

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 12 期 Vol.33 No.12 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 12 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 森林低温霜冻灾害干扰研究综述 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等 (3563)
- 碱蓬属植物耐盐机理研究进展 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

- 中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 徐琳, 陈效速, 杜星 (3584)
- 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等 (3594)
- 油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 李明, 王树香, 高宝嘉 (3602)
- 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响 张蕊, 王艺, 金国庆, 等 (3611)
- 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 等 (3622)
- 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应 段爱国, 张建国, 何彩云, 等 (3630)
- 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响 黄杰勋, 莫建民, 李非里, 等 (3639)
- 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等 (3648)
- 冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 张永平, 张英华, 黄琴, 等 (3657)
- 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 彭斌, 李潘林, 周楠, 等 (3668)
- 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响 陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 等 (3676)
- 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响 王文林, 王国祥, 万寅婧, 等 (3688)
- 植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 徐亚军, 赵龙飞, 陈普, 等 (3697)
- 不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 肖云丽, 印象初, 刘同先 (3706)
- 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响 曾宾宾, 邵明勤, 赖宏清, 等 (3712)

种群、群落和生态系统

- 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 袁菲, 张星耀, 梁军 (3722)
- 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价 李建军, 刘帅, 张会儒, 等 (3732)

景观、区域和全球生态

- 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应 徐宁, 王晓春, 张远东, 等 (3742)
- 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等 (3752)
- 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等 (3765)
- 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 等 (3774)
- 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应..... 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)

秦岭南北近地面水汽时空变化特征..... 蒋 冲,王 飞,喻小勇,等 (3805)

露天矿区景观生态风险空间分异..... 吴健生,乔 娜,彭 建,等 (3816)

基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 孔 艳,江 洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 潘 丹,应瑞瑶 (3837)

舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估..... 宋 科,赵 晟,蔡慧文,等 (3846)

不同基因型玉米间混作优势带型配置..... 赵亚丽,康 杰,刘天学,等 (3855)

气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响..... 陈 伟,熊 晶,陈 懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites. chenjw@163. com

DOI: 10.5846/stxb201207261066

孔艳, 江洪, 张秀英, 金佳鑫, 肖钟湧, 程苗苗. 基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较. 生态学报, 2013, 33(12): 3825-3836.

Kong Y, Jiang H, Zhang X Y, Jin J X, Xiao Z Y, Cheng M M. The comparison of ecological geographical regionization in China based on Holdridge and CCA analysis. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3825-3836.

基于 Holdridge 和 CCA 分析的 中国生态地理分区的比较

孔 艳¹, 江 洪^{1,2,*}, 张秀英¹, 金佳鑫¹, 肖钟湧¹, 程苗苗¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023; 2. 浙江农林大学国际空间生态与生态系统生态研究中心, 杭州 311300)

摘要:在前人工作基础上,对中国自然地理要素与生态地理区域的关系进行了综合分析,采用全国地形、土壤、气候、植被及遥感植被指数等数据,综合分析中国范围生态地理区域的分异规律,制订了生态地理分区的初步方案,并建立了相应的地理信息系统。基于 Holdridge 模型和 CCA 分析划分中国生态地理分区,建立了分区的指标体系,得到中国生态分区的大致界线,初步总结了各生态地理分区的地形、植被、气候等综合自然地理特征,完成对中国区域生态地理分区的划分。基于 CCA 分析的生态地理分区,不仅结合自然区划和生态地理两种方法,而且加入了生态群落和遥感数据的综合应用。结果显示,由于受到模型适用性及数据误差的原因,基于 CCA 分析的结果比 Holdridge 模型的结果更合理一些。

关键词:生态地理分区; Holdridge 模型; CCA 分析; 指标体系

The comparison of ecological geographical regionization in China based on Holdridge and CCA analysis

KONG Yan¹, JIANG Hong^{1,2,*}, ZHANG Xiuying¹, JIN Jiaxin¹, XIAO Zhongyong¹, CHENG Miaomiao¹

1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 State Key Laboratory of Subtropical Forest Science & Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China

Abstract: This paper based on the previous work for China, analysed the relationship of the geographical elements and natural ecological geographic area comprehensively, combined remote sensing with traditional ecological analysis method together. Use the national terrain, soil, and climate, vegetation and remote sensing data such as vegetation index to analyse the ecological geographic area range distribution rules, and to make the ecological geographic division of the preliminary program, then to establish the relevant geographic information system. Based on the Holdridge model and CCA analysis to divide China's ecological geographic area, this paper established a division index system, and got the general line of Chinese ecological division. Summarise the ecological geographic division of the terrain, vegetation and climate, and other comprehensive natural geographical characteristics and complete regional ecological geographic division preliminarily. Research results show that the two dividing methods have a difference in partition emphasis somewhat, but partitioning results were roughly same. The results of Holdridge model were as same as previous similar studies, in addition to the individual abnormal data, and were in accordance with the actual condition. According to the knowledge table of the 38

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2010CB950702, 2010CB428503, 2005CB422207 & 2005CB422208); 重大国际合作项目(200073819); 国家高技术研究发展计划项目(2009AA122001 & 2009AA122005); 科技部重大基础性项目(2007FY110300-08); 国家自然科学基金项目(40671132); 浙江省重大科技专项资助(2008C13G2100010)

收稿日期: 2012-07-26; 修订日期: 2013-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianghong_china@hotmail.com

kinds of life zones of global division, it appeared 32 kinds of life zones in China, in addition to the tropical thorns sparse forests, tropical extremely dry forests, tropical moist forest, tropical humid forest, and tropical rainforests, and other life zone types all have distribution in China. It presents obvious characteristics of the zonal in the space, from the east coast to inland changed by humid forest-grassland-thorn bushes-desert in proper order. From the north to the south it presented obvious latitude differences, changed by cold temperate zone-the warm temperate zone-subtropical zone-tropical zone. At the same time influenced by the factors of relative height, altitude and gradient and aspect of slope, there were some azonal areas. The result based on the analysis of CCA was in accordance with China's regional temperature distribution. Using cluster analysis in PC-ORD, and removing individual sample points for the unusual situation caused by altitude, the sample points roughly were divided into 18 districts, and then according to the sample points after the interpolation of the spatial distribution, we got the boundaries of geographic division. By spatial distribution of ecological geographic area in China we can see that the trend of ecological division was similar to the simulation results of Holdridge model approximately. The Tibet Plateau area became an independent ecological geographic area because of its special zonality. Due to complex terrain, there were many ecological geographic divisions staggered to the east and south of the Tibet Plateau. Along the Tianshan mountains boundary in Xinjiang area it was roughly divided into two ecological geographic areas. Because of the northeast region's surface structure, the geographical zones in mountains and foothills areas were obviously different from that in the northeast plain and Inner Mongolia plain. The north China plain and the middle of the Yellow River area were splited at Tainhang mountains boundaries into two geographical zones, for obvious reasons such as precipitation, monsoon. From the Qinling Mountains and Huaihe river basin to the middle and lower Yangtze plain, hilly regions in Fujian and Jiangxi provinces, it occurred as banded extension from west to east in space. The Yunnan-Guizhou Plateau differed from the former as a result of its special terrain. South of the tropic of cancer, with a boundary of the south subtropical and tropical two temperature belts of world, it was divided into two ecological geographic zones. At last, the T test results of sample points in the same area were not significant, and showed that partitioning results were reasonable.

