺度下的景观格局模式,实现景观信息的定位、定量和可视化,并提供对景观格局的动态分析(图1)。

3.3 构建山地景观信息图谱的难点和关键问题

目前,山地景观信息图谱研究已有了初步尝试,尤其是以植被为主的山地垂直带谱方面,包括山地垂直带谱的多尺度表达模式和数字识别方法研究^[71]、基于编程技术的原型系统构建^[72]等,但该领域研究仍处于探讨阶段,还存在以下方面的问题:

1)景观格局界线的识别问题。现有的山地垂直带谱数字识别研究是通过不同幂次的曲线拟合获取了垂直带的上下线,把2个垂直带界线的交叉区域当作过渡带。但实际上,山地垂直带可能由于局域山地环境的影响而变得犬牙交错,如何对其进行合理识别需要结合有关专业知识设定合理的识别规则对过渡带区域进一步划分,使垂直带上下线更加确定和统一,为垂直带因子提取和地学解释提供帮助。

2)山地垂直带谱的验证问题。山地垂直带是一个表征地表规律性的概念模型,能反映植被顶级群落的格局状态。由于长期受人类活动的影响,现有山地景观变得破碎和不连续,无法对其进行合理验证。因此,除了结合野外调查和利用高分辨率遥感影像外,通过潜在植被分布的模拟(predictive vegetation mapping, PVM)或许有助于对已识别的山地垂直带谱进行精度验证和分析。

3)山地景观信息图谱的属性维问题。景观格局分析应考虑空间维度(水平和垂直维度)、时间维度。山地植被垂直带谱反映了植被景观随海拔梯度的变化规律,而山地景观信息图谱除了要反映植被景观随海拔梯度的变异规律外,还应该考虑植被随其他环境梯度的变异规律,以及山地环境因子(如水热、辐射等)的垂直变化规律等问题。这种多源地学属性的多维集成图谱,需进一步设计合理的识别规则和算法,最终体现山地景观信息图谱的信息完备性以及图形思维、全数字化和动态模拟的特点。

4)山地景观信息图谱的尺度效应和尺度转换方法。在空间尺度上,第一个尺度是对象的本征尺度。由于不同空间范围的山地区域复杂程度不同,山地景观信息图谱具有不同的概括程度,因此需要设计不同的图谱模式;第二个尺度是图谱的测量尺度,不同分辨率(粒度)数据识别得到的图谱可能会有不同的模式,因此,必须通过多尺度分析,分析源数据的分辨率如何影响图谱模式,并选择和构建适合于不同研究对象的最佳图谱尺度。在时间尺度上,应建立生态过程关键影响因子的动态变化图谱,如植被指数季节变化、水热季节变化等,组成一个系列图谱,并探讨不同格局的范式或数学表达方式,由此来

