

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.60794

王寅, 王键铭, 崔盼杰, 钟悦鸣, 李景文, 褚建民. 科尔沁沙地植物物种丰富度格局及其与环境的关系[J]. 植物科学学报, 2018, 36(6): 794~803

Wang Y, Wang JM, Cui PJ, Zhong YM, Li JW, Chu JM. Biogeographical patterns and environmental interpretation of plant species richness in the Horqin Sandy Lands[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(6): 794~803

# 科尔沁沙地植物物种丰富度格局及其与环境的关系

王寅<sup>1</sup>, 王键铭<sup>1</sup>, 崔盼杰<sup>1</sup>, 钟悦鸣<sup>1</sup>, 李景文<sup>1\*</sup>, 褚建民<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 能量、水分和生境异质性是物种丰富度分布格局的重要因素。本文以特殊环境科尔沁沙地为对象, 通过植物区域物种丰富度数据和对应气候数据统计, 结合生境异质性分析, 对科尔沁沙地物种丰富度格局及其主导因素进行研究。结果显示: (1) 科尔沁沙地植物共计有 115 科 1030 种, 呈现显著的空间异质分布, 随着经度的增加物种丰富度呈先下降后上升的趋势, 而受纬度影响较小。(2) 水热动态假说最适合用于解释科尔沁沙地植物物种丰富度格局。说明水资源可利用性是科尔沁沙地植物物种丰富度的主要影响因素。

**关键词:** 区域物种丰富度; 水分因子; 能量因子; 生境异质性; 科尔沁沙地

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 2095-0837(2018)06-0794-10

## Biogeographical patterns and environmental interpretation of plant species richness in the Horqin Sandy Lands

Wang Yin<sup>1</sup>, Wang Jian-Ming<sup>1</sup>, Cui Pan-Jie<sup>1</sup>, Zhong Yue-Ming<sup>1</sup>, Li Jing-Wen<sup>1\*</sup>, Chu Jian-Ming<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Institute of Forestry Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091)

**Abstract:** Energy, water, and habitat heterogeneity are important factors for species richness distribution. Based on regional species richness data, corresponding climatic data, and habitat heterogeneity, the species richness pattern of the Horqin Sandy Lands and its dominant factors were studied. Results demonstrated there were 115 families and 1030 species of plants in the Horqin Sandy Lands, which showed significant spatial heterogeneity. With the increase in longitude, species richness decreased at first and then increased, whereas latitude had less effect. Furthermore, the water-energy dynamics hypothesis was most suitable for explaining the species richness patterns in the Horqin Sandy Lands. Our results therefore indicated that water resource availability was the main factor affecting species richness in the Horqin Sandy Lands.

**Key words:** Regional species richness; Water factors; Energy factors; Habitat heterogeneity; Horqin Sandy Lands

在全球变化与人为影响日益严重的背景下, 植物对环境的适应性是目前生态学的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>, 其中, 植物种多样性空间分布格局及其

影响因素是生态学研究的中心议题<sup>[4-6]</sup>, 物种多样性的基本测定指标——物种丰富度更是研究热点。自 18 世纪以来, 学者们提出了数十种假说来探究

收稿日期: 2018-05-14, 退修日期: 2018-05-23。

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项课题(2017FY100205)。

This work was supported by a grant from the Science &amp; Technology Basic Resources Investigation Program of the Ministry of Science and Technology of China (2017FY100205).

作者简介: 王寅(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为生物多样性与恢复生态学(E-mail: 953753455@qq.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: lijingwen@bjfu.edu.cn)。

物种丰富度的空间分布格局, 例如: 环境能量假说、水热动态假说和生境异质性假说等。环境能量假说认为<sup>[7]</sup>, 能量能够通过影响物种的生理活动进而影响物种多样性的空间分布格局; 水热动态假说认为<sup>[8, 9]</sup>, 水分和能量因子的共同作用是物种多样性大尺度格局的决定性因子; 生境异质性假说认为<sup>[10]</sup>, 生境异质性高代表更多的生态位, 有利于物种共存, 进而促进物种丰富度增加。前人的数十种假说大致可归纳为2大类: 即当代环境条件和历史偶然性<sup>[11-13]</sup>。当代环境主要通过气候<sup>[13]</sup>、生境异质性<sup>[12]</sup>和人类活动<sup>[14]</sup>3类因素来影响物种丰富度。尽管植物物种丰富度格局受多种环境因素的共同作用, 但气候被认为是最主要的影响因子<sup>[15]</sup>。

前人对沙地区域研究认为, 了解物种丰富度格局与环境的关系是解释沙地植物群落物种多样性的重要前提。沙地因其地形条件导致的水土资源异质性, 孕育了多样化的植被类型和特有的植物种类, 形成了独特的植被空间分布格局。前人针对物种丰富度格局与环境关系的研究主要集中在气候方面, 即能量和水分的可利用性<sup>[16-19]</sup>。然而, 其他环境因素, 如生境异质性对物种丰富度格局的影响已经在局域、区域、大陆尺度的研究中得到证实<sup>[20, 21]</sup>。

科尔沁沙地为中国八大生态脆弱区之一<sup>[22]</sup>, 其水分条件优越, 年均降水量286~460 mm, 属于半干旱半湿润过渡区。长期以来由于受农牧业影响, 土地沙化, 天然植被退化严重。目前对科尔沁沙地植物多样性的研究主要集中在特定植被群落特征<sup>[23, 24]</sup>、植物区系<sup>[25-27]</sup>和局域尺度<sup>[28, 29]</sup>等方面。由于受环境、交通等因素的制约, 专门针对科尔沁沙地大尺度上的物种丰富度格局研究还十分缺乏, 尤其是整个科尔沁沙地不同环境要素对区域物种丰富度的相对作用方面的研究很少。

我们在对中国荒漠主要植物群落调查的基础上, 通过查阅中国植被资料, 结合当前国家综合自然地理区划、植被区划及其植物分布图等, 获得科尔沁沙地主要植被类型, 再根据前人研究成果<sup>[30, 31]</sup>重新划定科尔沁沙地分布范围。基于科尔沁沙地区域物种分布数据统计, 对该区域植物物种丰富度空间分布格局与环境变量的关系进行研究, 以期弄清科尔沁沙地物种丰富度格局的主