Key Words: ecological geographic division; Holdridge model; canonical correspondence analysis; index system

近些年来全球环境不断变化,给人类生存环境带来了诸多负面影响,引起了世界各国的高度关注。为了有效地应对全球变化及其影响,国际社会和世界上有关国家积极采取措施,启动了一系列研究计划。生态地理区域系统反映了温度、水分、生物、土壤等自然要素的空间格局,及其与资源环境的匹配^[1]。生态地理分区可以有效地阐明生态系统对全球环境变化的影响,针对不同区域的生态环境问题,采取行之有效的措施,为区域发展与生态环境保护提供科学的依据。因此,生态地理区划是国内外地理学和宏观生态研究的热点问题之一。国外区域的划分起源于 18 世纪末、19 世纪初,比较著名的有全球尺度的生命地带分类(Holdridge 模型)^[2],全球生态区^[3],1935 年,英国生态学坦斯勒提出生态系统是由各个环境因子综合作用的表现。1976 年美国学者罗伯特·贝利提出美国生态地域划分方案,并且应用到气候变化结果的解释等方面^[1]。

我国生态地理分区始于 20 世纪 60 年代,以前中国的区划主要集中在自然地理区划方面,并以黄秉维、罗开富、林超、任美镔、赵松乔等为代表^[4]。1929 年竺可桢发表的《中国气候区域论》^[5]标志着我国现代自然地域划分研究的开始^[6]。黄秉维于 1940 年首次对我国植被进行了区划,并在 1958 年提出了中国综合自然区划的一般原则,并根据气候、土壤、植被特征进行了五级的划分^[7]。直到 20 世纪 80 年代,随着生态系统观点、生态学原理和方法逐渐被引入自然地域系统研究,生态地理区划研究才得以进一步深入。1988 年侯学煜先生以植被分布的地域差异为基础进行了全国的自然生态区划^[8]。郑度等人利用 1950 年以来最近 40 多年积累的大量观测数据和科研资料对中国生态地理分区区域系统进行了综合分析,并提出了生态地理分区的原则和方法、划分的指标体系和系统方案。杨勤业等人提出了生态地域划分的性质、原则和依据、指标体系,并依次拟定了中国生态地域划分方案^[9-10]。2001 年傅伯杰等人应用生态学原理和方法,揭示自然生态区域的相似

性和差异性规律以及人类活动对生态系统干扰的规律,进而进行整合和分区^[11]。解焱等人运用 GIS 技术将信息转换为各个基本单元进行数学量化分析方法来聚类得到中国生物地理区划方案^[12]。原有生态地理区域的划分主要体现为 RS、GIS 空间分析和生态群落两方面的单独使用,本文在两方面的综合运用下,结合卫星遥感数据和气候等数据,得到合理的指标体系下的生态地理分区划分。对于国内的生态地理分区方法大致分为两个阶段进行比较分析(表 1)。

表 1 国内生态地理划分方案比较表

Table 1 The comparison table of ecological and geographical division in China

	初期 20 世纪 80 年代之前 Before 1980s	20 世纪 80 年代之后 After 1980s	本文 This paper
数据 Data	使用的为 1956 年及以前的资料,数据缺乏	积累了丰富的气候观测资料	数据资料丰富,气候观测数据和遥感数据
原则方法 Principle and method	自上而下或自下而上;单线模式	自上而下与自下而上相结合;专家集成	自上而下与自下而上相结合;模型应用
指标体系 Index system	由单个要素到多要素的变化,但主要为气候指标	多要素,主要有气候指标、植被、土壤等	气候指标+植被遥感指标
优势与不足 Advantages and disadvantages	主要体现在自然地域系统划分和综合自然区划,我国生态地理区划的雏形。主要体现为地理区域的差异,指标各不相同,忽视了生态学意义	自然区划与生态地理相结合;结合 GIS 进行空间分析;引入生态系统观点、生态学原理和方法;划分层次比较鲜明,但是缺乏普遍应用性	基于 CCA 分析选取适合该区域的适合的指标;遥感、GIS 与生态群落的结合使用;缺乏人类活动因素的考虑
相关研究 Related research	竺可桢 ^[5] ——基于柯本(Koeppen)和马东男(Martonne)气候系统进行划分 黄秉维 ^[7] ——依据气候、土壤、植被的相似性和差异性,主要按照地表热量(温度)进行带的划分 任美锷 ^[13-15] ——根据影响的各地区的因素,选择地域分异的主导因素,来分出全国第一级自然区域。个别区域注意热量和水分特殊的结合	侯学煜 ^[8] ——生态区划的开始。以植被分布的地域差异为基础进行了全国的自然生态区划 解焱——注重划分方法和技术应用的研究。逐步由定性分析向定性和定量分析相结合的方向发展,区划途径将"自上而下"和"自下而上"的分区途径有机结合,运用 GIS 技术应用到生态划分当中 郑度 ^[16] ,杨勤业,傅伯杰等——主要注重生态地理区划的原则、性质、和依据、指标体系的研究	

1 数据及研究方法

1.1 数据

本文选取中国 668 个站点的多年气候数据,包括平均生物温度、蒸散发、可能蒸散、蒸散、综合湿润度指数、干燥度、温暖指数、热量系数、温暖系数、寒冷系数、干燥度系数、可能蒸散率,1 月和 7 月月平均气温、月最低气温、月最高气温、极值温度差值和年平均降水量、夏季降水量,以及利用中国 1977—2006 年 737 个站点逐日温度的观测数据,分别获得的中国 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温等数据。

本研究所使用的数据还包括土壤、DEM 和土地覆盖类型,以及基于卫星观测所获得的 2006 年全国年均 NPP、NDVI、LAI 数据。

土壤数据来自联合国粮食和农业组织(FAO Food and Agriculture Organization)的 1:500 万世界土壤图。土地利用和覆盖数据来自 EUROPE300,数据产品来自 2004 年 12 月—2006 年 6 月 300m ENVISAT/MERIS 数据,采用多维迭代聚类方法进行分类,通过 16 位专家在全球 3000 个点验证,总精度为 73%,将全球分为 22 类土地覆盖类型。数据的属性如表 2 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 Holdridge 生命地带分类方法

