

柴勇, 郭兆成, 和丽萍, 邵金平, 赵欣凤, 马赛宇, 李贵祥. 洱海流域不同岩性区典型灌丛群落特征[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (3): 529-540
Chai Y, Guo ZC, He LP, Shao JP, Zhao XF, Ma SY, Li GX. Community structure of typical shrubs in different lithological areas of the Erhai Basin [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (3): 529-540

洱海流域不同岩性区典型灌丛群落特征

柴勇¹ 郭兆成² 和丽萍¹ 邵金平¹ 赵欣凤³ 马赛宇¹ 李贵祥¹✉

¹云南省林业和草原科学院 昆明 650201

²中国自然资源航空物探遥感中心 北京 100083

³古城区林业和草原局 丽江 674100

摘 要 灌丛植被是山地生态系统的重要组成部分, 研究岩性、海拔与灌丛群落结构的关系, 对于揭示山地生物多样性维持机制具有重要意义. 通过植物群落学调查及方差分析, 研究洱海流域典型灌丛对岩石特征、海拔梯度的响应. 结果显示: 洱海流域7个岩性区13块样地共记录维管植物115种, 共划分出8个群系、13个群落. 海拔3 000 m以下范围岩石除变粒岩-片麻岩外都有分布, 灌丛植被以暖温性灌丛为主, 以华西小石积 (*Osteomeles schwerinae*)、西南杭子梢 (*Campylotropis delavayi*)、车桑子 (*Dodonaea viscosa*)、马桑 (*Coriaria nepalensis*) 等为优势种; 海拔3 000 m以上范围主要分布石灰岩、变粒岩-片麻岩、泥灰岩, 灌丛植被以寒温性灌丛为主, 以帽斗栎 (*Quercus guyavaefolia*)、腋花杜鹃 (*Rhododendron racemosum*)、密枝杜鹃 (*Rhododendron fastigiatum*)、棕背杜鹃 (*Rhododendron alutaceum*) 等为优势种. 不同岩性间灌木物种丰富度指数介于7-17之间, Shannon-Wiener指数介于1.523 3-2.540 3之间, 岩性间物种多样性指数差异不显著. 不同海拔间灌木物种丰富度指数介于5-13之间, Shannon-Wiener指数介于1.360 8-2.429 7之间, 随海拔升高物种多样性指数表现为先升高后降低的变化趋势. 群落间Jaccard关联系数介于0-0.777 8之间, Euclidean距离系数介于19.199 8-82.400 3之间, 不同岩性、海拔间群落相似性程度差异均较明显. 本研究表明岩性对洱海流域灌丛植被群落结构、种类组成及物种多样性的影响较小, 但对群落相似性、优势种种类及数量的影响较大, 而海拔对以上各方面的影响均较大, 其中由海拔梯度变化导致气温、降水的梯度性变化是关键因素, 同时可能还与原生植被、土壤及人为干扰等因素有关. (图2 表6 参59)

关键词 灌丛; 岩性; 海拔梯度; 群落结构; 物种多样性; 洱海流域

Community structure of typical shrubs in different lithological areas of the Erhai Basin

CHAI Yong¹, GUO Zhaocheng², HE Liping¹, SHAO Jinping¹, ZHAO Xinfeng³, MA Saiyu¹ & LI Guixiang¹✉

¹Yunnan Academy of Forestry and Grassland, Kunming 650201, China

²China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China

³Forestry and Grassland Bureau of Gucheng County, Lijiang 674100, China

Abstract Shrub vegetation is an important part of mountain ecosystems, and understanding the relationship between lithology, altitude, and shrub community structure is of great significance for revealing the mechanisms of biodiversity maintenance in mountain ecosystems. The responses of typical shrubs to rock characteristics and altitude gradients in the Erhai Basin were studied by phytocoenology investigation and variance analysis. The results showed that a total of 115 species of vascular plants were recorded in 13 plots of seven lithologic areas in the Erhai Basin, which were divided into 8 formations and 13 communities. Below an altitude of 3 000 m, rocks except granulite-gneiss are distributed and the vegetation mainly includes warm-temperate shrubs, which are dominated by *Osteomeles schwerinae*, *Campylotropis delavayi*, *Dodonaea viscosa*, and *Coriaria nepalensis*. Above an altitude of 3 000 m, limestone, granulite-gneiss, and marl are distributed, and the vegetation mainly includes cold-temperate shrubs, which are dominated by *Quercus guyavaefolia*, *Rhododendron racemosum*, *Rhododendron fastigiatum*, and *Rhododendron alutaceum*. As the lithology changes, the species richness index of shrubs ranges from 7 to 17, and the Shannon-Wiener index ranges from 1.523 3 to 2.540 3. There was no significant difference in the species diversity index between the different lithologies. As the altitude changes, the species richness index of shrubs ranges from 5 to 13, and the Shannon-Wiener index ranges from 1.360 8 to

