

文章编号: 1008- 2786- (2009) 6- 663- 08

青藏高原植被垂直带与气候因子的空间关系

许娟¹, 张百平², 谭靖^{2,3}, 孙然好⁴, 姚永慧²

(1. 农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039
4. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要: 集成了青藏高原气候区 149个山地植被垂直带数据, 利用国家基本气象台站自建站以来到 2001年的地面观测日气象数据, 计算了地面的温暖 (WI)、寒冷 (CI)、湿润 (MI)、吉良龙夫 (Kia) 干湿指数、干燥度 (Idm) 等水热指数, 运用 GIS 的空间分析模块, 模拟了青藏高原水热条件的空间分布形势, 探讨山地植被垂直带谱分布规律与制约因子的定量指标。结果表明: 在高原的东北部、西北边缘, 以荒漠、荒漠草原、山地森林、山地草原、灌丛、草甸为组合的半干旱、干旱结构向高原腹地以高寒草原、高山草甸、荒漠带组合的高寒干旱带谱结构的变化; 东南、南部边缘, 以温暖湿润为特征的以森林带为优势带谱组合结构逐渐向寒冷的高原中心变化; 高原的地势效应, 致使的水热形势呈现从中央向边缘变化的趋势是致使青藏高原植被垂直带谱分布的重要原因。

关键词: 青藏高原; 垂直带谱; 分布; 气候

中图分类号: P461 Q948.3 P966.8

文献标识码: A

山地最基本的特征之一就是气候随海拔增高的变化导致植被、土壤及整个自然地理综合体的垂直分异, 形成能够反映山地自然特点的具有一定排列顺序和结构的垂直带谱^[1,2]。山地垂直带研究是传统自然地理学研究的重要内容及研究山地的最基本方法。山地垂直带研究可以追溯到 19世纪德国地理与博物学家洪堡对南美安第斯山的观察和研究, 多年来我国学者一直从事着有关方面的研究, 取得了很大进展^[3-17], 特别是山地垂直带信息系统的构建, 实现了山地垂直带数据的集成, 为不同空间尺度上整个带谱的全面分析提供了有力的手段。山地垂直带比水平地带狭窄 1 000倍, 变化梯度大, 对气候因子的反应灵敏, 历来受植被生态学家的关注^[18]。植被对气候具有一定的指示意义, 明晰各种植被垂直带界限的影响因素, 将有助于推进对植被垂直带更细致地认识和研究气候变化对植被的影响, 进而, 为区域生态管理提供科学依据。

青藏高原作为地球的“第三极”, 是气候变化的

敏感区^[19,20], 它的存在对其本身和毗邻地区的自然环境和人类活动, 甚至对全球环境变化都有深刻的影响^[21]。我国境内的青藏高原地域辽阔, 西起帕米尔高原, 东接秦岭, 横跨 31个经度, 东西长约 2 700 km; 南自东喜马拉雅山脉南麓, 北至祁连山西段北麓, 纵贯约 13个纬度, 南北宽达 1 400 km, 总面积约 $250 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占我国陆地总面积的 1/4。青藏高原的边缘及内部山地发育了丰富的植被垂直带谱类型, 是研究山地植被垂直带谱结构和空间分布规律的理想场所。