某一区域的植被在限定于一定气候条件下可根据其综合外貌的简单分类或更详细的个体群体所构成的

生命形式来划分,其分类的单位称为“生命地带”,并根据年平均生物温度(℃)(BT)、平均年降水量(P)与潜在性蒸散率(PER)3个气候指标为主要参数,建立了 Holdridge 生命地带模型的坐标体系与分类体系,并通过计算将全球划分为 38 种生命地带类型和 100 多个生命地带^[17]。因为植被类型及其分布可以在这 3 个气候指标的基础上予以限定,生命地带具有双重意义,它既指示一定的植被类型,又含有该类型所代表的热量和降水的一定数值幅度^[2, 18-19]。气候指标的定义和计算方法如下:

表 2 数据属性表
Table 2 Data attribute table

数据类型 Data types	数据属性 Data attributes	备注 Note
气候数据 Climate data	1951 年—1980 年 ASCII 码文件	极值温度差=月最高温度-月最低温度
土壤数据 Soil data	1995 年 FAO 1:500 万世界土壤数据	Soil feature(sand, clay 含量)
DEM	栅格数据	空间分辨率 1km
LUCC	2006 年 EUROPE 300 栅格数据	空间分辨率 1km
植被生物指标 Biological index of vegetation	2006 年 MODIS 遥感栅格数据	NPP、NDVI、LAI 空间分辨率 1km

生物温度(BT)是出现植物营养生长范围内的平均温度,在 0—30℃ 之间,日均温低于 0℃ 和高于 30℃ 者均排除在外^[12],

$$BT = 1/12 \sum_1^{12} T \tag{1}$$

式中, T 为超过 0℃ 的月均温,但是超过 30℃ 的平均温度均按 30℃ 计算;低于 0℃ 的均按 0℃ 计算。

可能蒸散(PET)是温度的函数,可能蒸散率(PER)是 PET 与降水(P)的比率:

$$PET = BT \times 58.93 \tag{2}$$

$$PER = PET/P = BT \times 58.93/P \tag{3}$$

根据 Holdridge 生命地带模型的基本思想,是计算出全国站点的生物温度、年降水量和可能蒸散率,插值后得到全国 3 个气候指标的空间分布图,将空间栅格的中心坐标(i, j)的 3 个气候指标值与各生命地带六边形中心的相应的 3 个气候指标值,进行距离计算,得到 $D_k(i, j)$, 公式如下,当 $D_k(i, j)$ 最小时,则可以认为该最小距离所对应的生命六边形就是该栅格的生命地带类型^[20-21]。

$$D_k(i, j) = \sqrt{[(BT(i, j) - BT_k)]^2 + [(P(i, j) - P_k)]^2 + [(PER(i, j) - PER_k)]^2} \tag{4}$$

式中, $BT(i, j)$ 表示年平均生物温度栅格数据的第 i 行和第 j 列的温度值; BT, P_k, PER_k 是第 k 个生命地带六边形的中心指标值; $D_k(i, j)$ 表示第 i 行 j 列栅格与第 k 个生命地带中心的距离。

考虑到气候信息的来源气象测站空间分布不均,密度不足的原因,站点外区域气象数据通常由邻近测站的观测值空间插值得到。专门针对气候数据、兼顾准确性、方便性与时间序列性比较好的方法为 ANUSPLIN 插值^[22]。本文将年平均生物温度、平均年降水量和可能蒸散率基于站点进行 ANUSPLIN 插值,从而获得年平均生物温度、年降水量和年平均可能蒸散率的点空间分布图,空间分辨率为 1KM。然后导出 3 个气候指标的 ASCII 码文件,在 Matlab 中利用上述公式(4)得到基于每个栅格的 k 值,即生命地带类型。然后,绘出等值线图,采用 Winsurf 软件和手工操作方法^[23],各点位置的确定是选择相邻网格中心的值与等值线之差来确定的,得到地理分区的界线。

1.2.2 典范对应分析(CCA)

典范对应分析(CCA),是基于对应分析发展而来的一种排序方法,将对应分析与多元回归分析相结合,每一步计算均与环境因子进行回归,又称多元直接梯度分析。CCA 分析有利于生态意义的解释,能够反映样方间在种类组成上及环境因子组成上的相似性,表现在排序图上样方较集中,群落间的界线比较模糊^[24]。其基本思路是在对应分析的迭代过程中,每次得到的样方排序坐标值均与环境因子进行多元线性回归。CCA 要求两个数据矩阵,一个是植被数据矩阵,一个是环境数据矩阵。首先计算出一组样方排序值和种类排序值

(同对应分析),然后将样方排序值与环境因子用回归分析方法结合起来,这样得到的样方排序值既反映了样方种类组成及生态重要值对群落的作用,同时也反映了环境因子的影响,再用样方排序值加权平均求种类排序值,使种类排序坐标值也间接地与环境因子相联系。箭头表示环境因子,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线的长度代表某个环境因子与群落分布和种类分布之间相关程度的大小,连线越长,相关性越大,代表这个环境因子对研究对象的分布影响越大;反之越小。箭头连线和排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高;反之越低^[25-26]。

利用 2006 年全国 668 个站点的 NDVI、LAI 和 NPP 数据作为植被数据矩阵,作为物种变量。归一化植被指数 NDVI,可以检测植被生长状态、植被覆盖度。净初级生产力 NPP 是指植物在单位时间单位面积上由光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,反映了植物固定和转化光合产物的效率。叶面指数 LAI 是指一定土地面积上植物叶面面积总和与土地面积之比,成为一个重要的植物学参数和评价指标。选取年平均 NPP、LAI、NDVI 和具有显著差异的 7 月 NDVI 4 种数据作为物种数据,用于表征地表的植被分布情况。植被可以给出非常敏感的气候变化指标,植被的宏观特性也可以成为限定生态地理分区二级划分的最佳表征指标^[27-28]。多年平均的生物温度、蒸散发、可能蒸散、蒸散、综合湿润度指数、干燥度等 27 个气候数据,和土壤类型数据、高程和土地覆盖类型数据作为环境数据矩阵,进行 CCA 分析。

利用中国 668 个气候站点多年平均的生物温度、蒸散发、可能蒸散、蒸散、综合湿润度指数、干燥度、温暖指数、热量系数、温暖系数、寒冷系数、干燥度系数和可能蒸散率等气候数据,和 1 月和 7 月月平均气温、月最低气温、月最高气温、极值温度差值和年平均降雨量、夏季降水量,利用中国 1977—2006 年 737 个站点逐日温度的 30a 观测数据,分别计算了中国 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温数据。共计 30 个数据作为环境变量,由于位于中国西南部的青藏高原地区站点缺乏,对数据进行空间插值,空间分辨率为 1km。为了方便起见,以站点为基准,并在站点缺乏的地方选取站点,并将这些站点作为样方,对站点进行缓冲区分析,缓冲区半径为 1km,取缓冲区区域内的平均值作为该样方点的指标值。同样,对土壤、高程和土地利用和覆盖类型数据,及 2006 年全国平均 NPP、NDVI、LAI 数据进行相应的处理。去除没有数据和异常的样方点,最终得到有效的 482 个样方。

