

纵向岭谷区地表格局的生态效应及其区域分异

潘 韬¹, 吴绍洪^{1,2}, 何大明³, 戴尔阜¹, 刘玉洁¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

3. 云南大学亚洲国际河流中心, 昆明 650091)

摘要: 中国西南纵向高耸山岭与深切河谷并列排布的特殊地表格局对该区自然环境与生态地理区域分异的效应明显。利用纵向岭谷区 1:5 万 DEM 数据、建站以来至 2010 的气象观测数据、水文观测资料、MOD13 与 MOD17 的 NDVI 与 NPP 产品以及 1:100 万植被类型数据等, 选取地表大气水汽含量、降水量、干湿指数、地表径流等水分指标, 平均气温、年积温等温度指标以及太阳总辐射等热量指标, 基于 ANUSPLIN 样条函数、GIS 空间分析、小波分析、景观格局分析等方法, 分析该区水热格局、生态系统结构与功能的地域分异特征及其主控因子, 揭示地表格局对生态地理要素区域分异的效应。结果表明: 受地表格局的影响, 纵向岭谷区的水分、温度与热量都表现出明显的沿纬线方向间断式差异和经线方向连续式延伸的分布特征, 纵向山系与河谷对地表主要自然物质和能量输送具有南北向通道作用和扩散效应以及东西向阻隔作用和屏障效应; 特殊地表格局对植被景观多样性、生态系统结构与功能的空间格局产生重要影响, 是植被景观多样性与生态系统空间分布的主要控制因子; 小波方差分析反映了环境因子以及 NDVI、NPP 的空间各向异性, 而小波一致性分析揭示了 NDVI 与 NPP 空间分布的控制因子, 及其控制程度的定量关系。纵向岭谷特殊地表格局是该区生态地理区域分异的主要影响因素, 在地带性规律与以“通道—阻隔”作用为主要特征的非地带性规律共同作用下, 形成了纵向岭谷区生态地理区域系统的特殊空间特征。

关键词: 中国西南; 纵向岭谷区; “通道—阻隔”作用; 生态地理区域; 空间分异

自然环境的地域分异规律及其成因一直以来都是地理学研究的核心问题之一^[1]。陆地表层自然环境要素的空间格局及其之间的相互作用是生态地理区域系统形成与演化的主要驱动力之一, 即格局对过程的影响。当前, 在全球气候变化与人类活动等多重因素驱动下, 陆地表层系统正在发生急剧变化。深入研究自然环境要素的区域分异特征及其之间相互作用规律, 对于认识陆地表层系统的演变过程和规律具有重要的作用和意义^[2-4]。

纵向岭谷区 (Longitudinal Range-Gorge Region, LRGR) 是指位于我国西南, 包括与青藏高原隆升直接相关联的横断山及毗邻的南北走向山系河谷区^[5], 地理范围在 21°6'24"N~30°26'24"N, 95°41'42"E~106°11'16"E 之间, 地处元江—红河、澜沧江—湄公河、怒江—萨尔温江和独龙江—伊洛瓦底江 4 条国际大河的上游, 与缅甸、老挝、越南相连, 与泰国、柬埔寨和印度相近, 是我国西南与东南亚重要的生态廊道。纵向岭谷区的地形由于受到区域地质构造尤其是多条深大断裂的深刻影响而同时呈现高山峡谷相间的格局。自东向西岭谷依次为: 元江—红河、哀牢山, 把边江—李仙江、无量山—云岭, 澜沧江—湄公河、怒山, 怒江—萨尔温江、高黎贡山, 独龙江—伊洛瓦底江, 这种地表格局在全国乃至全世界

收稿日期: 2011-01-09; 修订日期: 2011-09-22

基金项目: 国家重点基础研究计划项目 (2003CB415101) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2003CB415101]

作者简介: 潘韬, 男, 博士, 助理研究员, 中国地理学会会员 (S110007367A), 主要从事综合自然地理与全球变化研究。
E-mail: pantao@igsnr.ac.cn

通讯作者: 吴绍洪, 男, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员 (S110000894M), 主要从事综合自然地理与全球变化研究。E-mail: wush@igsnr.ac.cn

都独一无二。在这一独特的地表格局下,造成了对区域物质和能量分配的控制作用,表现为南北向的地带性差异与东西向的非地带性特征相互交织,产生了不同的、多样化的水热格局与生态系统,形成了该区独特的环境格局^[5-6]。

学者对纵向岭谷区特殊环境格局与地理过程开展了较多研究,包括:南北走向河谷的水汽通道作用及植被生产力的响应^[7]、植被时空异质性及其形成原因^[8-9]、降水量的时空分异规律^[10-12]、典型流域径流量的变化特征和规律^[13]、特殊水热组合格局下的孢粉组合差异^[14-15]等。然而,目前研究大多从单个地理要素出发,在地表格局的综合生态效应方面展开的研究较少,对区域的生态地理区域分异规律讨论不多。纵向岭谷区地形对地表水热格局以及生物多样性、生态系统结构与功能的形成、演化与区域分异具有重要影响,深入研究该区自然环境要素之间的相互作用及其空间差异,对于揭示其自然环境格局演变规律及驱动力具有重要的科学意义。

为了更加系统全面地分析纵向岭谷地表格局对该区水热格局的控制作用及其生态效应,准确揭示特殊岭谷地形对该区生态地理区域分异的影响,本文选取不同的水分、温度与热量指标,以及植被类型多样性、NDVI和NPP等生态系统指标,定量研究地形对各生态地理要素空间分异的作用规律,认识岭谷地形的“通道—阻隔”作用,进而揭示纵向岭谷区地表格局的综合生态效应及其区域分异规律。

1 资料与方法

1.1 数据来源

1:5万数字高程(DEM)数据来自中国科学院资源与环境数据中心。地面基准与基本站建站以来至2010年的逐日气象数据来自中国气象科学数据共享服务网,主要要素有降水、气温、相对湿度、日照时数、风速等。气压、高度、温度、温度露点差和风等高空气象数据来自中国气象局气象信息中心通过全球通信系统(GTS)接收的实时探空资料。云南省气象局提供了区内一般站建站以来的逐日地面气象数据。各流域水文站点的逐月经流观测资料来自水文资料。植被数据来源于《中华人民共和国植被图(1:100万)》^[16]的电子数据库,即《中华人民共和国植被图(1:100万)数据库及植被信息系统》。植被净初级生产力(NPP)和归一化植被指数(NDVI)由2000-2010年MOD17波段的陆地4级标准数据产品以及MOD13波段的陆地4级标准数据产品得到,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台^①。

1.2 研究方法

(1) 选择ANUSPLIN模型4.2版本实现对各气象要素的空间栅格化。该模型是澳大利亚国立大学基于薄盘平滑样条原理扩展开发的一套FORTRAN程序包,通过拟合数据序列计算并优化薄盘平滑样条函数,并引入线性协变量模型,最终利用样条函数进行空间插值^[17-18]。

(2) 水汽含量计算模型:大气水汽含量是表征陆地表层干湿程度最基本的指标之一^[19]。水汽含量 W 的计算公式为:

$$W = \frac{1}{g\rho} \int_{p_0}^p q dp \quad (1)$$

式中, W 为水汽含量(cm), g 为重力加速度($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$,国际标准值为 $980.665 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$), ρ 为水的密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,取标准大气压下 4°C 的水的密度为 0.99997 g/cm^3), p 、 p_0 分别是大气柱下界气压和上界气压(hPa),垂直方向上包括1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200 hPa; q 为比湿($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由于探空资料的露点温度截止到200 hPa等压面,

