

气候和生境异质性和对华北地区植物生活型分布格局的影响

王艳红, 徐翔, 张东杰, 张化永* (华北电力大学, 工程生态学与非线性科学研究中心, 北京 102206)

摘要 [目的]明确气候和生境异质性和对华北地区植物生活型分布格局的影响。[方法]根据 Raunkiaer 生活型分类系统对华北地区 30 个自然保护区的植物物种丰富度进行统计, 分析华北地区不同生活型植物的物种丰富度分布格局, 并采用 SPSS 软件对物种丰富度和环境因子进行回归分析。[结果]华北地区生活型谱以高位芽植物为主(46.04%), 其次是隐芽植物(41.40%)和地面芽植物(32.86%), 地上芽植物和 1 年生植物比较贫乏。回归分析表明华北地区植物物种丰富度主要受生境异质性和气候因子的共同影响; 高位芽植物物种丰富度与海拔高差和最冷月均温相关, 地上芽植物、地面芽植物以及隐芽植物物种丰富度均只与海拔高差相关, 1 年生植物物种丰富度与各因子的相关性都较小。[结论]海拔高差是华北地区不同生活型植物物种丰富度的主要影响因子, 即生境异质性是影响华北地区植物生活型物种丰富度空间分布格局的主要因素。

关键词 华北地区; 物种丰富度; 生活型; 气候因子; 生境异质性

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)16-009-05

Effects of Climate and Habitat Heterogeneity on the Distribution Pattern of Plant Life Form in North China

WANG Yan-hong, XU Xiang, ZHANG Dong-jie, ZHANG Hua-yong* (Research Center for Ecological Engineering and Nonlinear Science, North China Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract [Objective] To research the effects of climate and habitat heterogeneity on the distribution pattern of plant life form in North China. [Method] Plant species richness of 30 nature reserves in North China was classified based on Raunkiaer life forms. We analyzed the distribution patterns of plant species richness for different life forms in North China. Regression analysis of species richness and environmental factors was carried out by SPSS software. [Result] The main life form distribution was Phanerophytes (46.04%), followed by Cryptophytes (41.40%) and Hemicryptophytes (32.86%), while Chamaephytes and Therophytes were relatively poor. Regression analysis showed that the plant species richness of North China was affected by habitat heterogeneity and climatic factors; Phanerophytes species richness was related to elevation range and mean temperature for the coldest month; Chamaephytes, Hemicryptophyte and Cryptophytes species richness was only associated with elevation range; Therophytes species richness had little correlation with environmental factors. [Conclusion] Elevation range is the main impact factor of plant species richness for different life forms, and habitat heterogeneity is the main factor which affected the plant species richness distribution pattern in North China.

Key words North China; Species richness; Life form; Climatic factors; Habitat heterogeneity

生活型是植物对环境条件适应后在其生理、结构、尤其是在外部形态上的一种具体反映, 生活型谱则是指某一地区植物区系中各类生活型的百分率组成^[1-2]。相同的生活型反映的是植物对环境具有相同或相似的要求或适应能力^[3], 因此, 在描述群落外貌特征时常把生活型作为重要参数^[4]。植被具有地域性强的特点, 针对某一区域植被的组成特点, 通过植物群落生活型谱的分析对阐明植物群落性质、演替阶段、演替趋势以及群落对环境变化和人为活动的反应等方面具有生态学意义。方全等^[5]分析了江西云居山栓皮栎群落特征, 表明生活型谱以高位芽植物为主, 其他生活型相对较少, 反映出中亚热带森林以高位芽为主的特点。雷宁菲等^[6]采用 Raunkiaer 生活型分类系统对缙云山常绿阔叶林不同演替阶段植物的生活型进行统计, 结果表明缙云山植被属典型的中亚热带常绿阔叶林植被, 高位芽植物占绝对优势, 在 80% 以上, 其中小高位芽植物最多, 中高位芽与矮高位芽植物次之; 江洪^[7]对全球典型落叶阔叶林的植物生活型谱进行比较研究, 发现虽然东亚、欧洲、北美各地区内暖温带落叶阔叶林生活型谱的相似程度高, 但是生活型谱在各地区之间的相似程度不如各地区内部高, 这就明确地反映出不同地区的气候环境有差异, 即使在同一个地点, 不同群落的生活型也