1.2.3 聚类分析

聚类分析是一组将研究对象分为相对同质的群组的统计分析技术。本文在 PC-ord 软件 CCA 排序的基础上完成之后,得到影响群落地理分布的主要生态梯度的影响指标,建立新的指标体系,基于 CCA 进行分类分析。基于样本点的空间分类信息,采用 Winsurf 软件和手工操作方法绘制地理分区边界,得到全国生态地理分区图。

2 结果与分析

2.1 Holdridge 模型分类结果

按照本文多年平均数据得到生态地带空间分布图(图 1)。参照全球划分的 38 种生命地带模型知识表(表 3)^[20, 29],在中国出现了 32 种生命地带,除热带有刺疏林、热带极干旱森林、热带干旱森林、热带湿润森林、热带潮湿森林和热带雨林,其他生命地带类型在中国均有分布。在空间上呈现出明显的地带性特征,从东部沿海到内陆依次由湿润森林-草原-有刺灌丛-荒漠更替,从南到北呈现明显的纬度地带差异性,由北到南冷温带-暖温带-亚热带-热带更替。同时受到地形起伏相对高度、海拔高度及其空间格局以及坡地的坡度、坡向^[30]及海陆分布、局部水分变化、人为作用等的影响,会出现一些非地带性区域。如:在新疆荒漠地区分布着点点的绿洲。而青藏高原由于特殊地形和气候条件等原因共同作用下的生命地带类型也就比较复杂,存在极大的不稳定性 and 不确定性,该区亚高山潮湿/湿润苔原和冷温带草原生命地带类型广布。四川盆地地区明显不同于其他地区,主要为亚热带湿润和潮湿森林地带。另外,生命地带类型呈环状分布,并且在生命地带更替过程当中,表现为过渡地带,这与实际情况相符合。

我国生命地带类型的空间分布是我国生命温度、降水量和可能蒸散率等气候条件综合作用下的结果,与范泽孟等人获得的中国 Holdridge 生命地带平均中心时空分布较为相近^[31]。对中国生命地带面积作了比较,

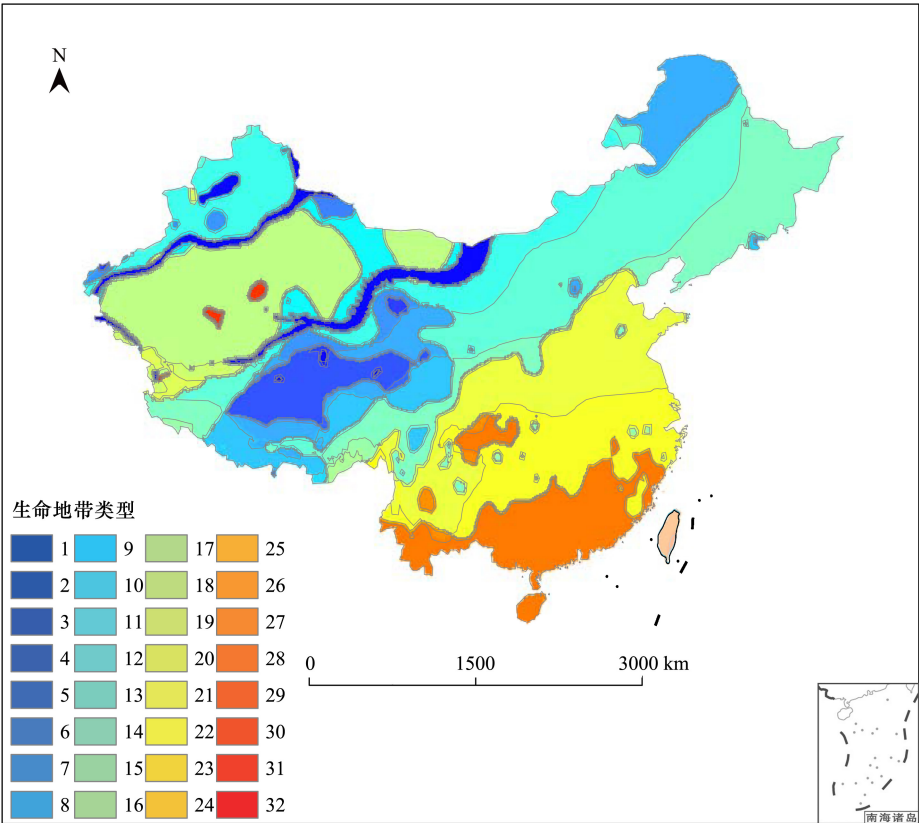


图1 Holdridge 生命地带类型

Fig.1 Holdridge Life zone model

表3 生命地带模型知识表

Table 3 Life zone model knowledge table

编号 No.	生命地带类型 Life zone type	年生物温度 Biological temperature/℃	年降水量/mm Annual precipitation	可能 蒸散率	编号 No.	生命地带类型	年生物温 度/℃	年降水量 /mm	可能 蒸散率
1	冰雪	0.27	88.39	0.18	18	暖温带荒漠灌丛	14.27	177.78	5.68
1	高山荒漠	0.53	88.39	0.35	19	暖温带带刺草原	14.27	353.55	2.83
1	高山荒漠	0.53	177.78	0.18	20	暖温带干旱森林	14.27	707.11	1.41
1	高山荒漠	1.06	88.39	0.71	21	暖温带湿润森林	14.27	1414.11	0.71
1	高山荒漠	1.06	177.78	0.35	22	暖温带潮湿森林	14.27	2828.43	0.35
1	高山荒漠	1.06	353.55	0.18	23	暖温带雨林	14.27	5656.85	0.18
2	亚高山干苔原	2.12	88.39	1.41	24	亚热带荒漠	20.18	88.39	11.31
3	亚高山湿润苔原	2.12	177.78	0.71	25	亚热带荒漠灌丛	20.18	177.78	5.68
4	亚高山潮湿苔原	2.12	353.55	0.35	26	亚热带带刺疏林	20.18	353.55	2.83
5	亚高山雨苔原	2.12	707.11	0.18	27	亚热带干旱森林	20.18	707.11	1.41
6	北方荒漠	4.24	88.39	2.83	28	亚热带湿润森林	20.18	1414.21	0.71
7	北方干旱有刺灌丛	4.24	177.78	1.41	29	亚热带潮湿森林	20.18	2828.43	0.35
8	北方湿润森林	4.24	353.55	0.71	30	亚热带雨林	20.18	5656.85	0.18
9	北方潮湿森林	4.24	707.11	0.35	31	热带荒漠	33.94	88.39	22.63
10	北方雨林	4.24	1414.21	0.18	32	热带荒漠灌丛	33.94	177.78	11.31
11	冷温带荒漠	8.49	88.49	5.68	33	热带带刺疏林	33.94	353.55	5.68
12	冷温带带刺灌丛	8.49	177.78	2.83	34	热带极干旱森林	33.94	707.11	2.83
13	冷温带草原	8.49	353.55	1.41	35	热带干旱森林	33.94	1414.21	1.41
14	冷温带湿润森林	8.49	707.11	0.71	36	热带湿润森林	33.94	2828.43	0.71
15	冷温带潮湿森林	8.49	1414.21	0.35	37	热带潮湿森林	33.94	5656.85	0.35
16	冷温带雨林	8.49	2828.43	0.18	38	热带雨林	33.94	11313.71	0.18
17	暖温带荒漠	14.27	88.39	11.31					