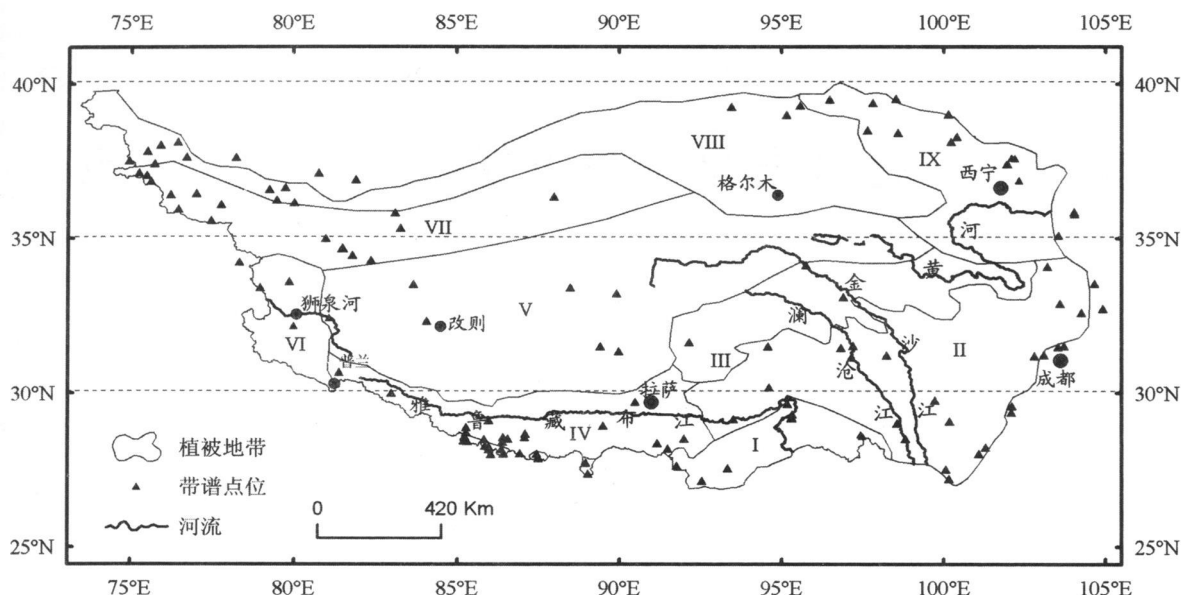
1 数据及方法

通过查阅 20世纪 50年代以来公开发表的文献及未发表的青藏高原科学考察资料, 收集到共计 149个分布在研究区山地植被垂直带谱数据^[22-40], 经过准化处理, 将所有数据集成到山地垂直带信息系统内^[17,41]。

收稿日期 (Received date): 2008- 11- 17; 改回日期 (Accepted): 2009- 04- 15.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (40571010)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金共同资助。 [Natural Science Foundation of China No. 40571010 Special Foundation of Central Public Affairs for Basic Research in Universities and Institutes]

作者简介 (Biography): 许娟 (1977-), 女, 辽宁人, 博士, 助研, 从事自然地理学与 GIS 应用研究。 [Xu Juan (1977-), female, Ph. D. of GIS, Assistant Prof. in physical geography and applied GIS. E-mail: xujuan@jeda.org.cn]



I: 季雨林带, II: 藏东川西山地针叶林带, III: 那曲玉树高寒灌丛草甸带, IV: 藏南山地灌丛草原带, V: 羌塘 青南高寒草原带, VI: 阿里山地半荒漠与荒漠带, VII: 昆仑高寒半荒漠与荒漠带, VIII: 柴达木山地荒漠带, IX: 青东祁连山地草原与针叶林带

图 1 山地植被垂直带点位及气象台站分布

Fig 1 Sites of vertical vegetation belts and weather stations

采用 1960 年中央气象局出版的中国气候区划图中的青藏高原气候区作为研究范围^[42], 按每隔 5 个纬度将整个高原区划分为北 (35~40°N)、中 (30~35°N)、南 (30°N 以南) 三小区, 应用 ArcGIS Surfer 等软件提供的空间分析、插值分析方法, 模拟和分析研究区高山草甸带分布及气候条件的空间规律。

研究中所用的气象资料由国家气象局提供的自建站到 2000 年全国气象台站的日气象数据集 (图 1), 并计算了多年平均月、年降水量和多年月平均气温、寒冷指数 (CI)、温暖指数 (WI)、湿润指数 (MI)、Kira 干湿指数和 Kira 干燥度等水热气候指数。水热指数的计算方法如下:

1. 温暖指数^[43]

$$WI = \sum_{i=1}^n (t_i - 5)$$

其中, t_i 为平均温度为 5°C 以上的第 i 个月的平均温度, n 为月平均气温 > 5°C 的月数, WI 的单位是 °C 月。

2. 寒冷指数 (Coldness index)

$$CI = \sum_{i=1}^n (5 - t_i)$$

即月平均气温低于 5°C 的总和。

3. 吉良龙夫 (Kira) 干湿指数^[44]

$$K = P / (WI + 20), WI \leq 100$$

$$K = 2 / (WI + 140), WI > 100$$

其中 P 为年平均降水, 单位为 mm, WI 为温暖指数。

4. 湿润指数^[45]

$$MI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{2} - T_i \right)$$

式中 P_i 为月平均气温 > 5°C 的各月平均降水量 (mm), T_i 为月平均气温 > 5°C 的各月平均气温 (°C), n 为月平均气温 > 5°C 的月份数。

5. Kira 干燥度^[46]

$$I_{dm} = \frac{P}{T - 10}$$

式中 I_{dm} 即 de Martonne 干燥度, P 为平均降水量 (mm), T 为平均温度 (°C)。

2 结果与讨论

2.1 北部区 (35~40°N) 山地垂直带谱分布规律

青藏高原北部从东向西主要有祁连山、阿尔金山、昆仑山三大山系, 从各山地北坡的植被垂直带谱的分布, 可以看出: 除连山的东端的基带为山地草原或山地荒漠草原、昆仑山西端为高寒草原外, 整个青藏高原北侧北坡山地植被垂直带的基带为山地荒漠带; 荒漠带的上限高度从东至西上升, 带谱宽度在阿

尔金山为最宽,且以此为界东侧由东向西,荒漠带谱宽逐渐增大,西侧谱宽则逐渐减小,祁连山东段荒漠带的谱宽为 250 m,中段 400~500 m,西段 630~1 000 m,阿尔金山 1 200 m,昆仑山的恰克拉克为 300 m,分布上限海拔分别为 2 000 m、2 300 m、2 500 m、2 850 m、3 500 m;镜铁山(97.83°E, 39.38°N)以西的山地没有森林带,带谱主要以荒漠草原、山地草原和高寒草原为主,以东存在山地森林带或森林草原带,森林带分布在 2 500~3 300 m 之间,并且有高山草甸、灌丛草甸带发育;随着山体基面海拔的升高,亚冰雪带的高度从东向西逐渐升高;总体上,昆仑山、祁连山西段和阿尔金山的植被带谱简单,由荒漠草原、荒漠草原、山地草原、高寒草原、高山草甸五个植被带组成,祁连山中东段带谱复杂,森林、草原、灌丛、草甸都有发育。