有差异, 主要是海拔和地形等因素不同所致。

目前, 利用大尺度的物种分布数据, 对区域尺度、国家尺度甚至是洲际尺度的物种多样性格局进行研究已成为一种趋势, 并取得了许多重要进展^[8]。华北地区是我国的政治文化中心, 人口众多, 自然资源丰富, 经济发展迅速, 但该地区干旱化趋势显著, 生态环境较为脆弱且受人类活动的影响较大。由于目前人们对华北地区植物物种多样性空间格局分布的研究较少, 笔者以华北地区空间分布均匀的 30 个自然保护区的植被数据为基础, 系统研究了华北地区不同生活型植物的物种丰富度空间分布格局及其与气候因子、生境异质性变量的关系, 以期为进一步揭示华北地区植物群落性质, 阐明植物群落对环境变化的适应提供理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况 华北地区地处我国北方, 属于沿海湿润、半湿润季风气候向内陆干旱、半干旱气候的过渡带^[9]。北部地势波状起伏, 由南向北倾斜, 海拔大多在 1 000 m 以上, 年均温 -0.3 ~ 3.5 °C, 年降水量 340 ~ 450 mm; 中部地区属于暖温带大陆性季风气候, 年均温 5.0 ~ 13.0 °C, 年降水量 500 ~ 800 mm; 东部以低山丘陵为主, 海拔 500 ~ 1 000 m, 年均温 10.0 ~ 13.0 °C, 年降水量 600 ~ 900 mm; 西部地区主要包括太行山脉东麓, 年均温 3.0 ~ 18.0 °C, 年降水量 400 ~ 800 mm, 水热条件优越; 南部地区的山地由桐柏山、大别山组成, 海拔 800 m 左右, 年均温 13.0 ~ 15.0 °C, 年降水量 1 000 ~ 1 300 mm, 是华北地区水热资源最丰富的地区^[10]。华北地区

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07203-011, 2015ZX07024-007)。

作者简介 王艳红 (1992-), 女, 内蒙古多伦人, 硕士研究生, 研究方向: 生态数学。* 通讯作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事生态数学研究。

收稿日期 2016-03-30

属中纬度暖温带季风气候,植被的建群种十分丰富。森林植被的建群种以松科的松属和壳斗科的栎属的种类为主。针叶林主要有赤松、油松、华山松、云杉属、冷杉属与落叶松属的树种。落叶阔叶林中辽东栎、麻栎、栓皮栎分布广泛,各地还有以桦木科、杨柳科、榆科、槭树科植物组成的各种落叶