导因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

科尔沁沙地( $41^{\circ} 41' 41'' \sim 45^{\circ} 12' 15''$  N,  $116^{\circ} 25' 33'' \sim 123^{\circ} 42' 52''$  E)位于松嫩草原向内蒙古高原的过渡地带, 总面积57451 km<sup>2</sup><sup>[32]</sup>, 海拔87~2014 m, 属于大陆性季风气候, 是我国距离海洋最近的沙地<sup>[33, 34]</sup>。科尔沁沙地的年均温度、年均降水及海拔分布详见图1。

### 1.2 物种分布数据获得

参考《内蒙古植物志》<sup>[35]</sup>等文献, 获取物种的县域分布数据。利用地理信息系统软件ArcGIS 10.2, 结合科尔沁沙地数字高程模型(DEM)和行政区划数据(从中科院地理空间数据云获取), 将科尔沁沙地区域划分为1251个 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的网格, 然后在科尔沁沙地DEM上覆盖网格, 估算每个网格的海拔范围。最后结合物种的县域分布数据, 利用海拔筛选获得每个网格的物种数, 得出区域物种丰富度数据<sup>[21]</sup>。

### 1.3 气候数据

选取物种丰富度分布格局与气候关系研究中最具代表性的10个气候指标<sup>[15, 36]</sup>, 将气候指标分为水分因子和能量因子两大类。水分因子包括4个: 年均实际蒸散量(AET)、年均降水量(MAP)、湿润指数(MI)和水分亏缺(WD); 能量因子包括6个: 年均温度(MAT)、年均最冷月均温(MTCM)、年均最热月均温(MTWM)、年均潜在蒸散量(PET)、气温年较差(ART)和气温日较差(MDR)。其中, PET和AET从国际农业研究磋商小组气候数据库(<http://www.cgiar-csi.org>) (精度 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ )获取; 其余气候数据从世界气候数据网站数据库(<http://www.worldclim.org>) (精度 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ )获取。MI的计算方法为:  $MI = 100 \times (MAP / PET - 1)$ <sup>[37]</sup>。WD的计算方法为:  $WD = PET - MAP$ 。每个网格单元气候数据以其内部所有数据点的平均值计算。

### 1.4 生境异质性

用海拔范围(Elev)、每个栅格的气候异质性来测量生境异质性。海拔范围根据科尔沁沙地数字高程模型(DEM)的数据计算(各栅格内最高海拔与最低海拔之差), 精度为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。气候异质性

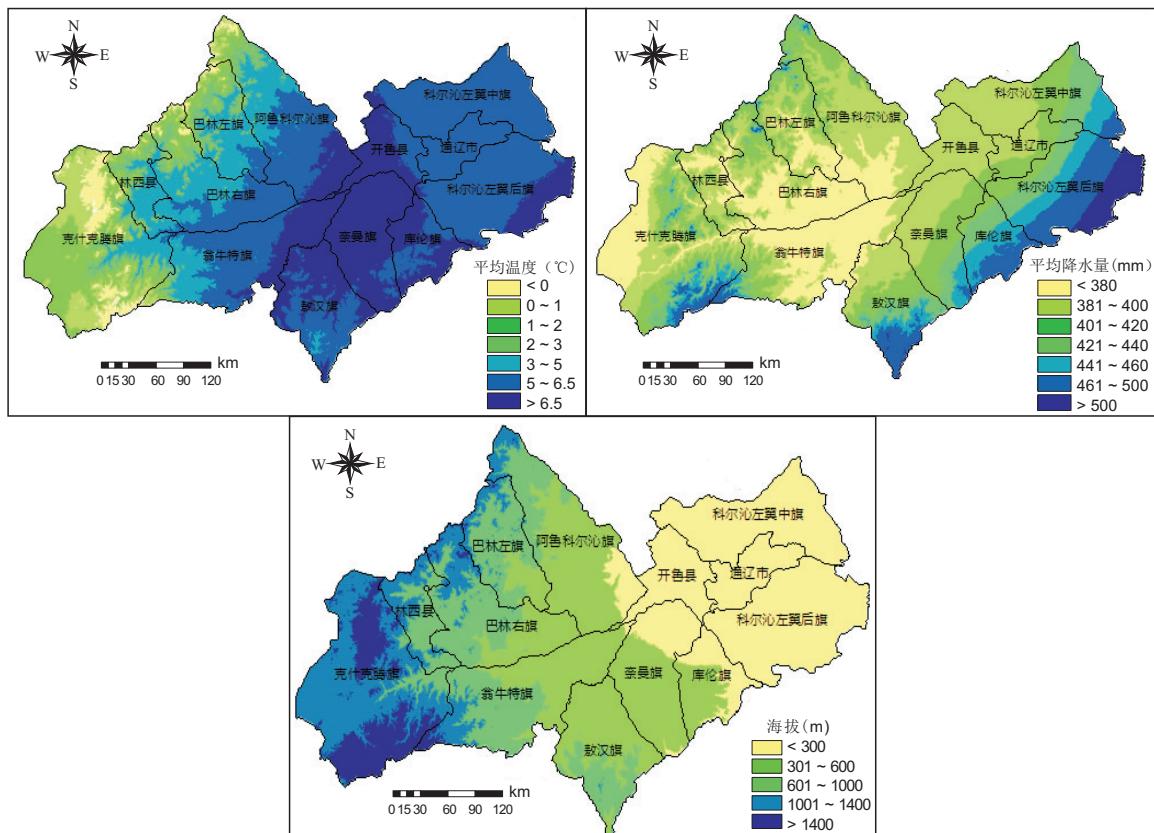


图 1 科尔沁沙地  
Fig. 1 Horqin Sandy Lands

因子<sup>[21]</sup>  $RMAT$  和  $RMAP$  分别为年均降水量( $MAP$ )和年均温度( $MAT$ )的范围, 即每个栅格内的  $RMAT = MAT_{\max} - MAT_{\min}$ 、 $RMAP = MAP_{\max} - MAP_{\min}$ 。