2.2 中部区(30~35°N)山地垂直带谱分布规律

分布在青藏高原中部区 30~35°N 的主要有冈底斯山、唐古拉山、念青唐古拉山、巴颜喀拉山、横断山等山脉,从各山地植被垂直带谱的空间分布可以看出:随着基面海拔的增加,亚冰雪带的下限由东向西分布的高度逐渐升高;山地森林带主要分布在波密以东的山地,且森林带为优势带,森林带的上限自东向西逐渐升高,东侧森林带上限高度为 3 400~3 700 m,西侧为 4 300~4 400 m,山地植被垂直带谱中无高寒草原植被带,主要为阔叶林、针阔混交林、针叶林、灌丛草原、高山草甸、高山荒漠、灌丛草甸等植被带的组合;波密以西的高原区山地植被垂直带谱中无森林带,主要为灌丛、高山草甸、高寒草原、高寒荒漠带的组合。

2.3 南部区(30°N 以南)山地垂直带谱分布规律

30°N 以南的青藏高原区山地植被垂直带谱分布的特点以灌丛、高寒草原、荒漠、高山草甸的组合的山地垂直带谱分布在基面海拔超过 4 000 m 的山地,如阿里萨噶(83°E)以西、珠峰地区;含有森林带的山地植被垂直带谱分布在基面海拔在 4 000 m 以下的山地,且森林带为优势带,森林带的种类多,有雨林、季雨林、常绿阔叶林、针叶林和针阔混交林等,森林带的上限可达 4 200 m 左右,植被带谱主要为森林带与山地灌丛、灌丛草甸、高山草甸带的组合;含有灌丛草原和高寒草原带的山地植被垂直带谱分布在 92°E 以西的山区。