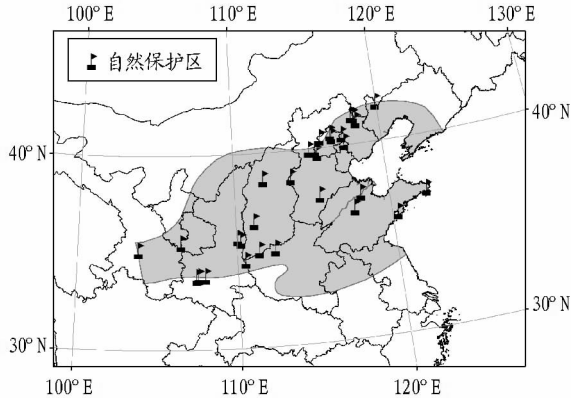


图1 华北地区30个保护区分布

Fig. 1 Location of the 30 nature reserves of North China

阔叶林。草本植物则以黄背草和白羊草最占优势。

1.2 研究方法 以华北地区30个自然保护区文献(表1)为基础,对各个保护区面积、海拔上限、海拔上限、不同生活型植物的物种丰富度分别进行统计。保护区位于102°46′~120°43′ E、33°42′~41°47′ N,总面积为13 472.757 km²,各保护区分布见图1。根据Raunkiaer生活型分类系统将各保护区高等植被分为高位芽植物(PH)、地上芽植物(CH)、地面芽植物(H)、隐芽植物(CR)和1年生植物(TH)5大类生活型^[11]。气候因子数据来自WorldClim的全球高分辨率(1 km × 1 km)栅格气候数据^[12]。利用地理信息系统(GIS)软件和保护区的经纬度范围,对保护区气候因子年均温、年降水量、最冷月均温、年潜在蒸散量进行提取与计算。采用逐步回归的方法,消除自变量之间的共线性,挑选出独立且解释程度高的因子。将气候因子、面积、海拔高差作为自变量,植物生活型物种丰富度作为因变量进行回归分析,上述分析都在SPSS软件中完成。各保护区植物生活型物种丰富度、气候因子和生境异质性变量统计学描述见表2。

表1 华北地区30个自然保护区文献

Table 1 Literatures of the 30 nature reserves of North China

序号 Code	文献 Literature	序号 Code	文献 Literature
1	北京百花山自然保护区科学考察报告	16	山西太宽河自然保护区植物多样性研究
2	甘肃太统-崆峒山自然保护区科学考察集	17	陕西韩城黄龙山褐马鸡自然保护区综合科学考察报告
3	河北衡水湖自然保护区科学考察报告	18	陕西米仓山自然保护区综合科学考察报告
4	河北辽河源自然保护区科学考察与生物多样性研究	19	陕西黄柏塬自然保护区综合科学考察
5	河北驼梁自然保护区科学考察与生物多样性研究	20	陕西周至国家级自然保护区的生物多样性
6	河南小秦岭自然保护区科学考察集	21	河北大海陀自然保护区科学考察集
7	鹤伴山国家森林公园生物多样性与生态旅游建设	22	太行山猕猴自然保护区科学考察集
8	黄河三角洲生物多样性研究	23	北京喇叭沟门自然保护区综合科学考察报告
9	芦芽山自然保护区综合考察报告	24	陕西太白渭水河水生野生动物自然保护区综合考察报告
10	内蒙古黑里河自然保护区综合科学考察报告	25	北京蒲洼自然保护区植物多样性及其保护研究
11	甘肃洮河自然保护区科学考察报告	26	大黑山自然保护区综合科学考察集
12	暖温带森林生态系统 雾灵山国家级自然保护区	27	云蒙山林区植物多样性及其保护研究
13	青岛崂山生物多样性及保护利用的研究	28	天津八仙山自然保护区植物多样性及其保护研究
14	山东荣成大天鹅自然保护区综合考察报告、总体规划	29	河北茅荆坝自然保护区科学考察与生物多样性研究
15	山西省五鹿山自然保护区科学考察报告	30	河北小五台山自然保护区综合科学考察报告

表2 各生活型植物物种丰富度、气候因子和生境异质性变量统计学描述

Table 2 Statistical description of species richness, climatic factors and habitat heterogeneity variables of plants with different life forms

变量 Variable	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD
高位芽植物物种丰富度 Phanerophytes species richness	11.000	250.000	79.530	55.902
地上位芽植物物种丰富度 Chamaephytes species richness	0	8.000	2.100	2.107
地面位芽植物物种丰富度 Hemicyrptophytes species richness	3.000	124.000	56.770	36.624
隐芽植物物种丰富度 Cryptophytes species richness	0	57.000	23.500	17.677
1年生植物物种丰富度 Therophytes species richness	0	34.000	10.830	8.449
经度 Longitude/°	103.857	122.442	114.188	4.651
纬度 Latitude/°	33.767	42.000	37.849	2.681
保护区面积 Reserve area/km ²	4.801	4 700.170	449.092	859.183
海拔高差 Elevation range/m	4.000	2 811.000	1 225.452	606.273
年均温 Mean annual temperature/°C	2.116	13.067	8.056	3.113
最冷月均温 Mean temperature for the coldest month/°C	-19.868	-3.752	-12.817	4.925
年降水量 Annual precipitation/mm	459.912	912.274	595.226	121.064
年潜在蒸散量 Annual potential evapotranspiration/mm	434.172	836.138	639.151	95.728