## 1.5 数据分析

物种丰富度数据与全部气候因素回归分析的残差用正态分布进行检验。运用一元线性回归(或多项式回归分析)法分析区域物种丰富度与经纬度、海拔的关系,以确定科尔沁沙地物种丰富度沿经纬度、海拔的空间分布格局。对区域物种丰富度与气候因素、生境异质性进行一元线性回归分析,以确定物种丰富度与不同环境因素的关系。对一元线性回归分析表现显著的能量因子、水分因子和生境异质性分别进行前向选择,将前向选择获取的能量因子和水分因子,采用方差分解来确定水分和能量因子对物种丰富度格局影响的大小,然后将前向选择获取的生境异质性放入模型中进行方差分析。通过方差分解获取这3组因子对物种丰富度格局的影响作用。以上数据分析均采用B3.5.0完成。

## 2 结果

## 2.1 科尔沁沙地物种丰富度空间分布格局

科尔沁沙地植物共计有 115 科 1030 种，其中，草本植物 89 科 912 种，木本植物 37 科 118 种。物种最多的 9 个科为：菊科 (Asteraceae)、禾本科 (Poaceae)、莎草科 (Cyperaceae)、豆科 (Fabaceae)、毛茛科 (Ranunculaceae)、蔷薇科 (Rosaceae)、百合科 (Liliaceae)、蓼科 (Polygonaceae)、藜科 (Chenopodiaceae)。这 9 科植物占总种数的 54.08%。

对科尔沁沙地物种丰富度与环境变量的关系进行统计分析,结果显示(表1),科尔沁沙地年均降水量在286~460 mm,属于半干旱半湿润过渡区,年潜在蒸散量为900 mm,年均温度为-0.98~-7.36℃。气候因子具有明显的空间异质性,最热月均温、最冷月均温、气温日较差、年均温度、潜在蒸散量与经度呈先增后减的二次曲线关系(表2);年均降水量、实际蒸散量、湿润指数与经纬度、海拔均呈先减后增的二次曲线关系(表2);而最冷月

表 1 科尔沁沙地物种丰富度与环境变量的关系

Table 1 Descriptive statistics for regional species richness in the Horqin Sandy Lands and environmental variables used in this study

环境变量 Environmental variable	最大值 Max	平均 Mean	最小值 Min	标准误差 SD
<b>物种丰富度 Species richness</b>	612	279.60	100	4.27
<b>地理因素 Geographic variables</b>				
海拔 Altitude (m)	2014	641.86	87	9.21
经度 Longitude (E)	123.67°	120.07°	116.47°	0.05
纬度 Latitude (N)	45.15°	43.42°	41.75°	0.02
<b>水分因子 Water factors</b>				
年均降水量 Mean annual precipitation (MAP, mm)	460.11	339.79	285.97	0.83
湿润指数 Moisture index (MI)	-94.31	-96.20	-96.89	0.01
实际蒸散量 Actual evapotranspiration (AET, mm)	473.62	356.06	305.76	0.82
<b>能量因子 Energy factors</b>				
年均温度 Mean annual temperature (MAT, °C)	7.36	4.86	-0.98	0.06
潜在蒸散量 Potential evapotranspiration (PET, mm)	993.22	900.19	714.55	1.88
最热月均温 Mean temperature of warmest month (MTWM, °C)	29.20	27.32	21.43	0.06
最冷月均温 Mean temperature of coldest month (MTCM, °C)	-16.83	-20.19	-25.91	0.06
气温日较差 Mean diurnal range (MDR, °C)	1.40	1.29	1.19	0.00
气温年较差 Temperature annual range (ART, °C)	50.02	47.51	45.34	0.03
水分亏缺 Water deficit (WD, mm)	676.50	560.39	308.84	2.09
<b>生境异质性 Habitat heterogeneity</b>				
海拔范围 Elevational range (Elev, m)	855	197.05	6	5.59
年均降水量范围 Range of MAP (RMAP, mm)	8.5	1.94	0.08	0.04
年均温度范围 Range of MAT (RMAT, °C)	51	10.38	0	0.30

表 2 科尔沁沙地水分、能量因子与地理因子的相关性分析

Table 2 Correlation analysis among water, energy, and geographical factors in the Horqin Sandy Lands

水分、能量因子和地理因子 Water, energy, and geographical factors	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude
<b>水分因子 Water factors</b>			
实际蒸散量 Actual evapotranspiration (AET, mm)	0.357 (US) ***	0.150 (US) ***	0.206 (US) ***
湿润指数 Moisture index (MI)	0.332 (US) ***	0.070 (US) ***	0.504 (US) ***
年均降水量 Mean annual precipitation (MAP, mm)	0.377 (US) ***	0.153 (US) ***	0.214 (US) ***
<b>能量因子 Energy factors</b>			
最热月均温 Mean temperature of warmest month (MTWM, °C)	0.778 (HS) ***	0.027 (HS) ***	0.950 (-) ***
最冷月均温 Mean temperature of coldest month (MTCM, °C)	0.612 (HS) ***	0.157 (-) ***	0.575 (-) ***
气温年较差 Temperature annual range (ART, °C)	0.390 (US) ***	0.432 (+) ***	0.175 (US) ***
气温日较差 Mean diurnal range (MDR, °C)	0.566 (HS) ***	0.136 (HS) ***	0.526 (HS) ***
年均温度 Mean annual temperature (MAT, °C)	0.738 (HS) ***	0.718 (-) ***	0.867 (-) ***
潜在蒸散量 Potential evapotranspiration (PET, mm)	0.693 (HS) ***	0.049 (-) ***	0.786 (-) ***

注: \*\*\*  $P < 0.001$ ; “-”表示单调递减; “+”表示单调递增; “HS”表示先增后减的二次曲线关系; “US”表示先减后增的二次曲线关系。

Notes: \*\*\*  $P < 0.001$ ; “-” represents negative; “+” represents positive; “HS” represents hump-shaped; “US” represents U-shaped.