① <http://datamirror.csdb.cn>

所以计算层次的上界为200 hPa。

(3) 采用FAO56修订的Penman-Monteith模型计算纵向岭谷区的地表参考蒸散^[20]。湿润指数 I_a 根据Vyssotsky模型确定,定义为降雨量与参考潜在蒸散的比值。

(4) 选择植被丰富度指数(vegetation richness index)、相对丰富度(relative richness)、丰富度密度(richness density)和Shannon-Weaver多样性指数等4项指标测度植被类型多样性^[21]。植被丰富度是指一定区域内植被类型的数目,植被丰富度可根据植被类型图直接计算。Shannon-Weaver多样性指数是反应多样性的综合指标,它既测度植被类型的多寡,也反映不同植被类型空间分布的均匀状况。

(5) 小波分析:对地形因子以及归一化植被指数(NDVI)和植被净初级生产力(NPP)的空间采样序列进行小波方差和小波一致性分析^[22]。

(6) 模型验证:通过误差分析和相关分析检验模型的模拟效果,统计参数包括均方根偏差(RMSE)、平均偏差(MBE)、相对偏差(RE)。

2 纵向岭谷对水热的纵向扩散与横向屏障效应

2.1 季风水汽的南北通道、东西屏障

受印度洋与西太平洋季风的影响,纵向岭谷区具有典型的季风气候特征。冬半年(11月至翌年4月),主要受西风南支急流所控制,属干暖大陆性气团,形成本区明显的干季气候。湿季(5-10月),季风水汽开始影响本区。南北并列排布的纵向河谷,包括怒江、澜沧江、元江—红河河谷是季风水汽的重要输送通道,为暖湿气流进入高原内部,提供了有利的地形背景。强大的纬向水汽输送在此处受到特殊地貌的作用,产生较强的辐合,并逐渐抬升转向,沿河谷地区向高原内部输送。由于河谷狭窄,风速较大,上溯阻力较小,南来北上的湿润气流在夏季可达到35°N左右,水汽被大量地输送到江河源头地势陡然变高的高原内部。地表大气水汽压整体上呈南高北低的趋势(图1a)。在三江并流区,怒江、澜沧江、金沙江河谷的平均水汽压达到17.6 hPa,而周围山地的平均水汽压均在10 hPa以下。纬线方向上,西部的平均水汽压要高于东部的水汽压,而澜沧江、元江等河谷的水汽压明显高于周围地区。纵向岭谷区地表大气水汽含量与地表水汽压的空间分布格局基本一致(图1b)。大气水汽含量整体上仍然是北低南高。经线方向上,尽管总体上北部低于南部,但是由于受到纵向河谷对水汽输送的通道作用,从而使得大气水汽含量的分布在河谷方向上向北延伸。然而,水汽在北移过程中随地势升高而不断成云致雨,等到流动到北部,水汽流的能量、水汽数量、深厚程度等已经大为衰减。

纵向岭谷大部分地区年降雨量在750~1550 mm之间,其空间分布差异甚大(图1c),区内自西向东依次排列的准南北走向高耸的山体屏障了东西两方面水汽的进入,因此降雨量呈现东西多而中间少的格局;而山体间深切的河谷成为南来湿润气流北上的通道,随着由西北向东南倾斜的地势总趋势,西南季风和东南季风影响均由南向北减弱,降水循同一方向递减,南部地区降雨在1000~1500 mm,甚至有的站点超过1500 mm,中部地区年降雨在900~1300 mm,北部地区年降雨量低于1000 mm。降雨量反映在空间分布图上则是西部、西南部降雨量分布分别向东、向北延伸。南北向的纵向山岭对降水有明显的阻隔效应,导致西部降雨较多;南部河谷水汽输送量明显偏高,形成了纵向岭谷区南部较高的降雨区域。

潜在蒸散的空间格局总体上呈现出东西向差异,南北向延伸的特征,与纵向岭谷区的山系河谷地形特征相关联(图1d)。一方面,地形对水汽输送的阻隔和抬升作用导致夏季降水呈纬线方向分布,形成水汽和能量的扩散通道;另一方面,纵向山岭的阻隔导致了东西差异,河谷地区干热少雨,潜在蒸散较高,中高山地区温度降低,降水在一定的范围内

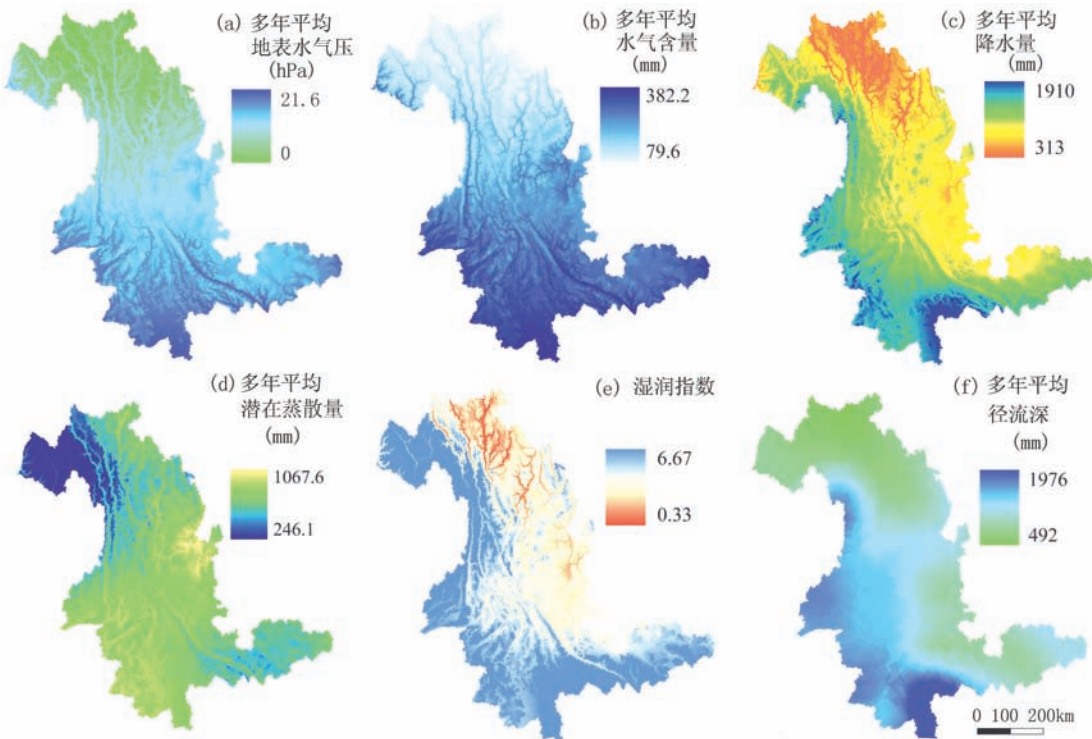


图 1 纵向岭谷区水分要素空间格局

Fig. 1 The spatial pattern of water elements in Longitudinal Range-Gorge Region

随着海拔增高而增加，潜在蒸散较低。对于干湿状况来说（图 1e），总体看来，全区绝大部分处于湿润状态（ $I_a \geq 1$ ），全年降雨量大于潜在蒸散量，尤其是藏东南山地季雨林地区以及南部西双版纳等地区。纵向岭谷区东北部的藏东高山深谷针叶林区，为半湿润地区。其空间格局受到非地带性的影响，呈现出明显的经线方向差异。纵向岭谷区西部总体比东部湿润，但由于干湿状况是水、热等因子综合的结果，从图中清楚地反映出，湿润度大的地方并非降雨最多的地方。