2.4 山地垂直带谱分布与水热条件的关系

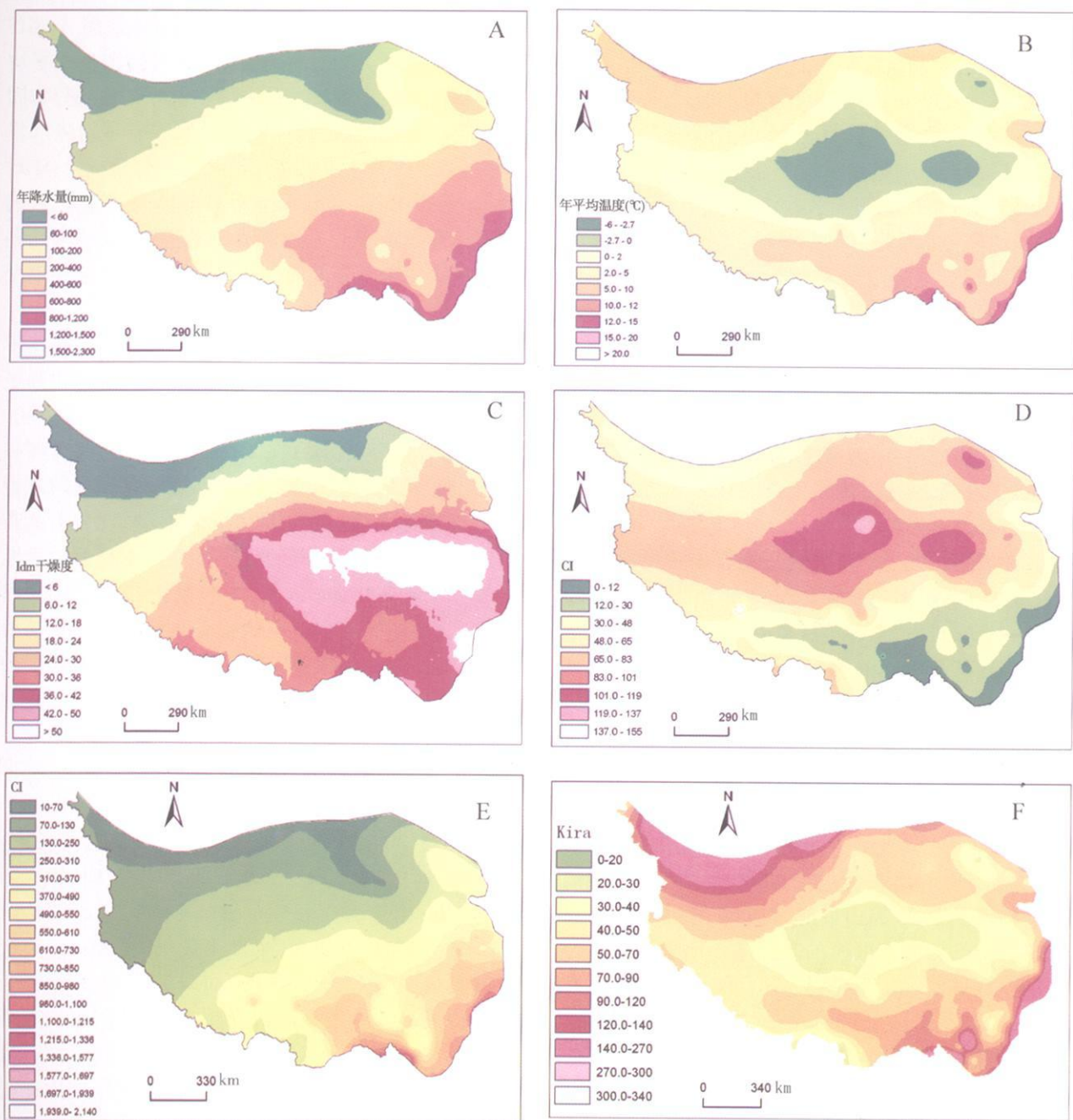
运用中国气象局自建站至 2000 年的日气象数

据,计算得到多年平均的气候指标,并运用 ArcGIS 空间分析工具,绘制得出青藏高原气候区多年平均气温、降水量、干燥度、湿润指数、温暖指数的分布图(图 2)。分析发现:青藏高原区域多年平均降水量和湿润指数(MI)由东南向西北呈条带状减少;年均气温、寒冷指数(CI)、Kira 指数、K_{dm} 干燥度指数的分布以藏北为中心呈近同心圆状分布,这种水热条件的分布与山地植被垂直带谱结构从中央向四周变化的分布规律比较吻合。

处于北部(35~40°N)边缘区,温暖指数相差不大,年均温都在 2~5℃的范围,但东部要比西部更湿润一些,东北边缘的多年平均降水量在 200~400 mm 间,湿润指数(MI)在 250~500 范围内,青藏高原东北边缘的祁连山地,山地植被垂直带谱的基带为荒漠或荒漠草原带,垂直带为山地草原、山地森林、灌丛、草甸和高寒草原带的组合;中北部边缘区的降水量在 200 mm 以下,湿润指数(MI)在 250 以下,西北边缘的昆仑山地植被垂直带谱为山地荒漠带为基带,山地草原、高寒草原、高寒草甸垂直带的组合;可以说明湿润条件造成了青藏高原北部山地植被垂直带谱由东向西荒漠带带幅宽度增加,分布高度上升的原因,并致使高原东北边缘的山区发育了山地森林带。

中部(30~35°N)是青藏高原的寒冷核心带,中心位于 88~94°E、33~34°N。寒冷指数 CI 年均温和 Kira 指数的空间分布以该中心呈同心圆状向四周逐渐增大,中心的年均气温在 -2.7~-6℃,Kira 指数在 0~20,CI 在 83~137 范围内;K_{dm} 干燥度的空间分布从中心向四周减小,可见该地带为高原最为寒冷干燥的区域,因此中西部区域发育着以高寒草原、高山草甸、高寒荒漠为组合特征的山地植被垂直带谱。此中心也与高山草甸上限高度的极值分布区一致,说明了温度条件制约了高山草甸的分布上限。

30°N 以南的青藏高原区较中北部温暖湿润,特别是在东南部,是水热条件最好的区域,年降水量 600~1 200 mm,年均温 > 5℃,分布着以森林带为基带和优势带的带谱:如东南边缘的横断山地的基带为森林带,常绿阔叶林、针阔混交林或落叶针叶林,垂直带为针阔混交林、落叶针叶林、灌丛草甸、高山草甸带的组合,其森林带为优势带;南缘的东、中喜马拉雅山系,基带为森林带,垂直带为雨林、季雨林、山地常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、灌丛、草甸、



A: 多年平均降水量 (mm); B: 多年平均温度 (°C); C: Ikm 干燥度 (mm/°C); D: 寒冷指数 CI (°C); E: 湿润指数 (MI); F: 吉良龙夫 (Kira) 干湿指数。

图 2 青藏高原气候区温、湿度指数分布

Fig 2 The distribution of warmth and wetness indices in Qinghai-Tibet Plateau

灌丛、草原带、高山草甸带的组合; 湿度由东向西逐渐减小, 位于喜马拉雅山脉的雨影区, 年降水量较少, 介于 200~600 mm 之间, 在 0~5°C 之间, 不足以维持森林的生长, 从而分布以灌丛或灌丛草甸、草原带为基带的垂直带谱, 高原西南缘的山地植被垂直带基带为高寒荒漠带, 垂直带为高寒草原带; 高原腹地的唐古拉山脉、羌塘高原山地的基带为高寒草原

亦为优势带, 垂直带谱为灌丛草甸、高山草甸的组合为特征。

总体上说, 青藏高原巨大的地势效应, 使水热条件产生由中央向四周渐变的格局, 进而形成了山地植被垂直带谱呈现自边缘向中央有规律变化的空间分布格局: 即东北部、西北边缘以荒漠或草原为基带的半干旱、干旱结构向高原腹地高寒干旱带谱结构