均温、年均温度、潜在蒸散量与纬度、海拔呈负相关(表2,  $P < 0.001$ )。同时, 科尔沁沙地物种丰富度与经度呈极显著的二次曲线关系, 即随经度的增加物种丰富度呈先下降后上升的趋势(图2: a,  $P < 0.001$ ); 与纬度相关性较低(图2: b,  $R^2 = 0.0323$ ); 科尔沁沙地物种丰富度随海拔升高逐渐

上升(图2: c,  $P < 0.001$ )。

## 2.2 科尔沁沙地植物物种丰富度与气候因子、生境异质性的关系

利用不同气候因子与科尔沁沙地植物物种丰富度进行一元回归分析, 结果显示(图3), 科尔沁沙地物种丰富度格局与能量因子中的年均温度

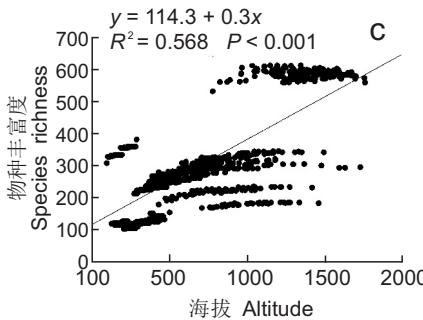
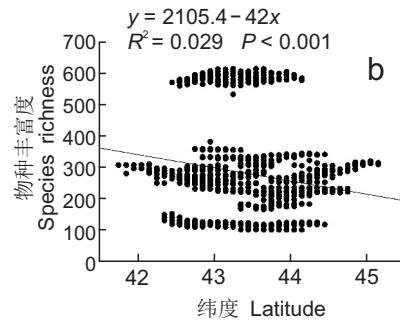
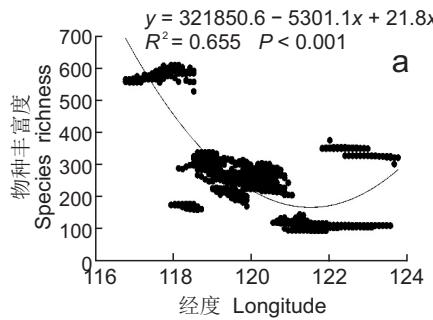


图2 科尔沁沙地植物物种丰富度随经度、纬度及海拔的变化趋势

Fig. 2 Regional species richness trends in the Horqin Sandy Lands along with longitude, latitude, and altitude

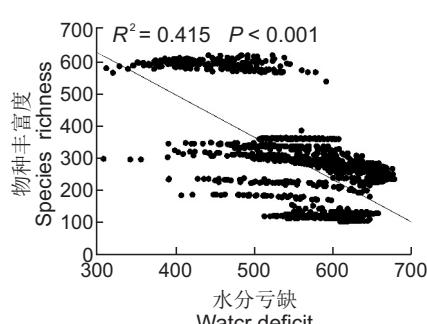
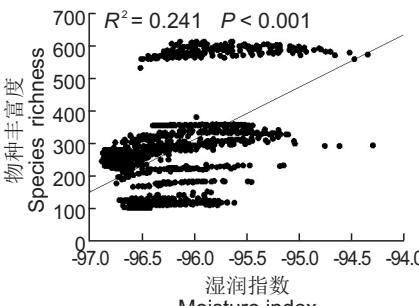
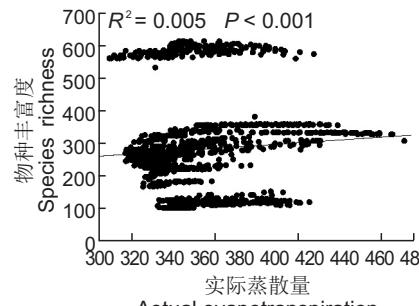
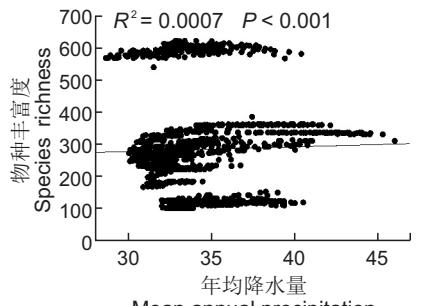
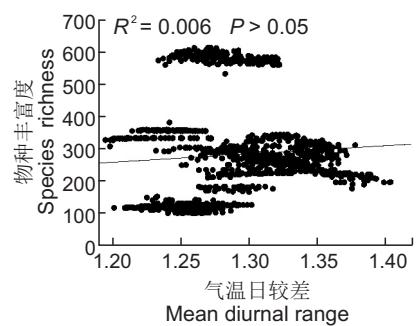
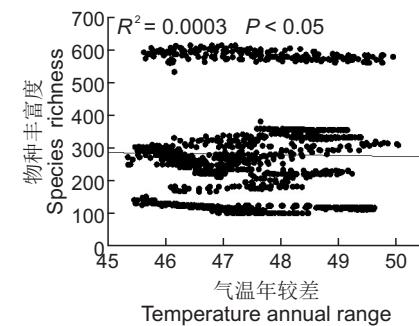
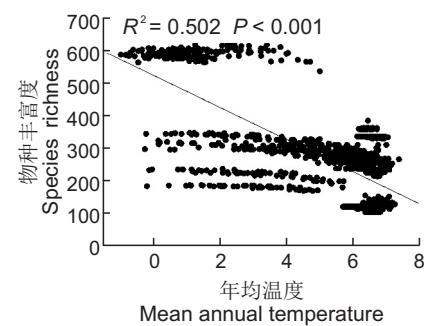
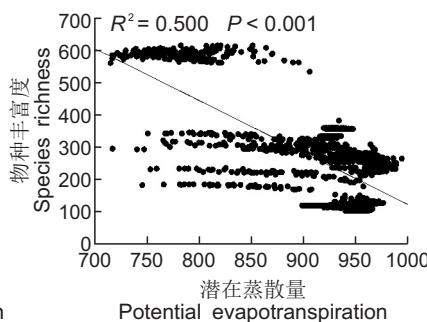
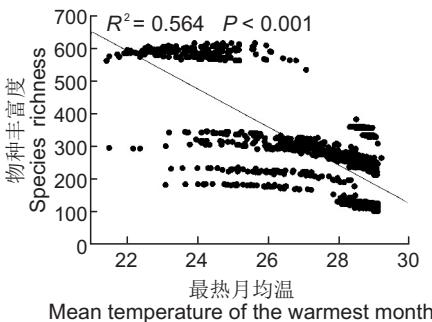
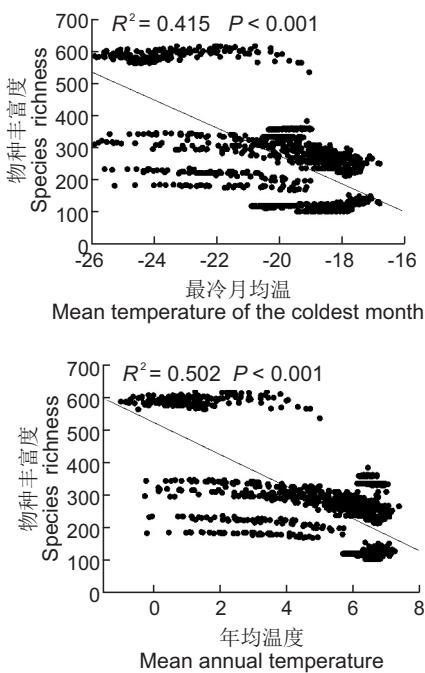