基于水文站点 1981-2010 年的径流深资料，通过 ArcGIS 9.3.1 软件的空间分析工具生成纵向岭谷区流域多年平均径流深空间分布图（图 1f）。可以发现，纵向岭谷区流域径流深等值线在空间上呈西北—东南向分布的趋势明显，分布格局与河谷/山脉的走向基本一致，并在纵向岭谷区北段三江并流区、怒江下游、金沙江南段，以及哀牢山北段和李仙江下游地区形成若干个高值区。由于纵向山系阻挡，使该区域的降水量及其分布在山脉东西两侧差异明显，以西地区降水量明显多于东部地区。以红河流域为例，与降水的分布格局相对应，红河大断裂以西的李仙江下游和藤条江地区径流深达 1200~2500 mm 之间，哀牢山北段径流深在 800~1200 mm 之间，明显大于哀牢山以东地区。红河大断裂以东地区径流分布南北差异很大，马龙河、绿汁江、小河底河等地区径流深基本上在 400 mm 以下，是红河流域径流的低值区。而南部的南溪河和南利河地区，水汽顺河谷输送，降水量相对丰富，径流深在 800~1400 mm 之间。在元江河谷，降水量从河口向上游方向约 196 km 内下降了 1200 mm，平均变化梯度约 -6.1 mm/km；而径流深在 185 km 内减少了 1050 mm，平均变化梯度约 -5.7 mm/km。

2.2 温度、热量的地域分异

纵向岭谷地区年平均气温（1981-2010 年）分布总体上有北低南高的趋势（图 2a）。同海拔高度、同纬度地区气温东低西高，由于海拔高度和下沉气流的焚风效应，河谷地带气温

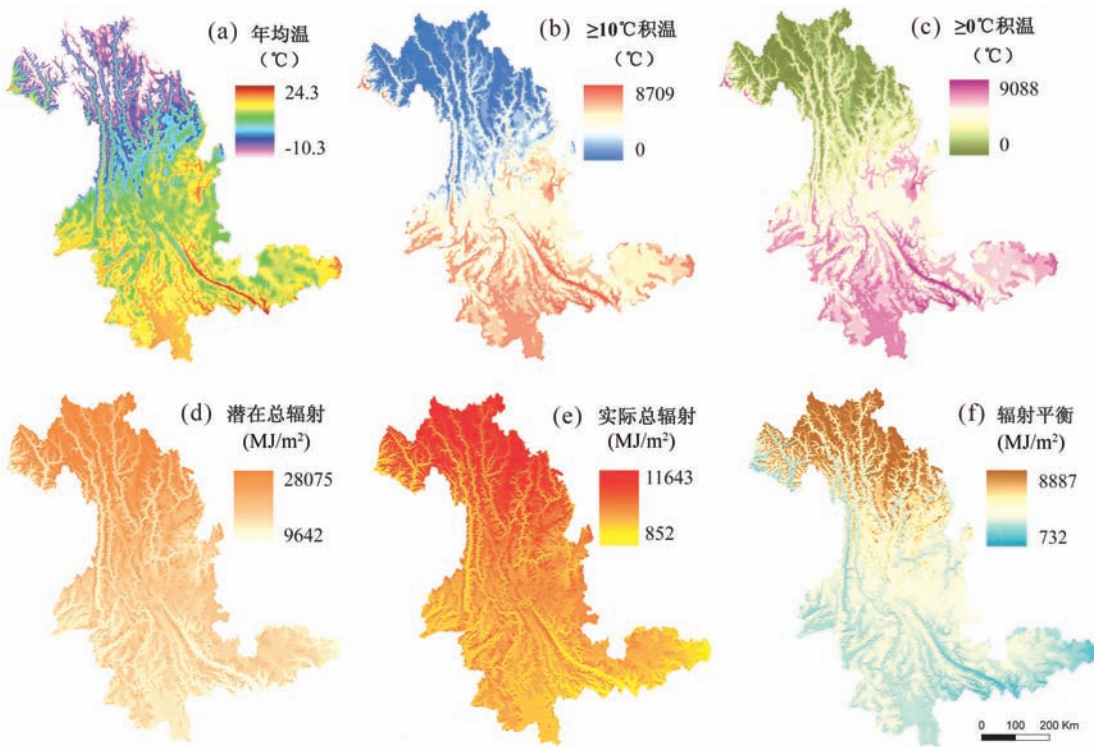


图2 纵向岭谷区温度与热量的空间格局

Fig. 2 The spatial pattern of temperature and heat in Longitudinal Range-Gorge Region

最高，元江、澜沧江、怒江河谷下段，年平均气温在 20℃ 以上。南部海拔 1300 m 以下地区一般在 18℃ 以上，西部海拔在 1300~2000 m 之间的地区为 14~18℃，西北海拔 2000~3500 m 之间地区在 6~14℃，海拔 3500 m 以上地区在 6℃ 以下。受地形起伏的影响，北部低温线呈楔状向南部突出，“楔角”基本位于剑川、兰坪一带，南部高温线也有向北部突出趋势，河谷内部温度较高，例如元江河谷内部温度明显高于河谷外部。夏季平均气温在全区内多沿河谷呈纵向带状延伸分布。纵向岭谷地形对冬季气温空间分布的作用不明显，主要受纬度地带性的作用，但在怒江、澜沧江流域，其河谷内部的温度变化仍受到地形的影响。岭谷地区年平均温度等值线具有从东向西递增的梯次分布，即自元江—红河流域向澜沧江—湄公河流域再向怒江流域逐渐递增的趋势，说明受到阻隔的明显作用，表现为影响岭谷地区的冷空气自东向西减弱，造成岭谷地区年平均热量分布形势表现为怒江流域热量最大，其次是澜沧江—湄公河流域，最后为元江—红河流域，大致为纬线方向分布特征。因此，澜沧江—湄公河流域是年平均温度和热量发生变化的最明显的分界。

多年平均大于 10℃ 积温的空间格局 (图 2b) 与大于 0℃ 年积温的空间格局 (图 2c) 基本一致。纵向岭谷地区南部地区积温在 7000~8000℃ 之间，其中元江、河口、景洪三地的积温 > 8000℃，最高值是元江为 8700℃；积温最低值位于西北 < 2000℃ (其中德钦最低为 1338℃)，积温最高值与最低值相差 7000℃ 以上。积温的地区分布总趋势是南高北低，自南向北递减，西部积温高于东部 (西北除外)，河谷地区积温最高，西北地区积温最低。积温的空间分布格局明显受到地形的影响，呈现出东西差异、南北延伸的空间特征。河谷地区干热少雨，年积温高于其它地区，热量沿着河谷向北延伸；由河谷向上，随着海拔的升高，由于平均气温降低，年积温也相应的降低。东西方向上，由于受到山岭的阻隔作用，阻挡了影响本区的冷空气流，使得该区的年积温空间格局表现出明显的东西差异。

太阳辐射平衡是表征热量的重要指标，其空间格局直接反映了纵向岭谷地形对热量的

空间分配作用。采用太阳辐射计算的气候学模型, 分别得到纵向岭谷区年太阳潜在总辐射 (图 2d)、太阳实际总辐射 (图 2e) 及太阳辐射平衡 (图 2f) 的空间分布, 三者的空间格局特征基本一致。太阳辐射平衡的空间分布受地形与地理地带性的影响很大, 海拔高的地区太阳辐射较高, 北方地区的太阳辐射高于南方地区。受到山脉、河谷相间排列地形的作用, 太阳辐射的等值线呈现出明显的经线方向分布, 与地形特征相一致, 呈现出纬线方向差异、经线方向延伸的空间分布特征。选择三条纬线方向样带 (23°N、26°N、29°N), 分别对潜在总辐射、实际总辐射和辐射平衡进行了空间栅格采样, 计算了南—中—北不同样带的平均太阳辐射, 结果反映了太阳辐射明显的空间变化特征, 北部最低、中部次之、南部最高 (表 1)。

表 1 纵向岭谷区多年平均太阳辐射南—中—北方向上的空间变化 (MJ/m²·y)