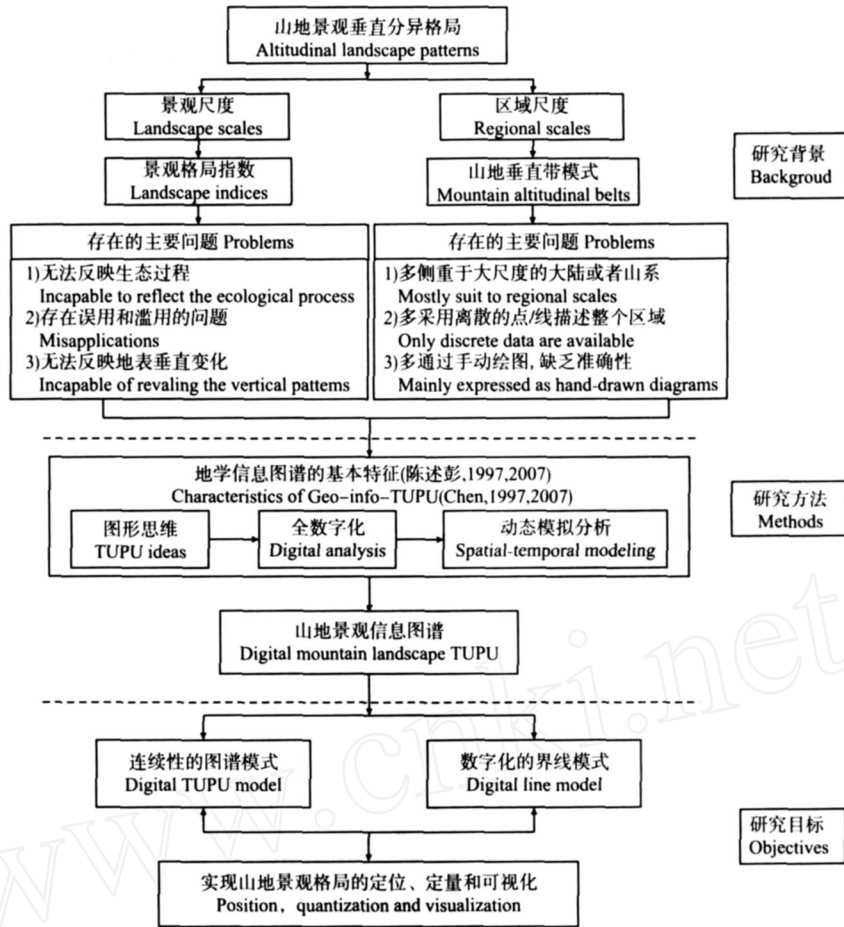


图 1 山地景观信息图谱的构建思路和框架

Fig 1 Framework for the construction of the mountain landscape TUPU.

研究格局与过程的相互作用关系^[70].

4 结 语

山地景观格局方面的研究多集中于对景观格局的简单描述和分析,缺乏深入探讨格局变化的生态学意义.在进行山地生态系统服务评价以及山地生态效应评价时,也没有考虑景观类型、结构和功能的垂直分带性.这是以静态景观格局指数为主的现有分析方法的局限所在.因此,建立具有生态学意义或发展面向生态过程的景观格局分析方法是必然的发展方向之一.虽然目前许多学者已经做了有益的探讨和尝试,但有关指数的适用性和有效性还需进一步完善.

将山地垂直带规律与景观生态学研究方法进行结合,构建山地景观信息图谱,不仅能够为景观格局提供更加直观和准确的表达方式,而且有望为生态过程的解释提供新的视角和思路.山地景观信息图谱的概念框架和识别方法的构建,是地理学和景观生态学研究的有机结合,并基于现代信息技术来实

现.山地景观是各种要素综合作用的结果,建立山地景观结构图谱(特别是各种环境因子和植被垂直带)必然会促进对其形成要素空间变化及整个山地环境的认识,更有利于深入研究和揭示山地环境、景观多样性及空间格局.山地景观信息图谱有可能为山地生态效应评价和生态过程研究提供新思路.通过构建生态过程关键影响因子的多时相动态变化图谱,可提炼不同格局的范式或数学表达方式,由此来研究格局与过程的相互作用关系.多时相的动态图谱可以在土壤侵蚀、生态系统服务评价、山地利用模式和生态规划等方面具有进一步探讨和应用的潜力.

参考文献

[1] Lauer W. Human development and environment in the Andes: A geocological overview. *Mountain Research and Development*, 1993, 13: 157-166

[2] Kömer C. The use of 'altitude' in ecological research *Trends in Ecology and Evolution*, 2007, 22: 569-574