表 1 青藏高原基带的多年平均水热指数
Table 1 Mean annual temperature-humidity indices of base belts on Qinghai-Tibet Plateau

基带	寒冷指数 (℃)	干燥度指数 (mm/℃)	年降水量 (mm)	年均气温 (℃)	最冷月气温 (℃)
高寒草原带	858	30.0	245.2	-0.4	-12.58
高寒灌丛草甸带	758	51.4	524.8	-0	-11.47
山地草原与针叶林带	688	29.0	350.4	2.1	-11.7
山地荒漠与半荒漠带	70	9.5	85.4	2.0	-10.8
高寒半荒漠与荒漠带	58	9.7	84.0	5.2	-9.8
山地灌丛草原带	42	27.8	384.4	4.1	-5.4
山地针叶林带	29	42.5	660.4	6.7	-3.0
季雨林带	15	39.2	934.6	11.7	3.9

的变化,从东南、南部边缘以温暖湿润的森林带为优势的带谱结构逐渐向以高寒草原和荒漠带为主的寒冷的高原中心变化。

将青藏高原植被分布的基带^[47]与各气候指数图叠加,并进行统计分析得出(表 1):季雨林带所处区域的多年平均温度与降水量最高,寒冷指数最低,对应的多年平均降水量约为 934.6 mm,年均气温约为 11.7℃,最冷月气温约为 3.9℃,Idm 干燥度约为 39.2 mm/℃,寒冷指数约为 15℃;山地针叶林带与季雨林比较,前者对应的降水量和气温都比后者小,寒冷指数和 Idm 干燥度较大;山地灌丛草原带对应的 Idm 和降水量与山地草原与针叶林带相近,Idm 分别为 27.8 mm/℃和 29.0 mm/℃,降水量分别为 384.4 mm 和 350.4 mm,但其寒冷指数(为 42℃)明显比山地草原与针叶林带(为 688℃)小,其最冷月气温也明显比后者大,说明热量相对于水分条件来说,是制约山地草原与带针叶林带和山地灌丛草原带分布的主要因素;高寒草原带比高寒灌丛草甸带对应的 Idm 和年降水量大,Idm 分别为 30.0 mm/℃和 51.4 mm/℃,年降水量 245.2 mm 和 524.8 mm,说明高寒灌丛草甸带的气候条件较高寒草原带更湿润一些;高寒半荒漠与荒漠带和山地荒漠与半荒漠带对应的年降水量分别为 84.0 mm 和 85.4 mm,Idm 干燥度分别为 9.7 mm/℃和 9.5 mm/℃,说明极其干燥的气候条件制约着此两个植被带的分布。

3 结论

山地垂直带谱的分布由边缘向中心呈现规律性变化。在高原的东北部、西北边缘以荒漠、荒漠草

原、山地森林、山地草原、灌丛、草甸为组合的半干旱、干旱结构向高原腹地以高寒草原、高山草甸、荒漠带组合的高寒干旱带谱结构的变化,东南、南部边缘以温暖湿润为特征的以森林带为优势带谱组合结构逐渐向寒冷的高原中心变化。

青藏高原多年平均降水量和湿润指数(MI)由东南向西北呈条带状减少;年均气温、寒冷指数(CI)、Kira 指数、Idm 干燥度指数的分布以藏北为中心呈近同心圆状分布;青藏高原巨大的地势效应,使水热条件产生由中央向四周渐变的格局,进而形成了垂直带谱从边缘向中央呈现有规律的分布格局

从各植被基带分布区域的平均水热指数情况上看,季雨林带对应的水热条件最好,其多年平均降水量在 934.6 mm,年均气温在 11.7℃,最冷月气温在 3.9℃,Idm 干燥度为 39.2 mm/℃,寒冷指数约为 15℃;山地针叶林带与季雨林比较,前者对应的降水量和气温都比后者小,寒冷指数和 Idm 干燥度较大;山地灌丛草原带与山地草原与针叶林带对应的 Idm 分别为 27.8 mm/℃和 29.0 mm/℃,降水量分别为 384.4 mm 和 350.4 mm,寒冷指数分别为 42℃和 688℃;高寒草原带比高寒灌丛草甸带对应的 Idm 和年降水量大,Idm 分别为 30.0 mm/℃和 51.4 mm/℃,年降水量 245.2 mm 和 524.8 mm;高寒半荒漠与荒漠带和山地荒漠与半荒漠带对应的年降水量分别为 84.0 mm 和 85.4 mm,Idm 干燥度分别为 9.7 mm/℃和 9.5 mm/℃。

参考文献 (References)

[1] Zhang Baiping Yao Yonghui Mo Shenguo et al Digital spectra of altitudinal belt and their hierarchical system [J]. *Journal of Mountain Science* 2002, 20(6): 660~ 665 [张百平,姚永慧,莫申国,