Tab. 1 Spatial variation of annual average solar radiation in south—middle—north direction of Longitudinal Range—Gorge

Region (MJ/m ² ·y)			
纬度	潜在总辐射	实际总辐射	辐射平衡
23°N	12642.3	10394.5	9632.4
26°N	15367.5	13487.8	11873.4
29°N	19765.8	17034.6	14643.1

3 地形“通道—阻隔”作用的生态效应

生态地理区域系统受到水热组合条件的深刻影响。纵向岭谷地形对地表物质、能量输送以及水热格局具有明显作用, 从而对生态地域系统形成关联效应, 特殊地表格局导致纵向岭谷区水热组合的空间再分配, 是植被景观多样性、生态系统的结构与功能形成与演化的重要因素。

3.1 植被景观多样性的“廊道”与“屏障”

植被景观多样性具有两方面的含义, 一方面反应植物群落的多样化, 另一方面反应不同植被类型在一定空间尺度上组合方式的多样性, 本文重点关注后者。以 1:100 万植被图为基础, 通过 FRAGSTATS3.3 景观格局软件, 得到了纵向岭谷区植被类型绝对丰富度 (图 3a)、相对丰富度 (图 3b)、丰富度密度 (图 3c) 以及 Shannon-Weaver 多样性 (图 3d) 等指数的空间分布图。植被丰富度指数 (绝对丰富度、相对丰富度) 反映了某景观单元内植被类型的多少, 丰富度密度反映了单位面积内植被类型的数量, Shannon-Weaver 多样性指数则是个综合指标, 它既可以反映植被类型的多寡, 也可以反映不同植被类型空间分布的均匀状况。

从整体空间格局来看, 植被丰富度的变化范围在 1~10 之间, Shannon-Weaver 多样性指数的变化范围在 0~2.25 之间, 高值区集中在独龙江、怒江、澜沧江、元江以及金沙江等河谷地区以及热带雨林地区, 这些区域的植被类型绝对丰富度一般在 6 以上, Shannon-Weaver 指数一般在 1.6 以上, 主要植被类型为灌丛、稀疏植被地带及热带雨林。低值区主要集中在纵向岭谷区北部的高山草甸以及山地针叶林地带以及东部的高原地区, 植被类型绝对丰富度一般在 5 以下, Shannon-Weaver 指数一般在 1.2 以上, 主要植被类型为亚热带山地针叶林等。因此, 植被景观多样性指数的高值区多为干热河谷周围低海拔地区, 植被类型多为灌丛与稀树草原。随着海拔的升高, 受到纵向山系的阻隔作用, 植被景观多样性指数逐渐下降, 植被类型逐渐向针阔混交林、亚热带针叶林及温带针叶林变化。

植被景观多样性的空间格局与地形及其影响下的水热格局具有密切的关联, 其空间分布具有典型的南北向延伸和东西向差异的特征。干热河谷与纵向的山系形成了南北走向的“廊道”和东西方向的“屏障”, 导致了水热格局的重新分配。水热条件在空间格局上表现出明显的东西方向的梯度差异和南北方向的延续性, 对地表主要自然物质和能量输送的南北向通道作用和扩散效应、东西向阻隔作用和屏障效应, 从而形成了植被景观多样性的特殊空间格局。

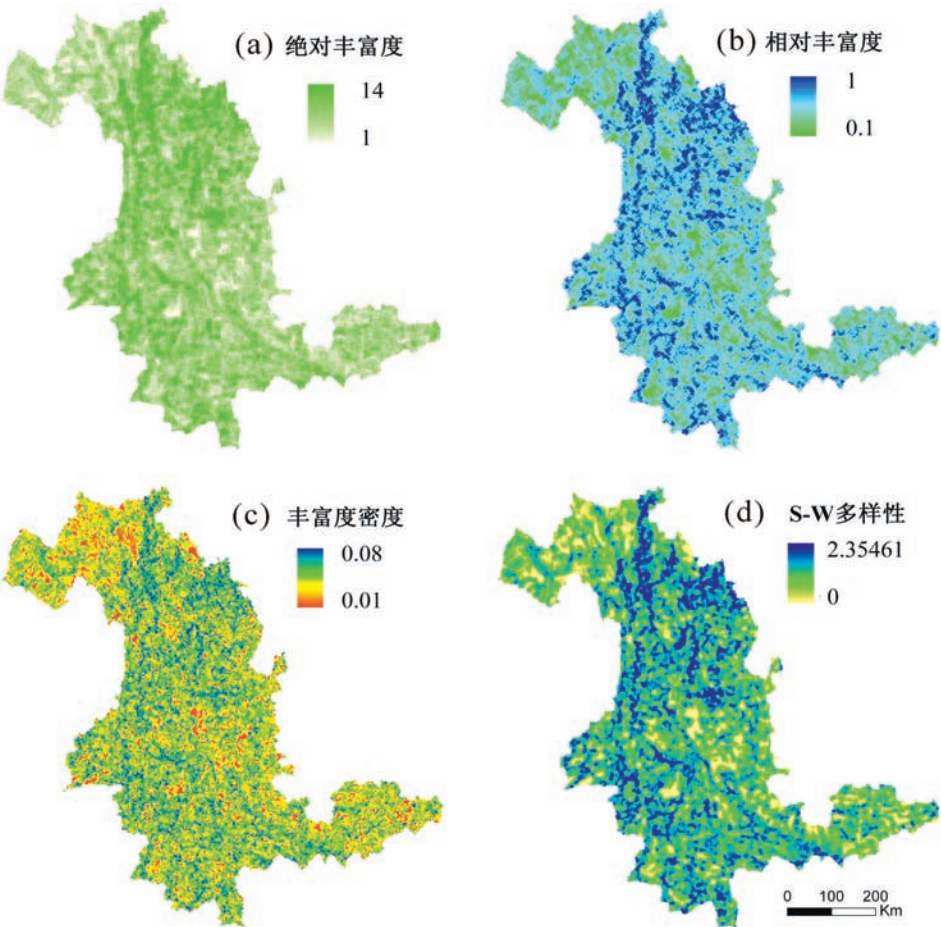


图3 纵向岭谷区植被类型多样指数空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of vegetation types diversity indices in Longitudinal Range-Gorge Region

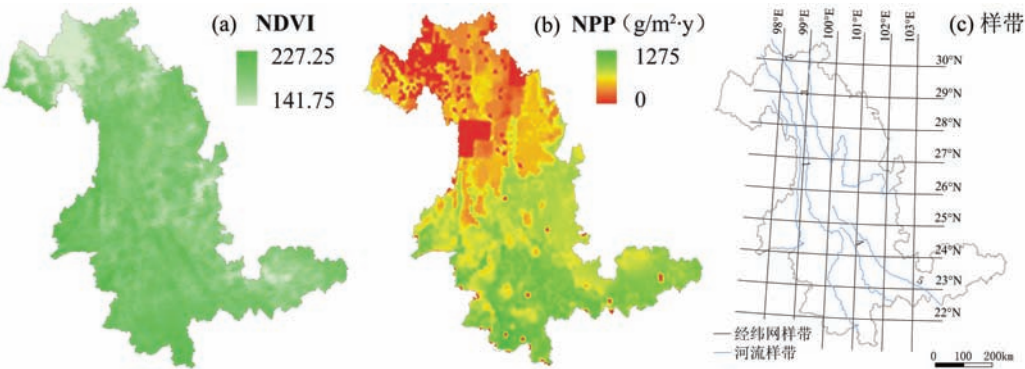


图4 纵向岭谷区NDVI与NPP格局及小波分析样带图

Fig. 4 Spatial pattern of NDVI and NPP distribution and wavelet analysis transect in Longitudinal Range-Gorge Region