[3] Walter H. *Vegetation of the Earth in Relation to Climate*

- and the Eco-physiological Conditions London: English Universities Press, 1973
- [4] Kömer C. Why are there global gradients in species richness? Mountains might hold the answer *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, **15**: 513-514
- [5] Allan NJR. Accessibility and altitudinal zonation models of mountains *Mountain Research and Development*, 1986, **6**: 185-194
- [6] Dullinger S, Dimboch T, Grabherr G. Modelling climate change-driven treeline shifts: Relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility *Journal of Ecology*, 2004, **92**: 241-252
- [7] Fang J-Y (方精云), Shen Z-H (沈泽昊), Cui H-T (崔海亭). Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology *Biodiversity Science (生物多样性)*, 2004, **12**(1): 10-19 (in Chinese)
- [8] Lü Y-H (吕一河), Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰). Analysis of the integrating approach on landscape pattern and ecological processes *Progress in Geography (地理科学进展)*, 2007, **26**(3): 1-10 (in Chinese)
- [9] Chen L-D (陈利顶), Lü Y-H (吕一河), Fu B-J (傅伯杰), et al. A framework on landscape pattern analysis and scale change by using pattern recognition approach *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2006, **26**(3): 663-670 (in Chinese)
- [10] Yang G-J (杨国靖), Xiao D-N (肖笃宁). Spatial pattern analysis of forest landscape in low coteau of middle Qilian Mountains *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(2): 269-272 (in Chinese)
- [11] Guo L (郭 砾), Xia B-C (夏北成), Liu W-Q (刘蔚秋), et al. Spatio-temporal change and gradient differentiation of landscape pattern in Guangzhou City during its urbanization *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2006, **17**(9): 1671-1676 (in Chinese)
- [12] Lin M-L (林孟龙), Cao Y (曹 宇), Wang X (王 鑫). Limitations of landscape pattern analysis based on landscape indices: A case study of Lizejian wetland in Yilan of Taiwan Province, China *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2008, **19**(1): 139-143 (in Chinese)
- [13] Troll C. Geocology of the High-mountain Regions of Eurasia. Wiesbaden: Frang Steiner Verlag, 1972
- [14] Austin MP, Smith TM. A new model for the continuum concept *Plant Ecology*, 1989, **83**: 35-47
- [15] Callaway RM. Positive interactions in plant communities and the individualistic-continuum concept *Oecologia*, 1997, **112**: 143-149
- [16] Bray JR, Curtis JT. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin *Ecological Monographs*, 1957, **27**: 325-349
- [17] Hamilton AC. A quantitative analysis of altitudinal zonation in Uganda forests *Plant Ecology*, 1975, **30**: 99-106
- [18] Hamilton AC, Perrott RA. A study of altitudinal zonation in the montane forest belt of Mt Elgon, Kenya/Uganda *Vegetatio*, 1981, **45**: 107-125
- [19] Lovett JC. Elevational and latitudinal changes in tree associations and diversity in the Eastern Arc mountains of Tanzania *Journal of Tropical Ecology*, 1996, **12**: 629-650
- [20] Kitayama K. An altitudinal transect study of the vegetation on Mount Kinabalu, Borneo *Plant Ecology*, 1992, **102**: 149-171
- [21] Kessler M. Altitudinal zonation of Andean cryptogam communities *Journal of Biogeography*, 2000, **27**: 275-282
- [22] Hemp A. Ecology of the pteridophytes on the southern slopes of Mt Kilimanjaro. I. Altitudinal distribution *Plant Ecology*, 2002, **159**: 211-239
- [23] Hemp A. Continuum or zonation? Altitudinal gradients in the forest vegetation of Mt Kilimanjaro *Plant Ecology*, 2006, **184**: 27-42
- [24] Sklenar P. Searching for altitudinal zonation: Species distribution and vegetation composition in the superparamo of Volcan Iliniza, Ecuador *Plant Ecology*, 2006, **184**: 337-350
- [25] Villagran C, Amesto JJ, Arroyo MTK. Vegetation in a high Andean transect between Turi and Cerro Leon in Northern Chile *Vegetatio*, 1981, **48**: 3-16
- [26] Zhang X-S (张新时). The plateau zonality of vegetation in Xizang *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, 1979, **34**(1): 1-11 (in Chinese)
- [27] Zheng D (郑 度), Zhang R-Z (张荣祖), Yang Q-Y (杨勤业). On the natural zonation in the Qinghai-Xizang Plateau *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 1979, **34**(1): 1-11 (in Chinese)
- [28] Miehe S. Humidity-dependent sequences of altitudinal vegetation belts in the northwestern Karakorum. Proceedings of International Symposium on the Karakorum Mountains Beijing, 1992: 347-363
- [29] Wang GH, Zhou GS, Yang LM, et al. Distribution, species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of Qilianshan Mountains, Gansu, China *Plant Ecology*, 2002, **165**: 169-181
- [30] Boyce RL. Fuzzy set ordination along an elevation gradient on a mountain in Vermont, USA. *Journal of Vegeta-*