- 等. 数字山地垂直带谱及其体系的探索 [J]. 山地学报, 2002 20 (6): 660~ 665]
- [2] Zhang Baiping Zhou Chenghu Chen Shupeng The Geo- info- spectrum of montane altitudinal belts in China [J]. *Acta Geographical Sinica*, 2003, 8(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 8(2): 163~ 171]
- [3] Zhang Xinshi The geographical distributing of forest in east Tian Shan Mountain [A]. In The symposium of the natural conditions in Xinjiang Uygur Autonomous Region [C]. 1959: 201~ 226 [张新时. 东天山森林的地理分布 [A]. 见: 新疆维吾尔自治区的自然条件论文集 [C]. 1959: 201~ 226]
- [4] Li Shiyong The characteristics formation and the relations with drought of vegetation on north slope of Kunlun Mountain [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1960 9(1): 16~ 31 [李世英. 昆仑山北坡植被的特点、形成及其旱化的关系 [J]. 植物学报, 1960 9(1): 16~ 31]
- [5] Li Shiyong Zhang Xinshi The Classification principles and characteristics of structure types of vertical vegetation zonation of mountains in Xinjiang [J]. *Acta Phytocologia et Geobotanica Sinica*, 1966 1(1): 132~ 141 [李世英, 张新时. 新疆山地森林植被垂直带结构类型的划分原则和特性 [J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1966 1(1): 132~ 141]
- [6] Huang Xichou Structure types of variable zones form mountains in the Eurasia [A]. In: Proceedings of national 1960 geographical symposium [C]. Beijing: Science Press, 1962 67~ 74 [黄锡畴. 欧亚大陆温带山地垂直自然带结构类型 [A]. 见: 1960年全国地理学术会议论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 1962 67~ 74]
- [7] Hou Xueyu. On the characteristic of altitudinal belt spectra in vegetation regions of China [A]. In: Collection of Abstracts of Papers for the Thirtieth Annual Meeting of China Flora Association [C]. 1963: 254~ 258 [侯学煜. 论中国各植被区的山地垂直植被带谱的特征 [A]. 见: 中国植物学会三十周年年会论文摘要汇编 (中国植物学会) [C]. 1963 254~ 258]
- [8] Ma Rongzhi General principles of geographical distribution of mountain soils in China [J]. *Acta Edologica Sinica*, 1965, 13(1): 1~ 7 [马溶之. 中国山地土壤的地理分布规律 [J]. 土壤学报, 1965 13(1): 1~ 7]
- [9] Liu Huaxun The Vertical Zonation of Mountain Vegetation in China [J]. *Acta Geographical Sinica*, 1981 36(3): 267~ 279 [刘华训. 我国山地植被的垂直分布规律 [J]. 地理学报, 1981 36(3): 267~ 279]
- [10] Li Wenhua Zhou Pekun. The research on division principle and mathematic model of dark coniferous forest in Eurasia [J]. *Natural Resource*, 1979, 1: 21~ 34 [李文华, 周沛村. 暗针叶林在欧亚大陆分布的基本规律及其数学模型的研究 [J]. 自然资源, 1979 1: 21~ 34]
- [11] Ni Wenyuan Theoretical analysis of physico-geographical zonation [J]. *Acta Geographical Sinica*, 1980 35(4): 288~ 298 [牛文元. 自然地带性的理论分析 [J]. 地理学报, 1980 35(4): 288~ 298]
- [12] Zheng Du, Li Bingyuan Evolution and Differentiation of the physico-geographical Environment of Qinghai-Xizang plateau [J]. 1990 9(2): 1~ 10, 60~ 69 [郑度, 李炳元. 青藏高原自然环境的演化与分异 [J]. 地理研究, 1990 9(2): 1~ 10, 60~ 69]
- [13] Jiang Zhongxin Discussion on the mathematical model of physical zonality [J]. *Acta Geographical Sinica*, 1982 37(1): 98~ 103 [蒋中信. 关于自然地带性数学模式之商讨. 地理学报 [J]. 1982 37(1): 98~ 103]
- [14] Fang Jingyun Three-dimension distribution of forest zones in east Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(2): 161~ 167 [方精云. 东亚地区森林植被带的三维空间分布 [J]. 地理学报, 1995 50(2): 161~ 167]
- [15] Zheng Yuanchang Wang Meijuan, Wu Zhengfang A study on the model of the vertical distribution of natural belts in the southeastern of The Qinghai-Tibet Plateau and their ecological analysis [J]. *Journal of Natural Resources*, 1996 11(3): 249~ 255 [郑远长, 王美娟, 吴正方. 青藏高原东南部自然带垂直分布的数学模型及生态学研究 [J]. 自然资源学报, 1996 11(3): 249~ 255]
- [16] Wang Xinhong On the Layer-Belt of A Pine Meadow on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Mountain Research*, 1997, 15(2): 67~ 72 [王秀红. 青藏高原高寒草甸层带 [J]. 山地研究 (现《山地学报》), 1997 15(2): 67~ 72]
- [17] Zhang Baiping Wu Hongzhi Integration of data on Chinese mountains into a digital altitudinal belts system [J]. *Mountain Research and Development*, 2006 26(2): 163~ 171
- [18] H. Walter World Vegetation-Ecosystem of Terrestrial Biosphere [M]. Beijing: Science Press, 1984 [H. 沃尔特. 世界植被—陆地生物圈的生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1984]
- [19] Kutzbach J E, Prell W L, Rudd J W F. Sensitivity of Eurasian Climate to surface uplift of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geology*, 1993 101: 177~ 190
- [20] Yao Tandong Zhu Liping The response of environmental changes on Tibetan plateau to global changes and adaptation strategy [J]. *Advances in Earth Science*, 2006 21(5): 459~ 464 [姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策 [J]. 地球科学进展, 2006 21(5): 459~ 464]
- [21] Sun Honglie The Formation and Evolution of Qinghai-Xizang Plateau [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1996 1~ 3 [孙鸿烈. 青藏高原的形成演化 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996 1~ 3]
- [22] Hou Xueyu, Zhang Xinshi Vertical distribution pattern of mountain vegetation in China [A]. In: Vegetation of China [C]. Beijing: Science Press, 1980 738~ 745 [侯学煜, 张新时. 中国山地植被垂直分布的规律性 [A]. 见: 中国植被 [C]. 北京: 科学出版社, 1980 738~ 745]
- [23] Chen Guichen Peng Min, Huang Rongfu et al Vegetation characteristics and distribution in the Qilian Mountain region [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1994 36(1): 63~ 72 [陈桂琛, 彭敏, 黄荣福, 等. 祁连山地区植被特征及其分布规律 [J]. 植物学报, 1994 36(1): 63~ 72]
- [24] Zheng Du, Zhang Baiping A Study on The altitudinal belts and environmental problems of the Karakoram and west Kunlun mountains [J]. *Journal of Natural Resources*, 1989 4(3): 254~ 266 [郑