2 结果与分析

2.1 生活型分析 植物生活型是植物对于综合环境条件的长期趋同适应而表现在外貌上反映出来的植物类型^[13]。30个自

然保护区共有高等植物5 182种,其中高位芽植物2 386种,地上芽植物63种,地面芽植物1 703种,隐芽植物705种,1年生植物325种。华北地区生活型谱以高位芽植物为主,占

保护区植物的 46.04%，其次分别是隐芽植物 41.40%、地面芽植物 32.86%、1 年生植物 6.27%、地上芽植物 1.22% (图 2)。高位芽植物占主导地位，表明该区热量条件较好，有一个较长的无霜期和较高温度，与华北地区处于暖温带地理位置相吻合^[14]；暖温带地区水热组合欠佳，使得植物生活型谱中地面芽植物和隐芽植物比例较高^[15]；由于我国暖温带森林地区气候相对温和，地上芽植物比例较少^[16]。由此所构成的植物生活型谱基本特征反映了暖温带夏季温暖多雨，有利于各类落叶型高位芽植物的生长发育和落叶阔叶林分布，冬季寒冷干旱，多年生草本植物需要藉地温的越冬的自

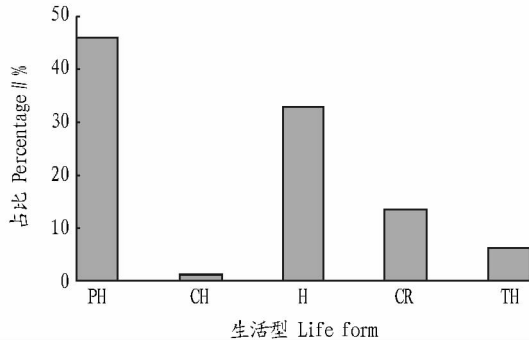


图 2 华北地区植物生活型谱

Fig. 2 Plant life form spectra of North China

表 3 各生活型植物物种丰富度与环境因子之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between the plant species richness and environmental factors in different life forms

环境因子 Environmental factor	PH - TSR	CH - TSR	H - TSR	CR - TSR	TH - TSR
Area	0.101	0.200	0.308	0.233	0.284
Range	0.715 **	0.650 **	0.650 **	0.508 **	0.071
ATM	-0.104	-0.369 *	-0.370 *	-0.112	0.206
MTMC	0.127	-0.231	-0.318	-0.116	0.040
AP	0.416 *	0.148	0.022	0.044	-0.040
PET	-0.219	-0.364 *	-0.356	-0.089	0.288

注: ** 为极显著相关; * 为显著相关。

Note: ** was extremely significant correlation; * was significant correlation.

表 4 各生活型植物物种丰富度回归方程

Table 4 Regression equations for plant species richness of different plant life forms

回归方程 Regression equation	标准误差 SE	P	R ²	调整的 R ² Adjusted R ²
$PH - TSR = 0.002Range - 0.451$	39.750	<0.001	0.512	0.494
$PH - TSR = 1.439MTMC + 97.977$	56.432	0.504	0.016	0.015
$PH - TSR = 0.077Range + 4.982MTMC + 0.063$	32.784	0.001	0.680	0.680
$CH - TSR = 0.002Range - 0.451$	1.628	<0.001	0.423	0.402
$H - TSR = 0.037Range + 12.467$	28.331	<0.001	0.422	0.402
$CR - TSR = 0.014Range + 6.791$	15.498	0.004	0.258	0.231
$TH - TSR = 0.003Area + 9.577$	8.243	0.128	0.081	0.081
$TH - TSR = 0.025PET - 5.388$	8.235	0.123	0.083	0.050