3.2 “地—气—水—生”通道—阻隔作用下的NPP与NDVI地域分异特征

为了更加清楚地表征NDVI (图4a) 与NPP (图4b) 的多尺度空间格局以及其与地形之间的关系, 对NDVI与NPP进行了空间样带的重采样, 包括9条纬线样带、6条经线样带以及5条河谷样带 (图4c), 并分析了每条样带的NDVI与NPP空间变化 (图5, 6)。

由图5, 6可以发现, 东西方向上无论是NDVI还是NPP波动都很大。25°N与27°N方

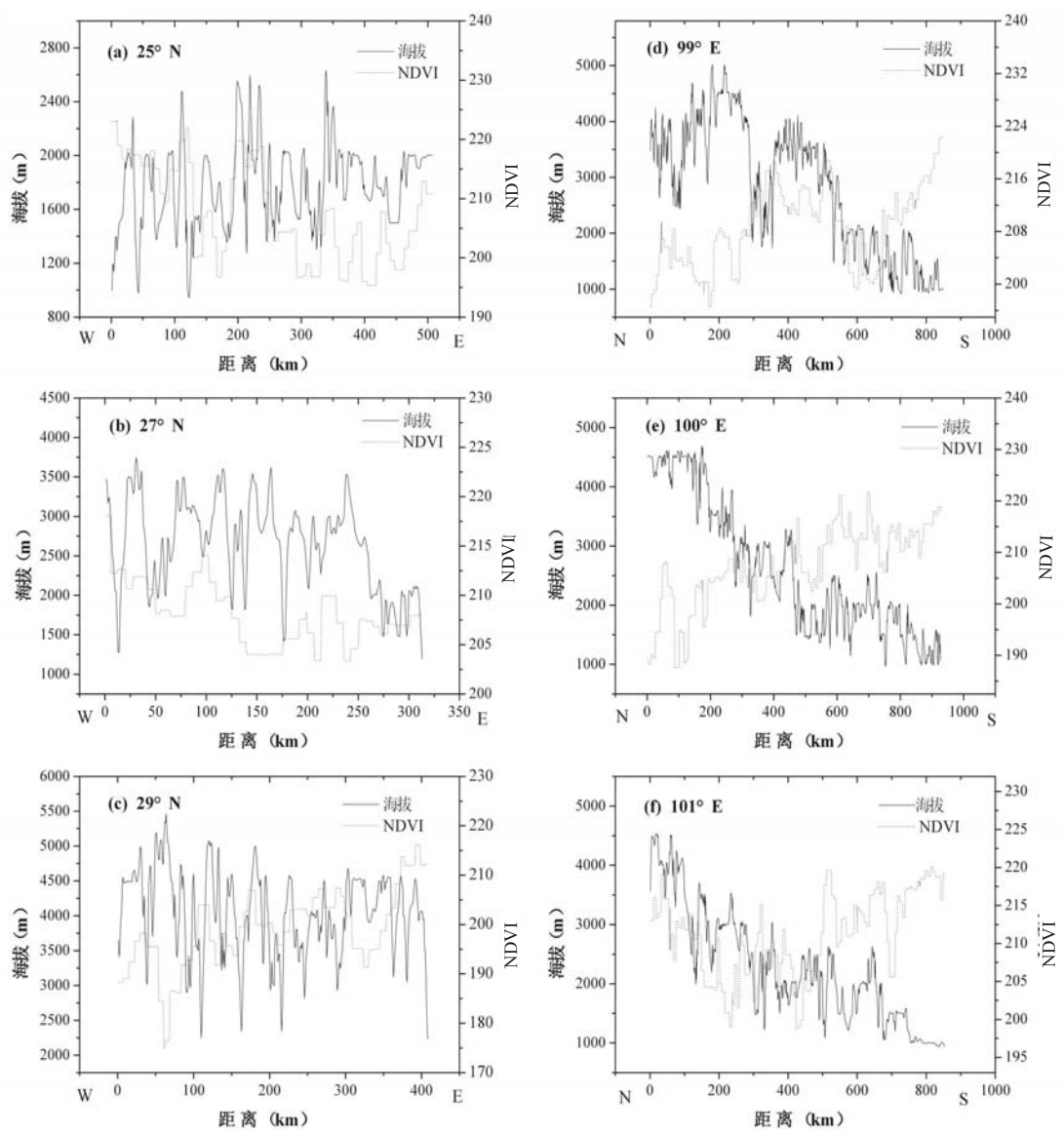


图5 不同方向NDVI与海拔空间变化图

Fig. 5 Spatial variation of NDVI and elevation in different directions

向上NDVI总体表现出比较明显的自西向东递减的趋势，但是在29°N方向上不明显。NPP与海拔在一定范围内都呈现出负相关的关系。东西方向上，由于地形的起伏，NPP的波动范围较大，南北方向上，NPP的大小由南向北逐渐递减。在纵向岭谷区南部，西南季风自西向东影响本区，研究区的西南部位于印度洋西南季风水汽通道的有利位置，中部南段则处于南海水汽通道的流通之地，南部水热组合条件的空间格局大致是西部优于东部；而在纵向岭谷区北部，处于青藏高原的东南缘，地势较高，季风水汽对该区的影响较小，NDVI的空间分布主要受到地形因子的影响，因此其东西差异不如南部明显。南北方向上，自南向北的递减趋势明显，这与温度和热量条件有关。从南向北，一方面受到纬度地带性的影响，另一方面受到地形海拔的影响（北部平均海拔高于南部），温度与热量条件自南向北逐渐递减。对比海拔与NDVI的分布曲线，可以发现NDVI的高值区分布在河谷两侧的中高山地区，且山脉的西坡一般高于东坡，这与山脉的湿舌作用以及河谷的水热通道