- 度, 张百平. 喀喇昆仑山—西昆仑山地区的垂直自然带、环境和自然保护问题 [J]. 自然资源学报, 1989, 4(3): 254~266]
- [25] Zhang Baiping Physical features and vertical zones of the Karakoram and Ali-Karakoram mountains [J]. *Journal of Arid Land Research & Environment* 1990 4(2): 49~63 [张百平. 喀喇昆仑山—阿里喀喇昆仑山的自然特点和垂直自然带 [J]. 干旱区资源与环境, 1990 4(2): 49~63]
- [26] Wang Guohong Ren Jizhou Zhang Zhe A study on the population diversity of plant community in Hexi mountain Oasis desert area I General Features [J]. *Acta Praticultural Scientia*, 2001, 10(1): 1~12 [王国宏, 任继周, 张自和. 河西山地绿洲荒漠植物群落种群多样性研究 I 生态地理及植物群落的基本特征 [J]. 草业学报, 2001, 10(1): 1~12]
- [27] Report Compiling Group Integrated Scientific Investigation in the Altun nature reserve and neighboring areas [J]. *Arid Land Geography*, 1986 9(4): 1~20 [报告编写组. 阿尔金山自然保护区及其毗邻地区综合科学考察 [J]. 干旱区地理, 1986 9(4): 1~20]
- [28] Zheng Yuanchang Gao Shenghuai Cai Zongxin A Preliminary Study on The vertical natural zones in the Hengdun mountain region [J]. *Mountain Research*, 1986 4(1): 75~83 [郑远昌, 高生淮, 柴宗新. 试论横断山地区自然垂直带 [J]. 山地研究 (《现山地学报》), 1986 4(1): 75~83]
- [29] Zheng Du Chen Weilie A preliminary study on the vertical belts of vegetation of the eastern Himalayas [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1981, 23(3): 228~234 [郑度, 陈伟烈. 东喜马拉雅山植被垂直带的初步研究 [J]. 植物学报, 1981, 23(3): 228~234]
- [30] Zheng Yuanchang Gao Shenghuai Trial discussion on the vertical natural zone of the mountains in West Sichuan [J]. *Mountain Research*, 1984 2(4): 237~244 [郑远昌, 高生淮. 略论川西山地的自然垂直带 [J]. 山地研究 (《现山地学报》), 1984 2(4): 237~244]
- [31] Zheng Yuanchang A study on vertical belts in Qinghai-Xizang (Tibet) plateau [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1997 9(2): 43~52 [郑远昌. 青藏高原垂直自然带结构类型研究 [J]. 云南地理环境研究, 1997, 9(2): 43~52]
- [32] Zhang Rongzhu Zheng Du YanfQinye *et al* Physical Geography of Hengdun Mountainous Region [M]. Beijing: Science Press, 1997: 108~109 [张荣祖, 郑度, 杨勤业, 等. 横断山区自然地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 108~109]
- [33] Motuo Nature Reserve 墨脱自然保护区 [EB/OL]. <http://data.sedu.org.cn/base/banutare/1021859983.shtml>
- [34] CAS Qinghai-Xizang Plateau investigation team. Vegetation of Tibet [M]. Beijing: Science Press, 1988: 251~330 [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 251~330]
- [35] Chen Changdu The Dujiangyan region-pivot sector of assemblage, differentiation and maintenance of biodiversity in northern part of Hengdun mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 20(1): 28~34 [陈昌笃. 都江堰地区——横断山北段生物多样性交汇、分化和存留的枢纽地段 [J]. 生态学报, 2001, 20(1): 28~34]
- [36] CAS Qinghai-Xizang Plateau investigation team. Research of Qinghai-Xizang plateau-Special volume of Hengdun Region (II) [C]. 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原研究—横断山考察专集 (II) [C]. 北京: 科学技术出版社, 北京, 1986: 159~168, 361~398]
- [37] The superiority and usage of tourism resource of Wolong Natural reserve 卧龙自然保护区旅游资源的优势与利用 [EB/OL]. <http://www.future-dream.com/shetuan/haohua/okl/26.htm>
- [38] Sichuan Wanglang natural reserve 四川王朗自然保护区 [EB/OL]. <http://www.517sc.com/LOOK/fengjing/wanglang.htm>
- [39] Liu Huaxun The vertical zonation of mountain vegetation in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36(3): 267~279 [刘华训. 我国山地植被的垂直分布规律 [J]. 地理学报, 1981, 36(3): 267~279]
- [40] Feng Zhicheng Sun Xuegang Zhang Chengwei *et al* Studies on the special characteristics of forest vegetation in Diebu County (I) [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1990, 25(3): 317~324 [冯自诚, 孙学刚, 张承维, 等. 迭部林区森林植物特性研究 (一) [J]. 甘肃农业大学学报, 1990, 25(3): 317~324]
- [41] Zhang Baiping Tan Ya Wu Hongzhi Design and development of mountain altitudinal belts information system of China [J]. *Geo-information Science*, 2005 7(1): 20~24 [张百平, 谭娅, 武红智. 中国山地垂直带信息系统的设计与开发 [J]. 地球信息科学, 2005 7(1): 20~24]
- [42] Central Meteorological Observatory. Climatic Divisions of China. In: Geography department of Northwest Normal University. Map Press Editor in Chief. China Physical Geography Atlas [Z]. Beijing: Map Press, 1984: 65 [中央气象局. 中国气候区划. 见: 西北师范大学地理系, 地图出版社主编. 中国自然地理图集 [Z]. 北京: 地图出版社, 1984: 65]
- [43] Yin Y., Kira T. Distribution of Forest Vegetation and Climate in the Korean Peninsula (I). Distribution of some Indices of Thermal Climate [J]. *Japanese Journal of Ecology*, 1975, 25(2): 77~88
- [44] Yin Y., Kira T. Distribution of Forest Vegetation and Climate in the Korean Peninsula (II). Distribution of Climatic Humidity/Aridity [J]. *Japanese Journal of Ecology*, 1976, 26(3): 157~164
- [45] Li Wenhua Leng Yunfa A quantitative study of vegetation distribution and hydro-thermal factors in Yunnan Hengdun mountainous region [A]. In: Research of Qinghai-Xizang Special volume of Qinghai-Xizang investigation (1) [C]. Kunming: Yunnan Press, 1983: 185~205 [李文华, 冷允法. 云南横断山区森林植被分布与水热因子相关的量化研究 [A]. 见: 青藏研究: 横断山考察专集 (一) [C]. 昆明: 云南出版社, 1983: 185~205]
- [46] de Martonne E. A Short Physical Geography [M]. New York: A. A. Knopf, 1931: 199~538
- [47] Zheng Du Zhang Rongzhu Yang Qirye On The Natural Zonation in the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979 34(1): 1~11 [郑度, 张荣祖, 杨勤业. 试论青藏高原的自然地带 [J]. 地理学报, 1979 34(1): 1~11]