仅采用保护区面积和海拔高差作为生境异质性变量，海拔高差可以解释高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物以及隐芽植物物种丰富度变化的 51.2%、42.3%、42.2% 和 25.8% (图 3)；保护区面积仅解释 1 年生植物物种丰富度变化的 8.1% (图 4)。气候因子中只有最冷月均温进入高位芽

然环境条件和中纬度地带气候特点^[3]。

2.2 生活型与气候因子、生境异质性变量回归分析 对华北地区 PH - TSR、CH - TSR、H - TSR、CR - TSR、TH - TSR 分别与气候因子年均温 (ATM)、最冷月均温 (MTMC)、年降水量 (AP)、年潜在蒸散量 (PET) 以及各保护区面积 (Area)、海拔高差 (Range) 进行相关分析和回归分析。由表 3 可知，高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物和隐芽植物物种丰富度均与海拔高差极显著相关；高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物物种丰富度分别与年降水量、潜在蒸散量、年均温显著相关；1 年生植物物种丰富度与环境因子相关性较小。

回归分析结果表明：高位芽植物物种丰富度与海拔高差和最冷月均温相关，海拔高差和最冷月均温解释了高位芽植物物种丰富度变化的 68.0%；地上芽植物物种丰富度、地面芽植物物种丰富度和隐芽植物物种丰富度都只与海拔高差相关，海拔高差分别解释了地上芽植物物种丰富度、地面芽植物物种丰富度和隐芽植物物种丰富度变化的 42.3%、42.2% 和 25.8%；回归分析并未得到 1 年生植物物种丰富度回归方程，1 年生植物物种丰富度与各因子的相关性均较低，其中保护区面积解释了 1 年生植物物种丰富度变化的 8.1%，年潜在蒸散量解释了 1 年生植物物种丰富度变化的 8.3%，其余的均小于 1% (表 4)。

植物物种丰富度回归方程，解释力仅为 1.6%，年潜在蒸散量可以解释 8.3% 的 1 年生植物物种丰富度的变异 (图 5)。相对于气候因子，生境异质性对华北地区植物生活型分布格局的影响更显著。