- tion Science, 1998, **9**: 191-200
- [31] Hegazy AK, El-Demerdash MA, Hosni HA. Vegetation, species diversity and floristic relations along an altitudinal gradient in south-west Saudi Arabia *Journal of Arid Environments*, 1998, **38**: 3-13
- [32] Kömer C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation *Oecologia*, 1998, **115**: 445-459
- [33] Leuschner C. Are high elevations in tropical mountains arid environments for plants? *Ecology*, 2000, **81**: 1425-1436
- [34] Horsch B, Braunb G, Schmidb U. Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland: A multiscale remote sensing and GIS approach *Computers, Environment and Urban Systems*, 2002, **26**: 113-139
- [35] Gansert D. Treelines of the Japanese Alps: Altitudinal distribution and species composition under contrasting winter climates *Flora*, 2004, **199**: 143-156
- [36] Lomolino MV. Elevation gradients of species-density: Historical and prospective views *Global Ecology & Biogeography*, 2001, **10**: 3-13
- [37] Kitayama K, Aiba SI. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo *Journal of Ecology*, 2002, **90**: 37-51
- [38] Arunachalam A, Pandey HN. Ecosystem restoration of jhum fallows in northeast India: Microbial C and N along altitudinal and successional gradients *Restoration Ecology*, 2003, **11**: 168-173
- [39] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects on mountain plants *Nature*, 1994, **369**: 448
- [40] Penuelas J, Boada M. A global change-induced biome shift in the Montseny Mountains *Global Change Biology*, 2003, **9**: 131-140
- [41] Walther GR, Post E, Menzel A, et al. Ecological responses to recent climate change *Nature*, 2002, **416**: 389-395
- [42] Beniston M. Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts *Climatic Change*, 2003, **59**: 5-31
- [43] Mu C-C (牟长城). Succession of *Larix olgensis* and *Betula platyphlla* marsh ecotone communities in Changbai Mountain *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2003, **14**(11): 1813-1819 (in Chinese)
- [44] Zhou X-F (周晓峰), Zhang Y-D (张远东), Sun H-Z (孙慧珍), et al. The effect on climate change on population dynamics of *Quercus mongolica* in north Greater Xing'an Mountain *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2002, **22**(7): 1035-1040 (in Chinese)
- [45] Dai J-H (戴君虎), Pan Y (潘 嫻), Cui H-T (崔海亭), et al. Impacts of climate change on alpine vegetation on Wutai Mountains *Quaternary Science (第四纪研究)*, 2005, **25**(2): 216-223 (in Chinese)
- [46] Huang X-C (黄锡畴). Structure Types of Mountain Altitudinal Belts in Temperate Zone of Eurasia Beijing: Science Press, 1962 (in Chinese)
- [47] Liu H-X (刘华训). The vertical zonation of mountain vegetation in China *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 1981, **36**(3): 267-279 (in Chinese)
- [48] Gu W (顾 卫), Zhang X-S (张新时). Studies of mountain climate vertical zones of temperate arid and semi-arid in China *Journal of Arid Land Resources and Environment (干旱区资源与环境)*, 1994, **8**(3): 1-11 (in Chinese)
- [49] Hou X-Y (侯学煜), Zhang X-S (张新时). Vertical Patterns of Mountain Vegetation in China Beijing: Science Press, 1980 (in Chinese)
- [50] Zheng D (郑 度). Natural Environment and Geographical Differentiation Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1996 (in Chinese)
- [51] Zheng Y-C (郑远长). A study on vertical belts in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau *Yunnan Geographical Environment Research (云南地理环境研究)*, 1997, **9**(2): 43-52 (in Chinese)
- [52] Peng B-Z (彭补拙), Chen F (陈 浮). Progress in the study of mountain vertical zonation in China *Scientia Geographica Sinica (地理科学)*, 1999, **19**(4): 303-308 (in Chinese)
- [53] Peng B-Z (彭补拙). Discussion on the altitudinal belts in Mt Nam jagbarwa *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 1986, **41**(1): 51-58 (in Chinese)
- [54] Zheng D (郑 度). The Vertical Vegetation Zonation and Geographical Differentiation in Mt Karakorum. Beijing: Science Press, 1994 (in Chinese)
- [55] Zhang B-P (张百平), Zhou C-H (周成虎), Chen S-P (陈述彭). The geo-info-spectrum of montane altitudinal belts in China *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 2003, **58**(2): 163-171 (in Chinese)
- [56] Zhang B-P (张百平), Yao Y-H (姚永慧), Mo S-G (莫申国), et al. Digital spectra of altitudinal belts and their hierarchical system. *Journal of Mountain Research (山地学报)*, 2002, **20**(6): 660-665 (in Chinese)
- [57] Zhang BP, Wu HZ, Xiao F, et al. Integration of data on Chinese mountains into a digital altitudinal belt system. *Mountain Research and Development*, 2005, **26**: 163-171
- [58] Jiang Z-X (蒋忠信). Quantitative analysis of snowline zonality. *Journal of Glaciology and Cryopedology (冰川*