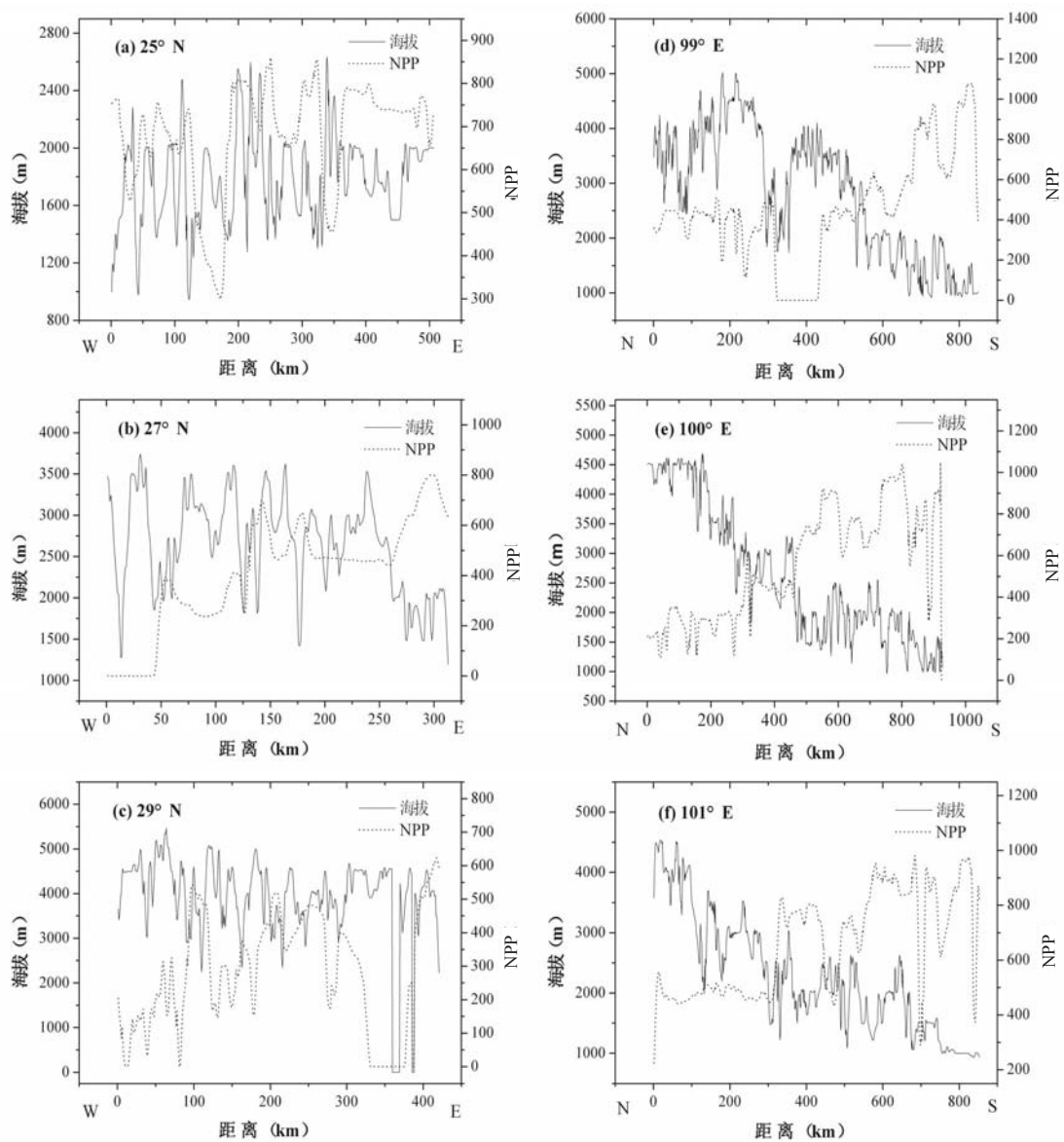


图6 不同方向NPP与海拔空间分布图

Fig. 6 Spatial variation of NPP and elevation in different directions

作用是密不可分的。

3.3 NDVI、NPP与地形因子的多尺度关联效应

通过图4c的栅格空间采样方法，利用小波一致性分析揭示NDVI、NPP空间格局的控制性因子。限于篇幅，这里仅给出25°N、27°N与99°E、101°E海拔及其与NDVI、NPP的多尺度小波一致性图(图7与图8)。从海拔与NDVI的小波一致性图可以发现，在小尺度上(60~80 km)，海拔对于NDVI格局的作用不明显，且在不同植被类型区存在着两者位相关系相反的现象；在大中尺度上(100 km以上、出现岭谷交错)，地形与NDVI存在明显的大范围一致性，反映出地形因子是NDVI格局形成的大尺度的控制因子，且位相关系没有出现差别。从大尺度来说，NDVI及其影响因素中的一些局部变化作用很小。地形因子中海拔高度不是对NDVI格局起作用的全局因子，其作用最突出的出现在地表起伏较大的区

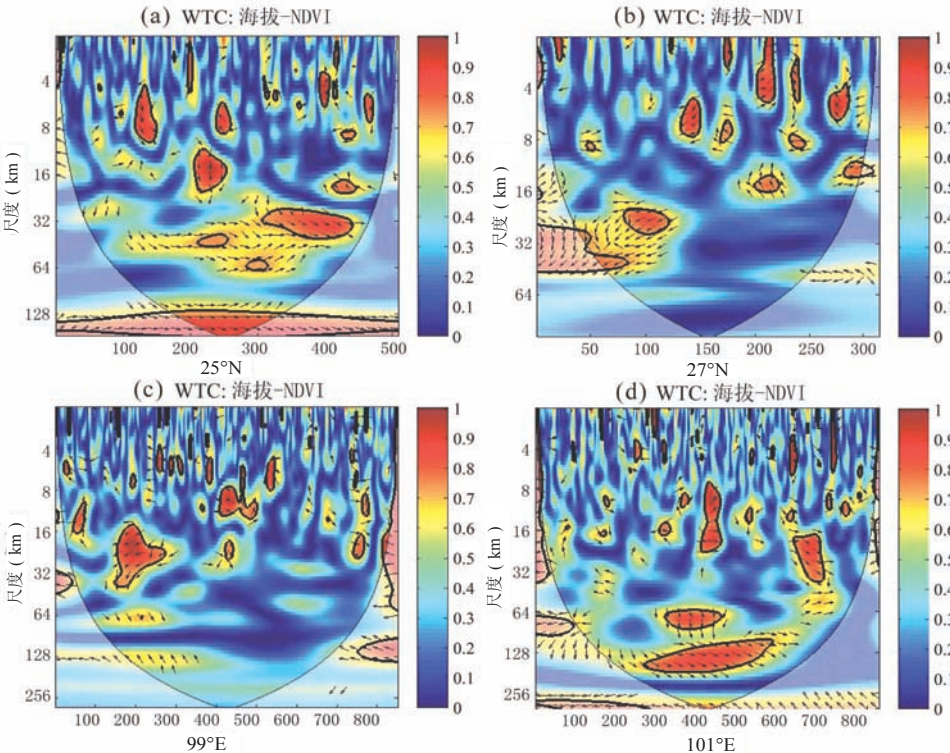


图7 不同方向上海拔与NDVI的多尺度小波一致性分析

Fig. 7 Multi-scale wavelet coherence analysis between elevation and NDVI in different directions

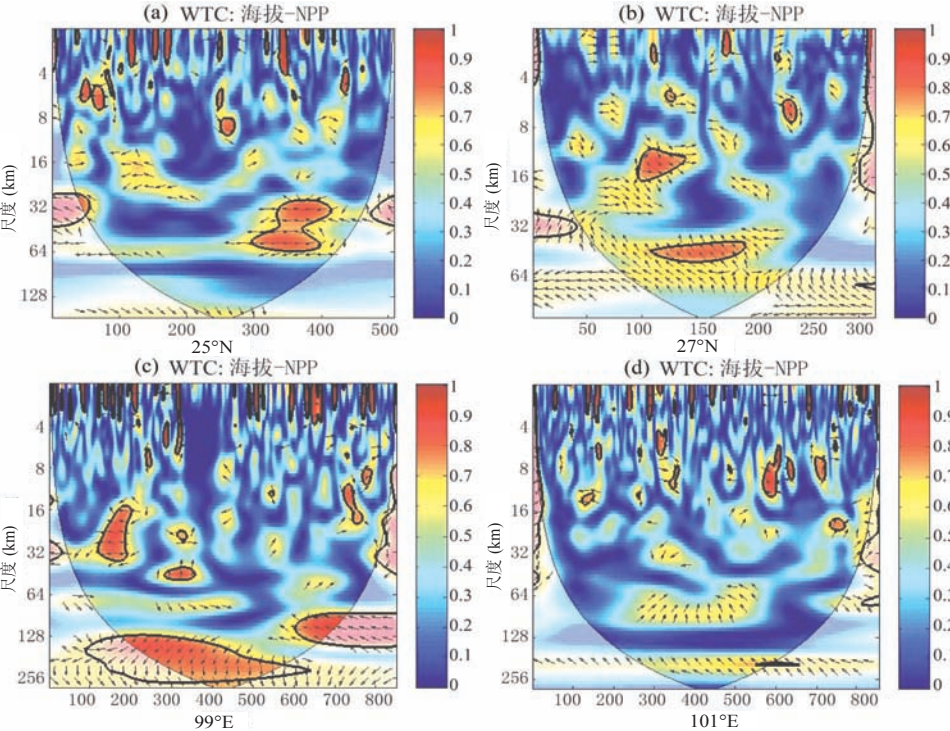


图8 不同方向上海拔与NPP的多尺度小波一致性分析

Fig. 8 Multi-scale wavelet coherence analysis between elevation and NPP in different directions