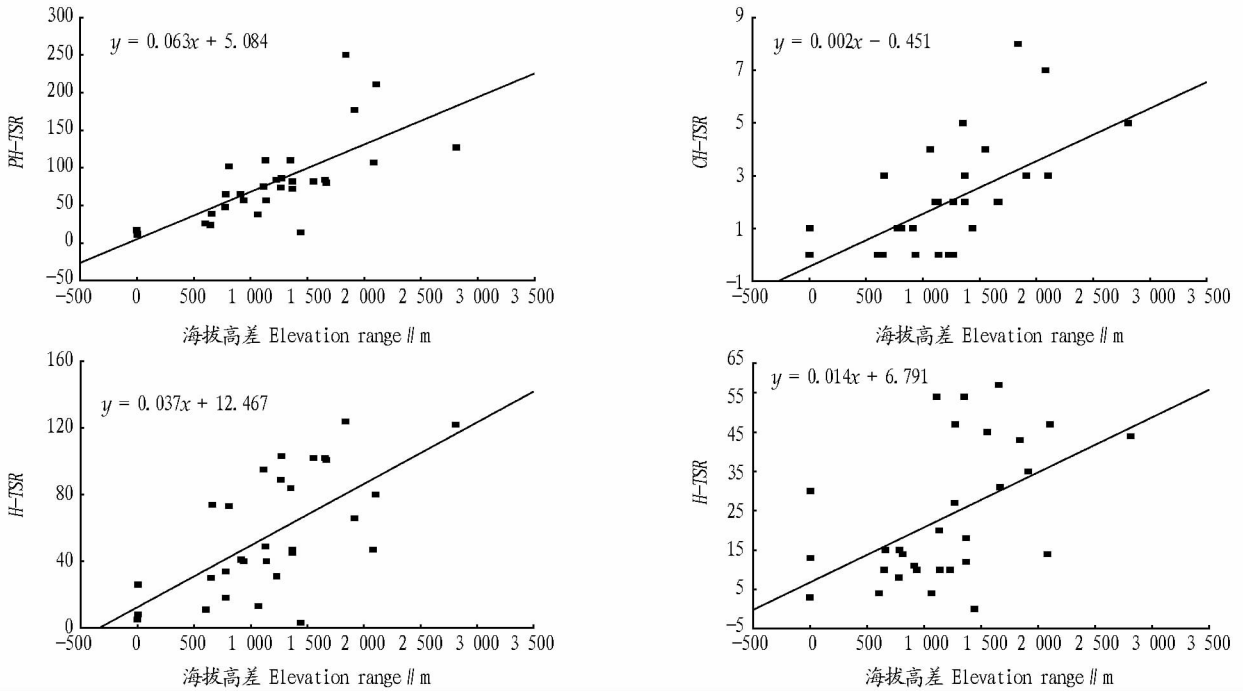


图3 海拔高差与高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物和隐芽植物物种丰富度的关系

Fig. 3 Relationships between elevation range and plant species richness of Phanerophytes, Chamaephytes, Hemicryptophytes, Cryptophytes

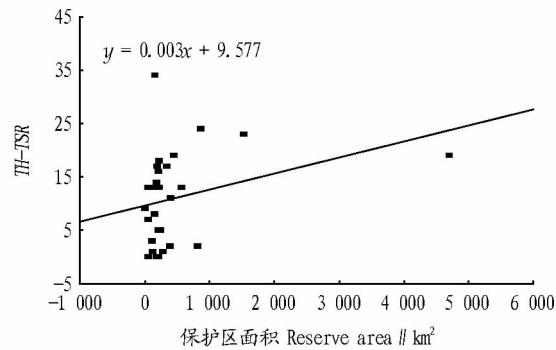


图4 保护区面积与1年生植物物种丰富度的关系

Fig. 4 Relationships between reserve area and species richness of Therophytes

3 讨论

利用华北地区30个自然保护区植被数据,该研究阐明了华北地区各生活型植物分布格局,并分析了气候因子和生境异质性对植物生活型分布格局的影响。通过回归分析得到高位芽植物物种丰富度与海拔高差和最冷月均温显著相关,高位芽植物对温度和水分的需求一般较高,忍耐低温的能力较差,需要较高的积温,随海拔的升高,高位芽在生活型谱中所占的比例下降^[17];地上芽植物、地面芽植物和隐芽植物物种丰富度都只与海拔高差相关。海拔是各种环境因素的综合,它的变化直接导致其他环境因子的变化,海拔的差异包含了许多环境因子的变异,因此,在分析植物分布与环境因子之间的关系时,如将海拔高度作为环境因子之一,参与分析,就会因海拔这一主导因子的存在的而弱化其他因子

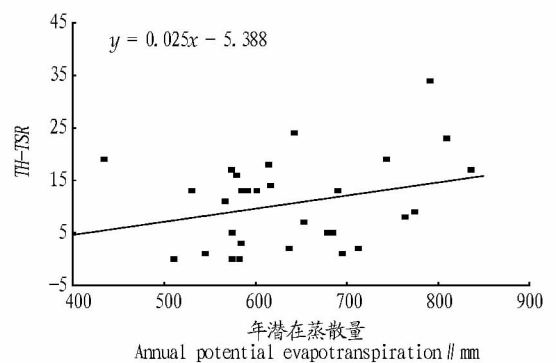
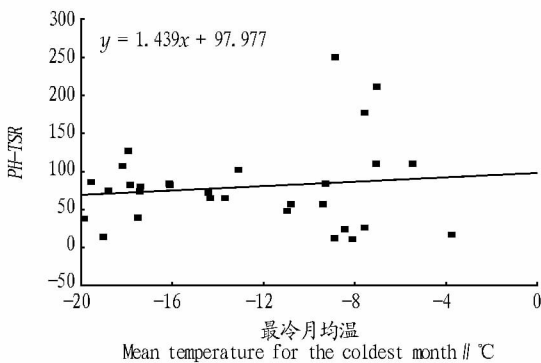