- 冻土), 1984, **6**(2): 27-34 (in Chinese)
- [59] Shi P-L (石培礼). A Study on the Vegetation Ecology of Subalpine Timberline Ecotone. Beijing: Commission for Integrated Survey of Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, 1999 (in Chinese)
- [60] Dai J-H (戴君虎), Cui H-T (崔海亭). A review on the studies of alpine timberline *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 1999, **19**(3): 243-249 (in Chinese)
- [61] Yu P-P (于澎涛), Liu H-Y (刘鸿雁), Cui H-T (崔海亭). Vegetation and its relation with climate conditions near the timberline of Beitai, the Xiaowutai Mts, Northern China *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(5): 523-528 (in Chinese)
- [62] Wang X-P (王襄平), Zhang L (张玲), Fang J-Y (方精云). Geographical differences in alpine timberline and its climatic interpretation in China *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2004, **59**(6): 871-879 (in Chinese)
- [63] Li W-H (李文华), Zhou P-C (周沛村). The basic distribution laws and mathematical models of the dark coniferous forest in Eurasia *Resources Science* (资源科学), 1979(1): 21-34 (in Chinese)
- [64] Niu W-Y (牛文元). Theoretical analysis of physico-geographical zonation *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1980, **35**(4): 288-298 (in Chinese)
- [65] Jiang Z-X (蒋忠信). Discussion on the mathematical patterns of altitudinal belts *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1982, **37**(1): 98-103 (in Chinese)
- [66] Zheng Y-C (郑远长), Wang M-J (王美娟), Wu Z-F (吴正方). A study on the mathematical model of the vertical distribution of natural belts in the southeastern part of the Qinghai-Tibet Plateau and their ecological analysis *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 1996, **11**(3): 249-254 (in Chinese)
- [67] Wang X-H (王秀红). On the layer-belt of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau *Mountain Research* (山地研究), 1997, **15**(2): 67-72 (in Chinese)
- [68] Chen L-D (陈利顶), Liu Y (刘洋), Lü Y-H (吕一河), et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: Current, challenges and future *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(11): 1255-1355 (in Chinese)
- [69] Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), Xu J-Y (徐建英), et al. Location-weighted landscape contrast index: A scale independent approach for landscape pattern evaluation based on "Source-Sink" ecological processes *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(11): 2406-2413 (in Chinese)
- [70] Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), Zhao W-W (赵文武). Source-sink landscape theory and its ecological significance *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(5): 1444-1449 (in Chinese)
- [71] Sun R-H (孙然好), Zhang B-P (张百平), Xiao F (肖飞), et al. Exploring the method of digital identification of mountain altitudinal belts *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 2008, **12**(2): 135-141 (in Chinese)
- [72] Sun R-H (孙然好), Zhang B-P (张百平). Development of digital altitudinal belts identification system. *Geo-information Science* (地球信息科学), 2008, **10**(6): 690-696 (in Chinese)

作者简介 孙然好,男,1981年生,博士,助理研究员.主要从事山地生态学、遥感与GIS应用研究,发表论文10余篇.
E-mail: rshsun@rcees.ac.cn

责任编辑 杨弘