说明:生命地带植被类型温度带是按照年生物温度划分的,与一般自然地理中所提及的温度带不同

如表 4 所示。可以发现我国主要的生命地带类型为冷温带草原、暖温带沙漠、冷温带湿润森林和冷温带干旱森林,分别约占全国面积的 13.75%、12.69%、10.75% 和 10.31%。面积较小的类型有:亚高山干苔原、亚热带荒漠、暖温带雨林、亚热带荒漠灌丛和热带荒漠灌丛,所占面积均不足 0.01%。对图中各种生命地带类型空间分布研究可以发现以下几大区域特征^[31]:

(1)青藏高原区域 青藏高原自身地势的特殊性,和气候条件的严峻使得该区生命地带类型复杂,与同纬度的我国东部沿海有着很大的不同,主要为冰雪/高山荒漠地带、亚高山干、湿润、潮湿和雨苔原地带类型,且冰雪/高山荒漠地带和亚高山潮湿苔原面积较广,且呈现东南西北走向,随着海拔的升高,由北方雨林、北方潮湿森林、北方湿润深林到亚高山潮湿苔原、亚高山湿润苔原变化。

(2)干旱、荒漠区 青藏高原北部呈现出明显不同的南疆和北疆景色,天山南部为塔里木盆地,以冷温带、暖温带和热带荒漠地带类型为主,天山北部为冷温带有刺灌丛地带,在两地交接处,地形复杂,分布着苔原和森林交错的狭长过度地带。

(3)北方半干旱、半湿润及湿润地区 冷温带草原主要分布在东北平原、内蒙古南边和华北平原西北部^[31]。长白山和小兴安岭及二者交界处分布着广大的北方湿润森林。长白山东部沿海地区为冷温带湿润森林。秦岭淮河流域以北至黄河中下游流域主要为暖温带干旱森林地带类型,除华北平原地区的泰山区,因为特殊地势原因呈现冷温带湿润森林地带。长江流域以暖温带湿润森林地带类型为主。

(4)南方湿润地区 云南南部、海南、南海诸岛、台湾南部等地区主要为亚热带湿润森林地带。

表 4 中国 Holdridge 生命地带面积表
Table 4 Area of Holdridge life zone in China

生命地带 Life zone	编号 No.	面积百分比/% Area percentage	生命地带 Life zone	编号 No.	面积百分比/% Area percentage
冰雪/高山荒漠	1	3.36	暖温带荒漠	17	12.69
亚高山干苔原	2	0.00	暖温带荒漠灌丛	18	0.75
亚高山湿润苔原	3	0.27	暖温带有刺草原	19	0.98
亚高山潮湿苔原	4	3.63	暖温带干旱森林	20	10.31
亚高山雨苔原	5	0.19	暖温带湿润森林	21	8.89
北方荒漠	6	0.45	暖温带潮湿森林	22	0.01
北方干旱有刺灌丛	7	1.48	暖温带雨林	23	0.00
北方湿润森林	8	6.18	亚热带荒漠	24	0.00
北方潮湿森林	9	3.57	亚热带荒漠灌丛	25	0.00
北方雨林	10	0.47	亚热带有刺疏林	26	0.10
冷温带荒漠	11	2.83	亚热带干旱森林	27	0.83
冷温带有刺灌丛	12	8.45	亚热带湿润森林	28	8.25
冷温带草原	13	13.75	亚热带潮湿森林	29	0.06
冷温带湿润森林	14	10.75	亚热带雨林	30	0.10
冷温带潮湿森林	15	0.57	热带荒漠	31	0.18
冷温带雨林	16	0.87	热带荒漠灌丛	32	0.00

2.2 数量分析结果

2.2.1 CCA 结果

图 2 是以全国 482 个样方的 4 个物种变量和 30 个环境因子为原始数据作的 CCA 排序图。在图中蓝色圆实点代表样方,数字代表其原始 ID 编号。环境变量的编号如表 5 所示。环境因子用直线表示,直线连线的长短表示样方的分布与该因子关系的大小,直线连线与排序轴的角度表明环境因子与该排序轴相关性的大小,直线所处的象限表示环境因子与排序轴的正负相关关系。为了计算的方便,将寒冷系数取其绝对值进行计算。为了叙述的方便我们定义象限第一象限为右上角象限,逆时针方向依次为第二、三和四象限。由于本

文研究的区域比较广,选取的样本数比较多,在 CCA 分析中会因为个别样本数据的误差,造成 CCA 结果不显著,因此,在分析过程中删除部分不显著样本点。由图 2 可以看出,样方的分布与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温、寒冷系数、1 月极端温度、年降水量极端值和海拔高度密切相关。从 Axis2 轴来看,降水以及可能蒸散等指标与 Axis2 轴密切相关,而气温以及寒冷系数等指标与 Axis1 轴关系密切,因此 Axis1 轴大致代表的是纬度地带性影响,Axis2 轴主要与经度地带性有关。可以看出大部分样本点位于一、四象限。这也与我国所处的大陆位置有关。

表 5 环境变量列表
Table 5 Environment variable

变量 Variable	编号 No.	变量 Variable	编号 No.	变量 Variable	编号 No.
年均温最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	1	综合湿润度指数	11	$\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年积温	21
年均温最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	2	干燥度	12	土壤类型	22
年均温极值差/ $^{\circ}\text{C}$	3	湿润指数	13	1 月极值最低温/ $^{\circ}\text{C}$	23
年均温/ $^{\circ}\text{C}$	4	热量系数	14	1 月极值最高温/ $^{\circ}\text{C}$	24
年降水量最低值/mm	5	温暖系数	15	7 月极值最低温/ $^{\circ}\text{C}$	25
年降水量最高值/mm	6	寒冷系数	16	7 月极值最低温/ $^{\circ}\text{C}$	26
年降水量/mm	7	干燥度系数	17	1 月月降水量/mm	27
蒸散发	8	生物温度	18	7 月月降水量/mm	28
可能蒸散	9	可能蒸散率	19	高程/m	29
蒸散	10	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温	20	土地利用与覆盖类型	30