图5 气候因子与高位芽植物、1年生植物物种丰富度的关系

Fig. 5 Relationships between climatic factors and species richness of Phanerophytes and Therophytes

的影响程度^[18]。地面芽植物在温带生活型谱中的比例较稳定,不因为群落类型和水热梯度发生太大的波动,显示了强大的地带约束力^[8]。除1年生植物物种丰富度外,高位芽、

地上芽、地面芽和隐芽植物物种丰富度均与海拔高差相关,有研究者以我国202个自然保护区为研究对象,发现在国家和植被区区域尺度上以海拔高差为度量的生境异质性与植

物物种丰富度显著相关^[19]。

隐芽植物物种丰富度虽然与海拔高差相关,但海拔高差解释力仅为 25.8%;1 年生植物物种丰富度与气候因子和生境异质性变量相关性较低,解释力都小于 10%。这是由于隐芽植物和 1 年生植物多是林下草本层植物,尽管海拔是主导的影响因子,但因森林内部环境的差异,也会在一定程度上影响草本植物的分布,林冠郁闭度通过诸如光照、局部温湿度、紫外线强度等方面的差异对草本植物分布产生明显影响^[18]。尤其在山区,坡向等小地形因子决定了局部生境的气候条件,因为它控制了地表的光、热、水等生态环境条件,所以能在一定程度上间接地反映土壤性质养分的空间差异^[20],对林下草本层植物分布格局有较好的解释力^[21],所以隐芽植物与海拔高差相关性较低。1 年生植物能在一个生长季甚至更短的时间内完成其生活史,而以种子的形式(休眠状态)渡过不利其生长的季节和年份,许多 1 年生植物采取这种适应方式,利用降水较丰富的年份或季节甚至一个短暂的时期完成其整个生活周期,成为荒漠地区最具适应性的类型^[17]。

4 结论

根据 Raunkiaer 生活型分类系统对华北地区 30 个自然保护区植被类型进行分类统计,得到华北地区生活型谱以高位芽植物为主(占 46.04%),其次是隐芽植物(占 41.40%)和地面芽植物(占 32.86%),地上芽植物和 1 年生植物比较贫乏。对生活型物种丰富度与环境因子进行回归分析,发现华北地区植物生活型物种多样性主要受生境异质性和气候因子的共同影响,高位芽植物物种丰富度与海拔高差和最冷月均温相关,地上芽植物、地面芽植物以及隐芽植物物种丰富度均只与海拔高差相关,1 年生植物物种丰富度与各因子的相关性都较小。因此,海拔高差是华北地区生活型物种丰富度的主要影响因子,对高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物和隐芽植物物种丰富度解释力分别为 51.2%、42.3%、42.2% 和 25.8%,即生境异质性是影响华北地区植物生活型物种丰富度分布格局的主要因素。

(上接第 8 页)

基线分离的 2 种非对映异构体(*erythro*-、*threo*-)2-甲基丁四醇硫酸酯进行了质谱解析。大气样品中除了硫酸和 2-甲基丁四醇硫酸酯,还有其他未知化合物,有待进一步研究。

参考文献

- [1] GUENTHER A, KARL T, HARLEY P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)[J]. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 3181–3210.
- [2] SURRETT J D, CHAN A W H, EDDINGSAAS N C, et al. Reactive intermediates revealed in secondary organic aerosol formation from isoprene[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 6640–6645.