图3 科尔沁沙地植物物种丰富度与气候因子的关系

Fig. 3 Relationship between regional species richness in the Horqin Sandy Lands and climatic factors

(*MAT*)、潜在蒸散量(*PET*)、最热月均温(*MTCM*)、最冷月均温(*MTCM*)呈极显著负相关( $P < 0.001$ )，与水分亏缺(*WD*)、湿润指数(*MI*)呈极显著正相关( $P < 0.001$ )。

对科尔沁沙地植物物种丰富度与生境异质性进行一元回归分析，结果显示(图4)，科尔沁沙地植物物种丰富度与海拔范围(*Elev*)、年均降水量范围(*RMAP*)、年均温度范围(*RMAT*)均呈极显著正相关( $P < 0.001$ )。

### 2.3 科尔沁沙地水分、能量和生境异质性对植物物种丰富度格局的作用

通过运行R软件，利用前向选择得到：生境异质性显著的2个因子是：海拔范围(*Elev*)、年均温度范围(*RMAT*)( $P < 0.001$ )；能量因子显著的4个因子是：年均温度(*MAT*)、潜在蒸散量(*PET*)、最热月均温(*MTCM*)、最冷月均温

(*MTCM*)( $P < 0.001$ )；水分因子显著的2个因子是：水分亏缺(*WD*)、湿润指数(*MI*)( $P < 0.001$ )。

冗余分析及方差分解结果显示，水分因子和能量因子两者能解释科尔沁沙地物种丰富度65.5%的变异(图5: a+b+c)；水分和能量因子的单独解释率分别为2.1%和16.2%。

加入生境异质性后，水分、能量和生境异质性能共同解释科尔沁沙地物种丰富度66%的变异(图6: a+b+c+d+e+f+g)，其中水分、能量和生境异质性各自的解释率分别为49.3%(b+d+e+g)、63.8%(a+d+e+f)和23.1%(c+d+f+g)，3组变量的共同解释率为22.2%。能量的单独解释率为16.6%，水分的单独解释率为1.6%。水分与能量的共同解释率为25%。生境异质性与水分的共同解释率仅为0.5%，生境异质性的单独解释率为0.4%。

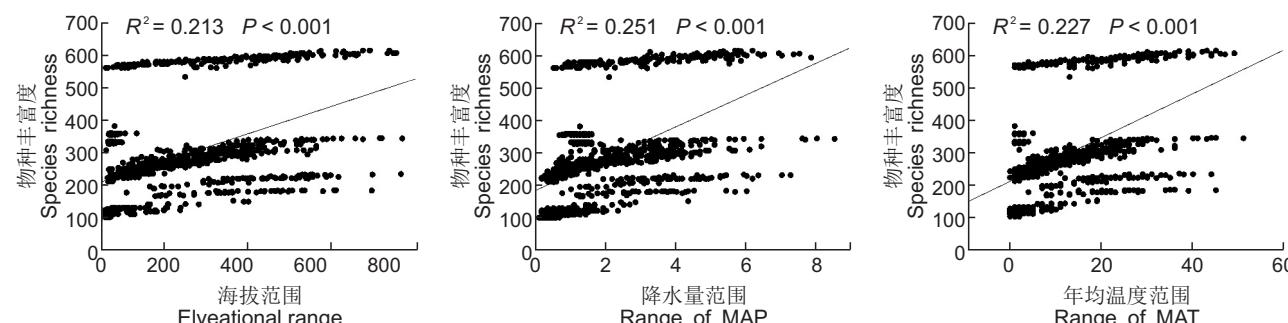
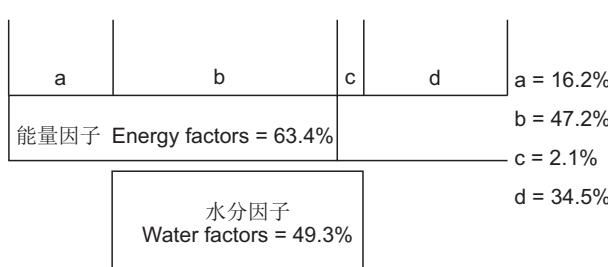


图4 科尔沁沙地植物物种丰富度与生境异质性的关系

Fig. 4 Relationship between regional species richness in the Horqin Sandy Lands and habitat heterogeneity



a: 能量因子单独解释率；b: 能量因子与水分因子共同解释率；c: 水分因子单独解释率；d: 未解释部分。

a: Independent component attributed to energy factors; b: Co-varying component of energy factors and water factors; c: Independent component attributed to water factors; d: Unexplained.