2.2.2 聚类分析分析结果

根据影响比较显著的指标,包括年均温极端温度、年降水量极端值、干燥度、湿润指数、热量系数、干燥度系数、生物温度、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温、1 月和 7 月温度和降水数据,在 PC-ORD 中进行聚类分析,去除因个别样本点因海拔问题造成的异常情况外,将全国样本点大致分为 18 区,然后按照样本点插值后的空间分布图绘出地理分区的界线,如图 3 所示。由中国生态地理分区空间分布图可以看出生态分区的大致趋势与 Holdridge 模型模拟的结果有着很大的相似性。中国青藏高原区域因为其特殊的地带性,单独成为一个生态地理分区。在青藏高原东部和南部地区地形复杂,因而也是许多生态地理分区交错的地带。新疆地区大致沿天山山脉为界分为两大生态地理分区。东北地区的地表结构,略呈半环状的三带。山地和丘陵地带地理分区明

显区别于东北平原和内蒙古平原的生态地理分区。华北平原和黄河中游地区以太行山为界,因为明显的降水、季风等原因,呈现为两个地理分区。从秦岭淮河流域到长江中下游平原、江西福建丘陵地区,空间上为东西带状分布。云贵高原的特殊地势与前者区别开来。北回归线以南,以南亚热带和热带两个温度带为界分为两个生态地理分区。

2.2.3 检验结果

生态地理分区空间分布图的底图为世界自然基金会发布的世界生态地理分区分布图^[32]针对 18 个分区中的样本点进行 1:1 T 检验(表 5 所示),选取的指标为影响比较显著的 6 个指标,主要为干燥度、湿润指数、

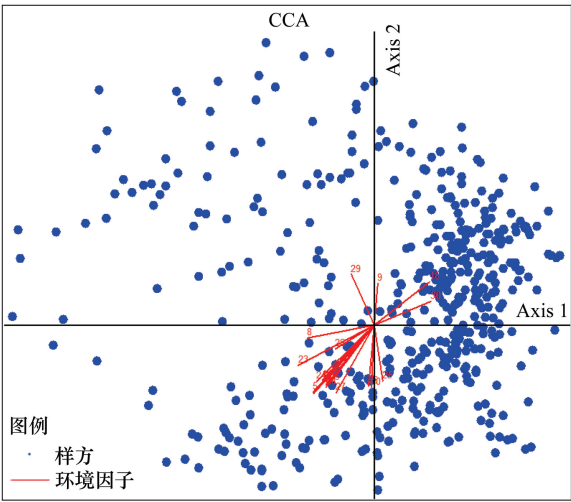


图 2 样方的 CCA 图
Fig. 2 CCA ordination of the 482 samples

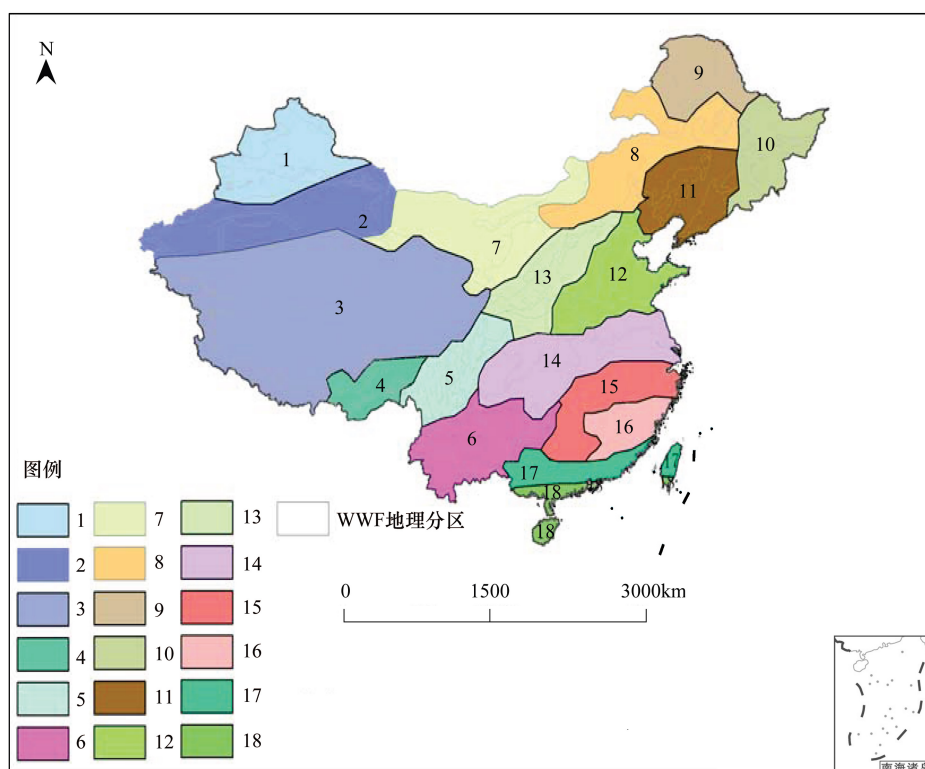


图3 中国生态地理分区图

Fig. 3 Ecological geographic zone map of China

热量系数、生物温度和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温。由表可以看出,检验区样本点的六大指标的 T 检验的显著性概率大部分大于 0.05,检验区内的个别指标小于 0.05,但是生态地理分区是多个环境因子综合作用的结果,因此从总体结果来看,样本点之间没有显著差异,因此该区的样本点可以划为同一区。

由表 5 可以看出 T 检验结果小于 0.05 的数据主要集中在区域编号为 2、12 和 18 的积温和干燥度中。区域 2 位于天山以南,南新疆区域,该区地势起伏较大,分布着盆地、沙漠和高原等地形类型,因此,气温起伏比较明显,温差较大。在该区中心区域为我国面积最大的塔克拉玛干沙漠,其周边区域为塔里木盆地,在区域的南边缘高山群系和塔里木河流域,来源于高山冰雪融水和河流的供给分布着一些绿洲。因此,区域 2 的积温数据会存在一定的偏差。区域 12 主要分布在华北平原区和黄土高原东部的落叶阔叶混交林区,东部的渤海盐化草原区域为温带季风气候,夏季雨热同期,而鲁中南山区大陆性季风气候显著,该区在干燥度和积温指标上表现出一定的差异性。区域 18 大致在北回线以南,受亚热带季风气候的影响,干湿分明,且受地理位置影响,差异会有所不同,同时受数据的限制,从而,出现该地区干燥度略有不同。由于青藏高原地理位置的特殊性^[33],海拔较高,属高寒气候,气候条件较差。终年寒冷,年平均气温 -5°C ,干燥度在 1.5—4.0 之间,降水稀少。区域 3 大部分区域地处青藏高原, T 检验结果比较显著,因此,可以说,除个别区域中的个别指标,受到数据统计数量的有限性和区域数据的复杂性的原因,检验结果还是比较可信的。