域，特别是岭谷交错区；当尺度小于某个阈值时，地形对于NDVI空间分布格局的作用不明显。这种现象证明了大尺度的纵向岭谷地形是控制NDVI空间分布格局的主要决定因素，局地中小尺度的地形变化对NDVI的作用不大。纵向岭谷特殊地形是本区水、热要素以及生态格局形成的主要驱动力，也是区域生态地理格局分异的重要因素。

同样，由海拔与NPP的小波一致性研究可以发现，在小尺度上，海拔因子对于NPP格局的作用不明显，且在不同植被类型区存在着两者位相关系相反的现象；在大中尺度上，气候因子与NPP存在明显的大范围一致性，反映出气候因子是NPP格局形成的大尺度的控制因子，且位相关系没有出现差别。从大尺度来说，NPP及其影响因素中的一些局部变化作用很小。也就是说，在小尺度，即某条山岭或河谷的小范围内，地带性是NPP变化的主要因素，与海拔因子关系不是十分密切；而在大中尺度，即岭谷交错区域内，地形因子成为NPP变化的主导因子。换句话说，非地带性与地带性规律对该区生态地理区域分异共同产生作用。

3.4 生态地理区域系统及其分异特征

生态地理区域系统是根据地表自然界的生物与非生物要素地理相关性的比较研究与综合分析，按照地表自然界的地域分异规律，划分或合并而形成的不同等级的区域系统。由于受到地带性和非地带性规律的共同影响，纵向岭谷区形成了独特的生态地理格局。依据地带性与非地带性相结合、生态地理区的发生同一性与区内特征相对一致性、区域空间连续性、综合性与主导因素等原则，按照生态地理区域划分的指标体系对该区生态地理区域系统进行划分(图9)。具体指标体系包括^[4]：

(1) 温度指标：选择 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的且保证率为80%的积温天数来进行热量带(气候带)的划分，同时选择 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的且保证率为80%的积温、保证率为80%的最冷月气温，保证率为80%的最暖月气温和保证率为80%的年极端最低气温作为辅助的温度指标；

(2) 水分指标：选择 Vyssotsky 湿润指数的倒数作为干燥度的指标，相

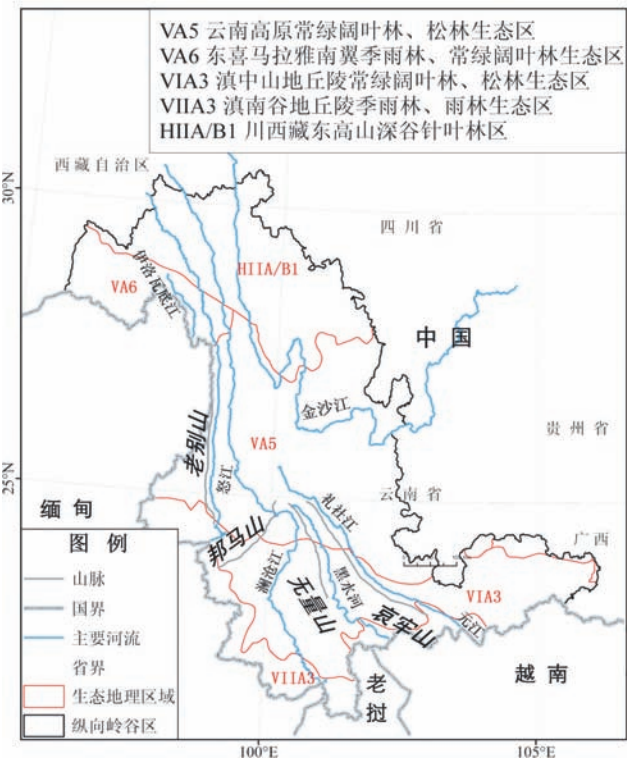


图9 纵向岭谷区生态地理区域划分
Fig. 9 Eco-geographical region divisions of Longitudinal Range-Gorge Region

表2 纵向岭谷区生态地理区域系统

Tab. 2 Eco-geographical region system of Longitudinal Range-Gorge Region

温度带	干湿地区	自然区
V 中亚热带	A 湿润地区	VA ₅ 云南高原常绿阔叶林、松林生态区 VA ₆ 东喜马拉雅南翼季雨林、常绿阔叶林生态区
VI 南亚热带	A 湿润地区	VIA ₃ 滇中山地丘陵常绿阔叶林、松林生态区
VII 边缘热带	A 湿润地区	VIIA ₃ 滇南谷地丘陵季雨林、雨林生态区
H II 高原温带	A/B 湿润/半湿润地区	H II A/B ₁ 川西藏东高山深谷针叶林区

应的干湿状况为： ≤ 0.99 为湿润， $1.00\sim 1.49$ 为半湿润， $1.50\sim 3.99$ 为半干旱， ≥ 4.00 为干旱类型。

生态地理区域较高级单位的划分依据侧重考虑生物气候的差异，先注意水平地带性，由于气候台站的有限性，所划分出的界线往往用植被界线去修正；而垂直地带性则将潜在植被与气候联系起来，按照降水量、潜在散和生物温度来进行划分，同时考虑区域的基本生态地貌类型。

按照上述生态地理区域划分依据、指标及方法，划分出纵向岭谷区的生态地理区域系统^[9]。该区南北方向跨越高原温带、中亚热带、南亚热带和边缘热带4条温度带（表2）。边缘热带与南亚热带的北界经过纵向岭谷区的核心区域。与同纬度其它区域相比，边缘热带、南亚热带以及中亚热带的北界纬度较高，三条温度带明显向北部延伸。边缘热带在元江河谷、黑水河谷附近的界线明显向北部凸起，温度带西段靠近并流区的界线整体向北部偏移。这种生态地理区域分异特征与本区的特殊地表格局密切相关，纵向岭谷对物质、能量的通道与阻隔作用是温度带偏北的重要原因之一。

4 结论

(1) 纵向岭谷地表格局对该区域的物质和能量流动产生了再分配，形成了独特的“通道—阻隔”作用：南北走向的山系对西南季风由西向东的推进具有阻隔作用，可能成为生物纵向迁徙的走廊和横向交汇的屏障；深切河谷是季风及其携带的水汽由低纬、低海拔地区向高纬度、高海拔地区不断输送的通道，南来北上的湿润气流在夏季可达到 35°N 左右，水汽被大量地输送到江河源头地势陡然变高的高原内部，河谷的平均水汽压达到 17.6 hPa ，而周围山地的平均水汽压均在 10 hPa 以下，同时河谷也可能成为境外物种生物入侵的通道；纵向岭谷特殊地表格局对该区水分、温度与热量分布产生了重大的影响，总体特征表现为在南北方向上连续渐变，东西方向上随山岭与河谷的地形变化而发生高低交替变化，使得该区自然地理要素呈现出明显的纬向差异、经向延伸的空间特征。

(2) “通道—阻隔”作用下的水热格局对区域的植被和生态系统的结构与功能具有重大影响，进而产生了一系列生态效应：植被景观多样性指数反映了植被类型多样性的空间分异特征，多样性指数沿河谷两侧较高，Shannon-Weaver指数一般在1.6以上，绝对丰富度在6以上，且呈经向延伸；NDVI和NPP格局反映了生态系统结构与功能在空间上的格局特征，受“通道—阻隔”作用下的水热格局的控制，表现出明显的经向延伸、纬向差异；地形及其作用下的水热格局是纵向岭谷区生态系统结构(NDVI)与功能(NPP)的主控因子，地形对二者的控制作用随着尺度变化而发生变化，纬线方向上对NDVI和NPP控制尺度约为 $60\sim 80\text{ km}$ 左右，而在经线方向上对NDVI的影响达到 100 km ，对NPP的影响则达到 200 km 以上。