### 图5 能量和水分因子对科尔沁植物物种丰富度格局的解释

Fig. 5 Explanation of energy and water factors on the regional species richness patterns of the Horqin Sandy Lands

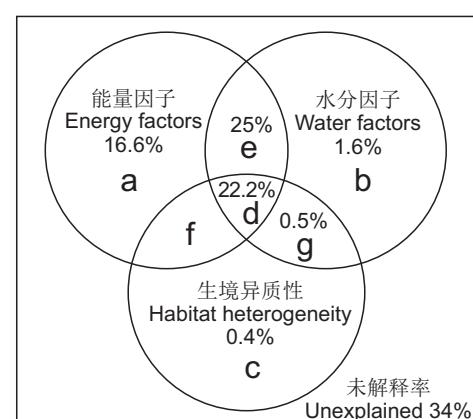


图6 水分、能量和生境异质性对科尔沁沙地植物物种丰富度的解释

Fig. 6 Explanation of water, energy, and habitat heterogeneity on the regional species richness patterns of the Horqin Sandy Lands

### 3 讨论

#### 3.1 物种丰富度的空间分布格局

科尔沁沙地作为中国八大生态脆弱区之一<sup>[22]</sup>，具有植被类型复杂多变、环境异质性大、对外界反映敏感的特点<sup>[38]</sup>，所以科尔沁植物物种更加需要保护。对内蒙古高原的研究发现，植物物种丰富度与经度呈显著正相关<sup>[18]</sup>。本研究结果表明，科尔沁沙地物种丰富度随经度的增加呈先降低后上升的变化趋势；而与纬度的相关性较低，区域物种丰富度分布格局随纬度变化的趋势不明显。科尔沁沙地虽属于内蒙古高原，但相对于整个内蒙古高原来讲尺度较小，纬度变化范围较小，且科尔沁沙地更加靠近海洋，拥有独特的环境条件，使得科尔沁沙地物种丰富度受纬度影响较小。这也说明植物物种丰富度格局随经纬度的变化而变化。

大尺度的水热条件被认为是物种多样性地理格局形成的决定性因素，科尔沁沙地地处内蒙古高原东南部，属于半干旱、半湿润带过渡区，受大陆性季风气候影响，降水分布格局具有明显的近海性，随着经度的增加降水呈上升的变化趋势，即从东南向中部地区，随着年平均气温和潜在蒸散量的升高、年降水量和实际蒸散量的降低，物种丰富度开始受到水分的限制，能量的增加会加剧水分的亏缺，从而使物种丰富度随能量的增加而降低。而在科尔沁沙地的西北部地形条件较为复杂，因受山脉的影响使得水热条件发生再分配，气候与其他地区有所差异。从中部向西北部地区，随着海拔升高，水分条件好转，物种组成逐渐丰富，使得科尔沁沙地随经度的增加物种丰富度整体呈先降低后增加的趋势。

由于受到水热条件空间异质性的影响，科尔沁沙地物种丰富度的分布格局为：由西部山区向中部丘陵地带延伸过程中，物种丰富度不断减少，在西辽河及其支流形成的冲积平原物种丰富度最小，再向东南靠近松辽平原地区（大青沟国家级自然保护区）物种丰富度显著增加（图7）。

#### 3.2 适用于科尔沁沙地物种丰富度分布格局的假说——水热动态假说

水热动态假说认为，水分和能量因子共同决定着物种多样性在大尺度上的地理分布格局<sup>[8, 9]</sup>。在

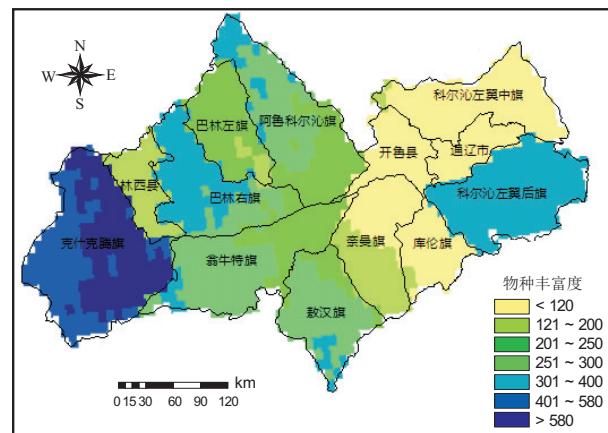


图 7 科尔沁沙地植物物种丰富度分布格局  
Fig. 7 Regional species richness patterns of plants in the Horqin Sandy Lands

植物的生长发育过程中，有效水分起到十分重要的作用<sup>[8]</sup>，水分和能量共同作用并影响植物丰富度格局。但是，决定物种丰富度的主要气候因素在不同区域并不相同<sup>[39]</sup>，Wang 等<sup>[36]</sup>对中国东北湿润森林的研究发现，物种多样性分布格局的主导因子是能量而不是水分。但对中国西北荒漠区及相关区域<sup>[16, 19, 40-42]</sup>的研究则认为，物种丰富度分布格局是由水分和能量因子共同决定。本文对水分和能量因子的方差分解结果表明，水分因子和能量因子能够解释物种丰富度 65.5% 的变异，但是能量因子和水分因子的共同解释率为 47.2%，占整个模型解释率的 72.1%；说明水分和能量均无法单独解释植物物种丰富度格局，而水分和能量因子共同决定的水资源可利用性对科尔沁沙地区域物种丰富度分布格局有着最强的解释力。科尔沁作为半干旱区，水资源可利用性也是物种丰富度的限制性因子；然而植物可利用的有效水分并非仅由降水决定，同时还受高蒸散量的强烈影响<sup>[8]</sup>，这导致科尔沁沙地降水量等因子对物种丰富度的直接影响相对较弱，而更多的是受水分和能量两种因子的共同控制。而能量因子的独立解释率仅 16.2%，所以环境能量假说也不适用于解释科尔沁沙地物种丰富度格局。在水资源相对匮乏的区域，能量的增加会引起水分不断蒸散，进而加剧水分的亏缺，导致区域物种丰富度降低；从而导致植物物种丰富度随着能量的增加而降低的变化趋势，这在已有研究<sup>[40-43]</sup>中得到了证实。

当加入生境异质性进一步进行方差分解后发现, 生境异质性的总解释率为 23.1%, 水分、能量和空间变量的共同解释率为 22.2%。水分和能量的共同解释率为 25%, 水分因子的单独解释率也进一步下降。同时, 生境异质性单独解释率仅为 0.4%。水分和能量等环境因子解释的变异明显高于生境异质性, 说明生境异质性假说也不适用。