3 讨论

比较以上两种地理分区的划分结果,本文更倾向于第二种方法的划分结果。Holdridge 模型主要考虑生物温度、年降水量和可能蒸散率 3 个指标,呈现明显的以站点为中心的分区,分区比较琐碎,并且容易出现因为个别站点的极端数据而单独分区现象。第二种方法,基于 CCA 分析,提出比较合理的指标体系。考虑的分类指标比较全面,然后根据 CCA 分析,能够得到影响比较显著的指标因子,进行聚类分析,从而得到的结果会排除因为个别数据的误差造成的错误结果。从两次分类的结果可以看出,方法 1 的结果出现明显的点状分布,分区比较琐碎,结果表现出明显的干湿差异,但是对于温度差异表现不是很明显。而方法 2,划分结果更

接近于实际地理分布的情况。既有明显的温度带特征,在东西方向上又表现为明显的干湿差异。

其次,方法 1 的模型比较成熟,是基于全球尺度提出来的,应用在中国区域会有所偏差,需要对模型参数进行调整。由于个别数据的原因,使得在塔里木盆地会出现热带沙漠地带类型,这与实际情况不符。因此模型对于数据的要求比较高,数据为长时间序列二的多年平均值,才能减小数据误差,使分类结果相对比较详细,才能适用于特定的范围。方法 2,经过 CCA 分析得到的数据,进行聚类分析,然后绘制指标的等值线,根据各指标等值线绘制分区界线,会受到主观因素的影响,数据结果有待于进一步的确凿,此分类结果适用于较大区域的划分。因此,在中国尺度甚至更大尺度上,方法 2 更合理一些。

表 6 生态地理分区指标 *T* 检验表

Table 6 Ecological geographic regionalization index *T* check list

编号 No.	干燥度 Dry degree	湿润指数 Humid index	热量系数 Heat cefficient	生物温度 Biological temperature	≥0℃ 积温 Accumulated temperature (≥0℃)	≥10℃ 积温 Accumulated temperature (≥10℃)	年均温 Annual average temperature	年均降水 Average annual precipitation
1	0.736	0.207	0.380	0.289	0.456	0.398	0.406	0.454
2	0.201	0.622	0.027	0.393	0.013	0.016	0.284	0.421
3	0.674	0.887	0.897	0.437	0.901	0.899	0.829	0.602
4	0.159	0.113	0.428	0.485	0.664	0.618	0.152	0.484
5	0.490	0.118	0.202	0.920	0.504	0.626	0.972	0.426
6	0.994	0.862	0.738	0.577	0.978	0.924	0.515	0.261
7	0.247	0.705	0.846	0.892	0.125	0.180	0.339	0.244
8	0.636	0.508	0.467	0.856	0.265	0.333	0.525	0.538
9	0.659	0.240	0.569	0.240	0.658	0.635	0.800	0.847
10	0.333	0.878	0.302	0.560	0.997	0.803	0.884	0.429
11	0.462	0.299	0.769	0.846	0.688	0.607	0.785	0.177
12	0.024	0.152	0.125	0.592	0.036	0.034	0.829	0.518
13	0.476	0.327	0.965	0.583	0.858	0.957	0.382	0.618
14	0.790	0.111	0.352	0.583	0.519	0.430	0.596	0.964
15	0.887	0.168	0.343	0.283	0.892	0.866	0.840	0.967
16	0.667	0.811	0.866	0.549	0.335	0.582	0.614	0.665
17	0.400	0.416	0.218	0.542	0.681	0.769	0.341	0.691
18	0.024	0.109	0.233	0.559	0.965	0.698	0.328	0.800

4 结论

本文通过 Holdridge 模型和数量分析两种方法对中国区域进行生态划分,得到的中国生态地理分区图,可以看出二者存在一定的一致性。首先,地理分区的划分上,都是基于指标体系的选择,不同的是 Holdridge 模型是基于比较成熟的划分模型,在使用区域上存在一定的误差,而数量分析则是通过 CCA 分析选择合适的指标体系,以此来进行划分,比较有章可循,但是缺点是划分精度不会很高;其次,从二者的比较可以看出,对于中国生态地理分区的划分呈现一定的规律性,可以看出,在东西方向上分区呈现明显的干湿分区,在南北方向上呈现鲜明的温度差异。生态地理分区的划分大致沿着 WWF 的划分体系,并对其进行了修正和合并。同时,需要说明的是生态地理区域界线并不是绝对意义上的界线,在边界周围明显的过渡带。本文的不足之处,主要以生态环境因素为主导,很少考虑到人类活动和经济行为等不确定性因素^[34],因此,划分结果有待于进一步优化。

References:

- [1] Wu S H, Yang Q Y, Zheng D. Comparative study on eco-geographic regional systems between China and USA. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (5): 686-694.