Spatial Relationship between Altitudinal Vegetation Belts and Climatic Factors in the Qinghai-Tibetan Plateau

XU Juan¹, ZHANG Baiping², TAN Jing^{2,3}, SUN Ranhao⁴, YAO Yonghui²

(1. Key Laboratory of Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. Graduate School of CAS, Beijing 100049, China;

4. Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract A total of 149 altitudinal belt spectra of mountain vegetation were digitally integrated. In order to interpret the relationship between mountain vegetation belts and climatic factors, the spatial distribution of temperature-humidity indices (such as C_I, W_I, M_I, K_{ira} and I_{dm}), which are calculated from observatory data in the Qinghai-Tibetan Plateau, were analyzed by using the Spatial Analyst Tool of ArcGIS 9.0 software. The conclusions show that dry altitudinal vegetation belt spectra in the northeastern and northwestern borders of the Qinghai-Tibet Plateau consisted of some or all of desert, desert-grass, forest, shrub, and steppe; while alpine steppe, alpine meadow and alpine desert combine to form the dry and cold spectra in the middle of the plateau, and in the southern and southeastern the forest belt was preponderant. It suggested that the variation of climate from the peripheries to the central part in the plateau might influence the distribution pattern of vegetation spectra.

Key words Qinghai-Tibet Plateau; altitudinal spectrum; distribution; climate