综上可见, 环境能量假说和生境异质性假说均不适用, 而水分和能量因子共同决定的水资源可利用性才是决定科尔沁沙地物种丰富度空间分布格局的主导因子。说明水热动态假说最适用于解释科尔沁沙地物种丰富度格局。

### 3.3 影响科尔沁沙地物种丰富度格局的其他因素

在本研究中, 能量、水分和生境异质性对区域物种丰富度格局的解释率为 66%, 还有 34% 的变异没有得到解释(图 6), 这表明尽管在大尺度上水热条件的空间异质性控制着科尔沁沙地物种丰富度格局, 但地形、土壤、生物以及人为因素等对物种丰富度格局也存在重要影响。如在科尔沁沙地的形成过程中, 由于长期开垦农田和放牧, 使科尔沁地区不断沙化, 从最初的科尔沁草原演变为科尔沁沙地, 对物种丰富度产生了影响。同样, 土壤条件也是影响区域物种丰富度的因素之一, 如土壤 pH 在一定程度上可以反映物种形成的历史过程<sup>[44]</sup>。因此, 在今后的研究中, 要进一步考虑其他因素的作用, 更加详细地阐述科尔沁沙地物种丰富度的空间分布格局。

### 参考文献:

- [1] Kreft H, Jetz W. Global patterns and determinants of vascular plant diversity [J]. *PNAS*, 2007, 104 (14): 5925–5930.
- [2] 张天汉, 王健铭, 夏延国, 郑昌龙, 李景文, 贾晓红, 吴波. 库姆塔格沙漠不同区域种子植物物种组成与区系特征研究 [J]. 植物科学学报, 2016, 34(1): 78–88.  
Zhang TH, Wang JM, Xia YG, Zheng CL, Li JW, Jia XH, Wu B. Composition of seed plant species and flora fealures in different areas of the Kumtag Desert of China [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(1): 78–88.
- [3] 钟悦鸣, 王健铭, 张天汉, 李景文, 冯益明, 卢琦. 中国青藏高原北部戈壁区种子植物物种组成及其区系特征 [J]. 植物科学学报, 2017, 35(4): 525–533.  
Zhong YM, Wang JM, Zhang TH, Li JW, Feng YM, Lu Q. Composition of seed plant species and floristic features in the gobi area of the northern Qinghai-Tibet Plateau of China [J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(4): 525–533.
- [4] Currie DJ. Energy and large scale patterns of animal and plant species richness [J]. *Am Nat*, 1991, 137(1): 27–49.
- [5] Rahbek C, Graves GR. Multiscale assessment of patterns of avian species richness [J]. *PNAS*, 2001, 98(8): 4534–4539.
- [6] Francis AP, Currie DJ. A globally consistent richness-climate relationship for angiosperms [J]. *Am Nat*, 2003, 161(4): 523–536.
- [7] Wright DH. Species-energy theory: an extension of species-area theory [J]. *Oikos*, 1983, 41(3): 496–506.
- [8] O'Brien EM. Biological relativity to water-energy dynamics [J]. *J Biogeogr*, 2006, 33(11): 1868–1888.
- [9] 王志恒, 唐志尧, 方精云. 物种多样性地理格局的能量假说 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 613–624.  
Wang ZH, Tang ZY, Fang JY. The species-energy hypothesis as a mechanism for species richness patterns [J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 613–624.
- [10] Stott PA, Cox CB, Moore PD. Biogeography: an ecological and evolutionary approach [J]. *J Ecol*, 1994, 82 (3): 701.
- [11] Latham RE, Ricklefs RE. Global patterns of tree species richness in moist forests: energy-diversity theory does not account for variation in species richness [J]. *Oikos*, 1993, 67(2): 325–333.
- [12] Kerr JT, Packer L. Habitat heterogeneity as a determinant of mammal species richness in high energy regions [J]. *Nature*, 1997, 385(6613): 252–254.
- [13] Currie DJ, Mittelbach GG, Cornell HV. Predictions and tests of climate-based hypotheses of broad-scale variation in taxonomic richness [J]. *Ecol Lett*, 2004, 7(12): 1121–1134.
- [14] Fang JY. Biodiversity changes in the lakes of the central Yangtze [J]. *Front Ecol Environ*, 2006, 4(7): 369–377.
- [15] Brown JH. Toward a metabolic theory of ecology [J]. *Ecology*, 2004, 85(7): 1771–1789.
- [16] 代爽, 王襄平, 刘超, 武娴, 李巧燕, 王敏. 内蒙古灌木群落物种丰富度与气候的关系 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(4): 689–698.  
Dai S, Wang XP, Liu C, Wu X, Li QY, Wang M. Relationship between shrub species richness and climate across central Inner Mongolia, China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis: Natural Science*, 2013, 49(4): 689–698.
- [17] 代爽. 内蒙古灌木群落物种多样性格局研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [18] 刘庆福, 刘洋, 孙小丽, 张雪峰, 康萨如拉, 丁勇, 等. 气候