- [2] Holdridge L R. Life Zone Ecology. San Jose: Tropical Science Center, 1967.
- [3] Bashkin, V N, Bailey R G. Revision of map of ecoregions of the world (1992—95). Environmental Conservation, 1993, 20(1): 75-76.
- [4] Gao J B, Huang J, Li S C, Cai Y L. The new progresses and development trends in the research of physio-geographical regionalization in China. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1400-1407.
- [5] Zhu K Z. China's Climate Zones. Beiji Ge Meteorological Research Institute, 1929.
- [6] Zheng D, Ge Q S, Zhang X Q, He F N, Wu S H, Yang Q Y. Regionalization in China: retrospect and prospect. Geographical Research, 2005, 24(3): 330-344.
- [7] Huang B W. The natural zoning preliminary draft. Journal of Geographical Sciences, 1958, 24(4): 348-365.
- [8] Hou X Y. China Natural Regionalization and Agricultural Development Strategy. Beijing: Science Press, 1988.
- [9] Yang Q Y, Li S C. Some themes on eco-regionalization of China. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 596-601.
- [10] Yang Q Y, Zheng D, Wu S H. Ecological region system research of China. Progress in Natural Science, 2002, 12(3): 287-291.
- [11] Fu B J, Liu G H, Chen L D, Ma K M, Li J R. Scheme of ecological regionalization in China. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 1-6.
- [12] Xie Y, Li D M, MacKinnon J. Preliminary researches on bio-geographical divisions of China. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10): 1599-1615.
- [13] Ren M E, Yang R Z. Outline of Physical Geography in China. Beijing: The Commercial Press, 1985.
- [14] Ren M E, Bao H S. The Development and Remediation of Natural Areas in China. Beijing: Science Press, 1992.
- [15] Ren M E, Yang R Z. China's natural zoning. Journal of Geographical Sciences, 1961, 27(1): 66-74.
- [16] Zheng D, Yang Q Y, Zhao M C. Natural Geographical Systems Research. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
- [17] Fan Z M, Yue T X. Temporal and spatial changes pattern of Holdridge life zones and diversity in China. Geographical Research, 2005, 24(1): 121-129.
- [18] Zhang X S. A vegetation-climate classification system for global change studies in China. Quaternary Sciences, 1993, (2): 157-169.
- [19] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. Science, 1947, 105(2727): 367-368.
- [20] Hao J M. Study on the Holdridge Life Zone and Potential Vegetation Spatial Patterns in China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2009.
- [21] Hou Z. The Application of Holdridge Life Zone Classification Method in China [D]. Nanjing University of Information Science & Technology, 2010.
- [22] Liu Z H, Lingtao L, McVicar T, van Niel T G, Yang Q K, Li R. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN. Meteorological Monthly, 2008, 34(2): 92-100.
- [23] Pei H, Ao Y H, Li Y P, Liu Z L, Zhu Z Y, Wang W, Liang C Z. The research on the climate division of alashan league, Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(3): 46-55.
- [24] Suriguga Z J T, Zhang B, Cheng J J, Tian S G, Zhang Q D, Liu S J. Numerical classification and ordination of forest communities in the Songshan National Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2621-2629.
- [25] Jia X N, Cheng J M, Wan H E. Application present situation of DCA, CCA, and DCCA Ordination of grassland vegetation communities in China. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(12): 391-395.
- [26] Zhang J T. Quantitative Vegetation Ecology. Beijing: China Science and Technology Press, 1995.
- [27] Bailey R G. Delineation of ecosystem regions. Environmental Management, 1983, 7(4): 365-373.
- [28] Cheng Y Q, Zhang P Y. Progreest on eco-geographical regionalization researches. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(10): 1599-1615.
- [29] Song Y C. Vegetation Ecology. Shanghai: East China Normal University Press, 2001.
- [30] Zheng D. Chinese Ecological Geographic Area System Research. Beijing: The Commercial Press, 2008.
- [31] Fan Z M, Yue T X, Tian Y Z. Temporal and spatial distribution and movement tendency of mean center of the Holdridge life zones in China. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1380-1387.
- [32] Olson D M, Dinerstein E, Wikramanayake E D, Burgess N D, Powell G V N, Underwood EC, D'amico J A, Itoua I, Strand H E, Morrison J C, Loucks C J, Allnutt T F, Ricketts T H, Kura Y, Lamoreux J F, Wettengel W W, Hedao P, Kassem K R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. BioScience, 2001, 51(11): 933-938.
- [33] Guo Z H, Liu X M, Xiao W F, Meng C. Regionalization and integrated assessment of climate resource in China based on GIS. Resources Science, 2007, 29(6): 2-9.
- [34] Fu B J, Chen L D, Liu G H. The objectives, tasks and characteristics of China ecological regionalization. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 591-595.

参考文献:

- [1] 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.

- [4] 高江波, 黄姣, 李双成, 蔡运龙. 中国自然地理区划研究的新进展与发展趋势. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1400-1407.
- [5] 竺可桢. 中国气候区域论. 北极阁气象研究所, 1929. (请补充本条文献信息)
- [6] 郑度, 葛全胜, 张雪芹, 何凡能, 吴绍洪, 杨勤业. 中国区划工作的回顾与展望. 地理研究, 2005, 24(3): 330-344.
- [7] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案. 地理学报, 1958, 24(4): 348-365.
- [8] 侯学煜. 中国自然生态区划与大农业发展战略. 北京: 科学出版社, 1988.
- [9] 杨勤业, 李双成. 中国生态地域划分的若干问题. 生态学报, 1999, 19(5): 596-601.
- [10] 杨勤业, 郑度, 吴绍洪. 中国的生态地域系统研究. 自然科学进展, 2002, 12(3): 287-291.
- [11] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [12] 解焱, 李典谟, Mackinnon J. 中国生物地理区划研究. 生态学报, 2002, 22(10): 1599-1615.
- [13] 任美铎, 杨绉章. 中国自然地理纲要. 北京: 商务印书馆, 1985.
- [14] 任美铎, 包浩生. 中国自然区域及开发整治. 北京: 科学出版社, 1992.
- [15] 任美铎, 杨绉章. 中国自然区划问题. 地理学报, 1961, 27(1): 66-74.
- [16] 郑度, 杨勤业, 赵名茶. 自然地域系统研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [17] 范泽孟, 岳天祥. 中国 Holdridge 生命地带及其多样性的时空变化分析. 地理研究, 2005, 24(1): 121-129.
- [18] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. 第四纪研究, 1993, (2): 157-169.
- [20] 郝君明. 中国 Holdridge 生命地带与潜在植被空间格局研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2009.
- [21] 侯璽. Holdridge 生命地带分类方法在中国的应用 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010.
- [22] 刘志红, Lingtao L, McVicar T, van Niel T G, 杨勤科, 李锐. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用. 气象, 2008, 34(2): 92-100.
- [23] 裴浩, 敖艳红, 李云鹏, 刘钟龄, 朱宗元, 王伟, 梁存柱. 内蒙古阿拉善地区气候区划研究. 干旱区资源与环境, 2000, 14(3): 46-55.
- [24] 苏日古嘎, 张金屯, 张斌, 程佳佳, 田世广, 张钦弟, 刘素军. 松山自然保护区森林群落的数量分类和排序. 生态学报, 2010, 30(10): 2621-2629.
- [25] 贾晓妮, 程积民, 万惠娥. DCA, CCA 和 DCCA 三种排序方法在中国草地植被群落中的应用现状. 中国农学通报, 2007, 23(12): 391-395.
- [26] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [28] 程叶青, 张平宇. 生态地理区划研究进展. 生态学报, 2006, 26(10): 3424-3433.
- [29] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [30] 郑度. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008.
- [31] 范泽孟, 岳天祥, 田永中. 中国 Holdridge 生命地带平均中心的时空分布及其偏移趋势. 生态学报, 2004, 24(7): 1380-1387.
- [33] 郭志华, 刘祥梅, 肖文发, 王建力, 孟畅. 基于 GIS 的中国气候分区及综合评价. 资源科学, 2007, 29(6): 2-9.
- [34] 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. 生态学报, 1999, 19(5): 591-595.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
- Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
- Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
- Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
- Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
- Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
- Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
- Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
- Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
- The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
- Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
- Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
- The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
- Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
- Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
- The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
- Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng
..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land
..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.
..... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city
..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographical regionization in China based on Holdridge and CCA analysis
..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan
..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes
..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves
..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of
Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吴文良

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 12 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元