参考文献

- [1] ELLENBERG D, MUELLER-DOMBOIS D. *Aims and methods of vegetation ecology*[M]. New York, NY: Wiley, 1974.
- [2] WHITTAKER R H. *Communities and ecosystems*[M]. New York: Macmillan Company, 1970.
- [3] 高贤明, 陈灵芝. 植物生活型分类系统的修订及中国暖温带森林植物生活型谱分析[J]. *植物学报*, 1998, 40(6): 553–559.
- [4] 张木明, 陈北光. 粤北小红栎林的群落特征[J]. *华南农业大学学报*, 2001, 22(3): 9–12.
- [5] 方全, 刘以珍, 林朝晖, 等. 云居山栓皮栎群落特征及多样性研究[J]. *植物科学学报*, 2015, 33(3): 311–319.
- [6] 雷泞菲, 苏智先, 宋会兴, 等. 缙云山常绿阔叶林不同演替阶段植物生活型谱比较研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 267–270.
- [7] 江洪. 东灵山植物群落生活型谱的比较研究[J]. *植物学报*, 1994, 36(11): 884–894.
- [8] 冯建孟. 中国种子植物物种多样性的大尺度分布格局及其气候解释[J]. *生物多样性*, 2008, 16(5): 470–476.
- [9] 刘斌, 孙艳玲, 王中良, 等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 12–23.
- [10] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001–2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 717–729.
- [11] RAUNKIAR C. *The life forms of plants and statistical plant geography*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1934.
- [12] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. *International journal of climatology*, 2005, 25(15): 1965–1978.
- [13] SARMIENTO L, LLAMBI L D, ESCLONA A, et al. Vegetation patterns, regeneration rates and divergence in an old-field succession of the high tropical Andes[J]. *Plant ecology*, 2003, 166(1): 145–156.
- [14] 夏亚军. 雾灵山植物生活型研究[J]. *河北林果研究*, 2010, 25(3): 264–267.
- [15] 于顺利, 陈灵芝. 东北地区蒙古栎群落生物型谱比较[J]. *林业科学*, 2000, 36(3): 118–121.
- [16] 刘守江, 苏智先, 张璟霞, 等. 陆地植物群落生活型研究进展[J]. *四川师范学院学报(自然科学版)*, 2003, 24(2): 155–159.
- [17] 郭柯, 郑度, 李渤生. 喀喇昆仑山—昆仑山地区植物的生活型组成[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(1): 51–59.
- [18] 郝占庆, 郭水良. 长白山北坡草本植物分布与环境关系的典范对应分析[J]. *生态学报*, 2004, 23(10): 2000–2008.
- [19] ZHAO S, FANG J. Patterns of species richness for vascular plants in China's nature reserves[J]. *Diversity and distributions*, 2006, 12(4): 364–372.
- [20] CHEN Z S, HSIEH C F, JIANG F Y, et al. Relations of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan[J]. *Plant ecology*, 1997, 132(2): 229–241.
- [21] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 430–435.

- [3] SHALAMZARI M, RYABITSOVA O, KAHNT A, et al. Mass spectrometric characterization of organosulfates related to secondary organic aerosol from isoprene[J]. *Rapid commun mass spectrom*, 2013, 27: 784–788.
- [4] LIN P, YU J Z, ENGLING G, et al. Organosulfates in humic-like substance fraction isolated from aerosols at seven locations in east asia: A study by ultra-high-resolution mass spectrometry[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46: 13118–13127.
- [5] WANG W, WU M, LI L, et al. Polar organic tracers in PM_{2.5} aerosols from forests in eastern China[J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 7507–7518.
- [6] WANG W, VAS G, DOMMISSE R, et al. Fragmentation study of diastereoisomeric 2 methyltetrols, oxidation products of isoprene, as their trimethylsilyl ethers using gas chromatography/ion trap mass spectrometry[J]. *Rapid commun mass spectrom*, 2004, 18: 1787–1797.