- 假说对内蒙古草原群落物种多样性格局的解释[J]. 生物多样性, 2015, 23(4): 463-470.
- Liu QF, Liu Y, Sun XL, Zhang XF, Kang S, Ding Y, et al. The explanation of climatic hypotheses to community species diversity patterns in Inner Mongolia grasslands [J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(4): 463-470.
- [19] 王健铭, 王文娟, 李景文, 冯益明, 吴波, 卢琦. 中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释[J]. 生物多样性, 2017, 25(11): 1192-1201.
- Wang JM, Wang WJ, Li JW, Feng YM, Wu B, Lu Q. Biogeographic patterns and environmental interpretation of plant species richness in desert regions of northwest China[J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(11): 1192-1201.
- [20] Boone RB. Relationship between avian range limits and plant transition zones in Maine[J]. *J Biogeogr*, 2000, 27(2): 471-482.
- [21] Wang ZH, Fang JY, Tang Z. Relative role of contemporary environment versus history in shaping diversity patterns of China's woody plants [J]. *Ecography*, 2012, 35(12): 1124-1133.
- [22] 环境保护部. 全国生态脆弱区保护规划纲要 [EB/OL]. (2008-10-09) [2018-05-14]. <https://www.zhb.gov.cn>.
- [23] 周欣, 左小安, 赵学勇, 刘川, 吕朋. 科尔沁沙地中南部34种植物叶功能性状及其相互关系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1489-1495.
- Zhou X, Zuo XA, Zhao XY, Liu C, Lu P. Plant functional traits and interrelationships of 34 plant species in south central Horqin Sandy Land, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6): 1489-1495.
- [24] 安宇宁, 曹宇, 迟琳琳, 刘敏, 吴德东. 科尔沁沙地南缘不同立地类型植被分布特征[J]. 防护林科技, 2018(4): 33-35.
- An YN, Cao Y, Chi LL, Liu M, Wu DD. Vegetation distribution of different site types on southern Horqin Sandy Land [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2018(4): 33-35.
- [25] 岳秀贤, 钟晓云, 李慧琳, 马颖伟. 内蒙古松树山自然保护区种子植物区系研究[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(1): 28-32.
- Yue XX, Zhong XY, Li HL, Ma YW. Analysis on flora of seed plants in Songshushan Nature Reserve of Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2017, 43(1): 28-32.
- [26] 苏亚拉图. 阿鲁科尔沁国家级自然保护区植物区系及其民族植物学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [27] 姜汇, 高凯, 周立业, 田迅. 科尔沁沙地植物的生态及分布区型结构分析[J]. 草业科学, 2018, 35(2): 311-322.
- Jiang H, Gao K, Zhou LY, Tian X. Analysis of structures of ecological and areal types of plant species in Horqin Sandy Land of China[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(2): 311-322.
- [28] 罗永清, 赵学勇, 丁杰萍, 冯静, 苏娜, 周欣, 岳祥飞. 科尔沁沙地不同类型沙地植被恢复过程中地上生物量与凋落物量变化[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 78-84.
- Luo YQ, Zhao XY, Ding JP, Feng J, Su N, Zhou X, Yue XF. Dynamics of aboveground biomass and litters in different types of dunes under vegetation restoration processes in the Horqin Sandy Land[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(1): 78-84.
- [29] 刘新平, 何玉惠, 魏水莲, 赵学勇, 张铜会, 岳祥飞. 科尔沁沙地樟子松生长对降水和温度的响应[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 57-63.
- Liu XP, He YH, Wei SL, Zhao XY, Zhang TH, Yue XF. Growth response of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to precipitation and air temperature in the Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(1): 57-63.
- [30] 闫妍, 朱教君, 闫巧玲, 郑晓, 宋立宁. 基于遥感和GIS方法的科尔沁沙地边界划定[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 122-128.
- Yan Y, Zhu JJ, Yan QL, Zhen X, Song LL. Demarcation of the Horqin Sandy Land boundary based on remote sensing and GIS technique [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(1): 122-128.
- [31] 杜社会, 哈斯额尔敦, 王宗明. 科尔沁沙地范围确定及风沙地貌特征研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(1): 33-37.
- Du HS, Hasi E, Wang ZM. Boundary delimitation and characteristics of aeolian sand landform in Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2017, 53(1): 33-37.
- [32] 中国八大沙漠/四大沙地. 西部大开发 [J/OL]. (2016-05-27) [2018-05-14]. <http://www.xbdkfzzs.com>.
- [33] 常学礼, 鲁春霞, 高玉葆. 科尔沁沙地农牧交错区景观持续性研究[J]. 自然资源报, 2003, 18(1): 67-74.
- Chan XL, Lu CX, Gao YB. A study on landscape sustainability for agri-pastoral ecotone in Horqin Sandy Land[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 67-74.
- [34] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [35] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植物志 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1985.
- [36] Wang X, Fang J, Sanders N. Relative importance of climate vs local factors in shaping the regional patterns of forest plant richness across northeast China [J]. *Ecography*, 2009, 32(1): 133-142.
- [37] Thornthwaite CW, Hare FK. Climatic classification in forest [J]. *Unasylva*, 1955, 9: 51-59.

- [38] 李虹. 中国生态脆弱区的生态贫困与生态资本研究 [D]. 成都: 西南财经大学, 2011.
- [39] 林鑫, 王志恒, 唐志尧, 赵淑清, 方精云. 中国陆栖哺乳动物物种丰富度的地理格局及其与环境因子的关系 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 652–663.
- Lin X, Wang ZH, Tang ZY, Zhao SQ, Fang JY. Geographic patterns and environmental correlates of terrestrial mammal species richness in China [J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 652–663.
- [40] Li LP, Wang ZH, Zerbe S. Species richness patterns and water-energy dynamics in the drylands of Northwest China [J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e66450.
- [41] 王健铭, 钟悦鸣, 张天汉, 李景文, 冯益明, 卢琦. 中国黑戈壁地区植物物种丰富度格局的水热解释 [J]. 植物科学学报, 2016, 34(4): 530–538.
- Wang JM, Zhong YM, Zhang TH, Li JW, Feng YM, Lu Q. Plant species richness patterns and water-energy dynamics in the Black Gobi Desert, China [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(4): 530–538.
- [42] 王健铭, 董芳宇, 巴海·那斯拉, 李景文, 李俊清, 冯益明, 卢琦. 中国黑戈壁植物多样性分布格局及其影响因素 [J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3488–3498.
- Wang JM, Dong FY, Nasina BH, Li JW, Li JQ, Feng YM, Lu Q. Plant distribution patterns and the factors influencing plant diversity in the Black Gobi Desert of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3488–3498.
- [43] 李利平, 努尔巴依·阿布都沙力克, 王少鹏, 王志恒, 唐志尧. 新疆野生维管束植物物种丰富度分布格局的水热解释 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 25–30.
- Li LP, Abdusalih N, Wang SP, Wang ZH, Tang ZY. Distribution patterns and climatic explanations of species richness of vascular plants in Xinjiang, China [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(1): 25–30.
- [44] 方静, 王晓平, 申志海, 唐志尧, 何洁, 余丹. 植物群落调查方法与规程 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533–548.

(责任编辑: 张平)