(3) 纵向岭谷区在宏观的地理地带性和区域的特殊环境格局的综合作用下，形成了4个温度带、2个干湿区、6个自然区：由南至北分别为高原温带、中亚热带、南亚热带和边缘热带。水热沿通道被溯，使其生态地理区域与我国东部相比，温度带分布范围总体偏北，热带北界可超过 24°N ，比东部中段（广东）偏北2个纬度。这也体现了“地—气—水—生”系统相互耦合作用，是该区生态地理区域系统格局与过程形成和演化的主要驱动力。

参考文献 (References)

- [1] Zheng Du, Fu Xiaofeng. A preliminary study on issues of integrated geographical regionalization. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(3): 193-197. [郑度, 傅小锋. 关于综合地理区划若干问题的探讨. *地理科学*, 1999, 19(3): 193-197.]
- [2] Wu Shaohong, Yang Qinye, Zheng Du. Comparative study on eco-geographic regional systems between China and USA. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 686-694. [吴绍洪, 杨勤业, 郑度. 生态地理区域系统的比较研究. *地理学报*, 2003, 58(5): 686-694.]
- [3] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Fan Jie et al. Retrospect and prospect of regionalization system of China. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1538-1545. [吴绍洪, 尹云鹤, 樊杰 等. 地域系统研究的开拓与发展. *地理研究*, 2010, 29(9): 1538-1545.]
- [4] Zheng Du. *China's Eco-Geographical Region Study*. Beijing: The Commercial Press, 2008. [郑度. *中国生态地理区域系统研究*. 北京: 商务印书馆, 2008.]
- [5] Wu Shaohong, Dai Erfu, He Daming. Major research perspectives on environmental and developmental issues for the Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR) in southwestern China. *Progress in Geography*, 2005, 24(1): 31-40. [吴绍洪, 戴尔阜, 何大明. 我国西南纵向岭谷区环境与发展问题初步研究. *地理科学进展*, 2005, 24(1): 31-40.]
- [6] He Daming, Wu Shaohong, Peng Hua et al. A study of ecosystem changes in longitudinal range-gorge region and transboundary eco-security in Southwest China. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 338-344. [何大明, 吴绍洪, 彭华 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 338-344.]
- [7] Zhou Changhai, Wu Shaohong, Dai Erfu et al. Vapor corridor phenomenon and response of vegetation NPP in longitudinal range-gorge region. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl.): 97-107.
- [8] Hao Chengyuan, Dai Erfu, Wu Shaohong et al. Research on barrier function and spatio-temporal heterogeneity of vegetation in southern LRGR. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl.): 143-153.
- [9] Dai Erfu, Wu Shaohong, Li Shuangcheng et al. Spatial variability on vegetation parameters in longitudinal range-gorge region. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl.): 1-8.
- [10] Li Shaojuan, He Daming, Zhang Yiping. Spatio-temporal variation and the law in regional differences of precipitation in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR). *Chinese Sciences Bulletin*, 2007, 52(Suppl. II): 51-63. [李少娟, 何大明, 张一平. 纵向岭谷区降水量时空变化及其地域分异规律. *科学通报*, 2007, 52(增刊II): 51-63.]
- [11] Li Zongxing, He Yuanqing, Xin Huijuan et al. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Mts. Hengduan Region during 1960-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 563-579. [李宗省, 何元庆, 辛惠娟 等. 横断山区 1960-2008 年气温和降水时空变化特征. *地理学报*, 2010, 65(5): 563-579.]
- [12] Hu Jinming, He Daming, Wu Shaohong et al. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(3): 281-292. [胡金明, 何大明, 吴绍洪 等. 纵向岭谷区北回归线一带年降水区域分异特征. *地理学报*, 2010, 65(3): 281-292.]
- [13] Li Yungang, He Daming, Ye Changqing. The variation of runoff of Red River Basin in Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 41-49. [李运刚, 何大明, 叶长青. 云南红河流域径流的时空分布变化规律. *地理学报*, 2008, 63(1): 41-49.]
- [14] Pan Tao, Wu Shaohong, Dai Erfu et al. Relationships between surface pollen and spores assemblages and environmental difference in the southern subtropics of Yunnan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 151-160. [潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜 等. 云南亚热带南部孢粉空间组合特征及其与环境分异的关系. *生态学报*, 2009, 29(1): 151-160.]
- [15] Pan Tao, Wu Shaohong, Dai Erfu et al. Significance of pollen distribution to the barrier function of the longitudinal range-gorge region, Southwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(4): 660-670.
- [16] Zhang Xinshi. *Vegetation Map of the People's Republic of China (1:1 000 000)*. Beijing: Geological Publishing House, 2007. [张新时. *中华人民共和国植被图 (1:100 万)*. 北京: 地质出版社, 2007.]
- [17] Hutchinson M F. The application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation//Jasper J D. BMRC Research Report No.27, Data Assimilation Systems. Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991, 104-113.
- [18] Hutchinson M F, Gessler P E. Splines: More than just as smooth interpolator. *Geoderma*, 1994, 62: 45-67.
- [19] Francis P H O, John T Riedel. *Precipitable water over the United States, Vol. 2: Semimonthly Maxima*, NOAA Technical Report NWS 20, July 1979.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [21] Wu Jianguo. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. 2nd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2007. [邬建国. *景观生态学—格局、过程、尺度与等级*. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.]
- [22] Grinsted A, Jevrejeva S, Moore J. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical

Ecological Effects of Longitudinal Range-Gorge Land Surface Pattern and Its Regional Differentiation

PAN Tao¹, WU Shaohong^{1,2}, HE Daming³, DAI Erfu¹, LIU Yujie¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *Institute of Tibetan Plateau Research, Beijing 100085, China;*

3. *Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China)*

Abstract: The land surface pattern of Longitudinal Range-Gorge Region with towering mountains and deep valleys arranged vertically side by side has significant effects on physical environments and eco-geographical differentiation in Southwest China. Based on 1:50,000 DEM data, monthly meteorological and hydrological records, NDVI and NPP derived from MOD13 and MOD17, together with 1:1,000,000 vegetation types map, we select surface atmospheric water vapor content, precipitation, aridity/humidity index, and surface runoff as water indices; air temperature and accumulated temperature as temperature indices, and solar radiation as a heat index to study the hydrothermal pattern, regional differentiation of ecosystem structure and function and main influencing factors. The ANUSPLIN model, wavelet analysis, GIS spatial analysis and landscape pattern analysis were used to reveal the effects of land surface pattern on eco-geographical regional differentiation. Results show that the water, temperature and heat have significant differences along the latitudinal direction with intermittent difference and longitudinal direction with continuous extension, which reflects the special "corridor-barrier" effect of longitudinal range-gorge terrain, in which the vertical mountain and valleys on the surface of natural material and energy transport mainly showed significant north-south corridor and diffusion effects and the role of east-west barrier and barrier effect. The longitudinal range-gorge terrain also have important impacts on the spatial pattern of vegetation landscape diversity, ecosystem structure and function, which is the main influencing factor affecting the spatial distribution of vegetation landscape diversity and ecosystems pattern. Wavelet variance analysis reflects the spatial anisotropy of environmental factors as well as NDVI and NPP. The wavelet coherence reveals the spatial distribution of NDVI and NPP influencing factors, and also the quantitative degree of control. Conclusions believe that the longitudinal range-gorge land surface pattern is the main influencing factor of the eco-geographical elements. Under the interaction of the zonality law and the non-zonality "corridor-barrier" effects, the spatial differentiation formed in the eco-geographical system.

Key words: Southwest China; Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR); "corridor-barrier" effect; eco-geographical region; spatial differentiation