收稿日期 Received: 2021-01-04 接受日期 Accepted: 2021-03-22

中国地质调查局地质调查项目 (DD20190538)、国家重点研发计划项目子专题 (2017YFC050500402) 和国家自然科学基金项目 (31860045) 资助 Supported by the Geological Survey Project of China Geological Survey (DD20190538), the National Key R&D Program of China (2017YFC050500402), and the National Natural Science Foundation of China (31860045)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: 568384875@qq.com)

2.429 7. The species diversity index first increased and then decreased with increasing altitude, and the Jaccard correlation coefficient and Euclidean distance coefficient between communities range from 0 to 0.777 8 and 19.199 8 to 82.400 3, respectively. There were significant differences in community similarity between the lithologies and altitudes. This study showed that lithology has little influence on the community structure, species composition, and species diversity of shrub vegetation in the Erhai Basin, but has substantial influence on the community similarity, species, and number of dominant species. However, altitude has a significant effect on all of the above aspects. The key factor may be the change in temperature and precipitation caused by a change in altitude, and changes in factors such as native vegetation, soil, and human disturbance may also be related.

Keywords shrub; lithology; altitudinal gradient; community structure; species diversity; Erhai Basin

岩石为矿物集合体,是形成土壤的物质基础,而土壤是植物生长发育的基础^[1-2]。土壤中包含氮(N)、磷(P)、钾(K)等养分,为植物生长提供营养支持^[3],但土壤的养分含量又与岩石类型、构造、风化程度等岩性特征密切相关,因而岩石可通过影响土壤养分影响植物的生长和分布,进而影响植被生态系统的健康稳定和持续发展^[4]。反过来植物可通过产生有机酸和腐殖质影响凋落物、微生物、林下微环境等来调节土壤养分的固定和矿化^[5-7],促进岩石的形成或分解。可见,岩石、土壤、植物是相互作用的统一体^[8-9],研究它们三者之间的能量流动和物质循环关系,可为揭示生物多样性维持机制、石漠化驱动机制提供理论依据,对指导区域水土流失控制、石漠化治理、植被恢复等亦具有现实意义。

山地生态系统具有独特的生态-水文过程,区域内海拔变化引起的水热条件差异,使得植物群落结构和多样性组成在海拔梯度上表现出极大差异^[10-11]。植物群落多样性随海拔升高可表现为单调下降、单调升高、先降低后升高以及先升高后降低等多种变化格局^[12-17],如何对这些不同区域植被与海拔变化之间存在的调控机制和适应关系进行合理的生态学解释,一直较受关注^[18-22]。灌丛植被作为山地生态系统的重要组成部分,在维持生态系统结构和功能稳定以及区域生态环境保护等方面起着至关重要的作用^[23-25]。

洱海处于三江褶皱系与扬子准地台两个一级大地构造单元的结合部位,该区域地层在抬升过程中西升东降,西部隆起即为苍山,东部陷落而成洱海^[26]。洱海为典型的内陆断陷盆地,流域内高山、峡谷、丘陵、盆地并存,山、水、林、田、湖、草兼具,是当地社会经济的重要生态屏障。洱海流域灌丛类型多样,在高海拔区有受气候条件限制较多的寒温性高山杜鹃灌丛,在中、低海拔区有受土壤基质影响较多的暖性石灰岩灌丛及受人为活动限制较多的栎类萌生灌丛,分布面积约占林地总面积的三分之一,是当地森林资源的重要组成部分,在维持区域生态平衡和稳固生态安全屏障中起着极其重要的作用。之前关于洱海流域灌丛植被在苍山及洱海湖滨带植物、植被的研究文献中有所提及^[27-32],但均未对特定的植物群落作详细介绍。另外针对洱海流域的岩石特征^[33-34]、土壤营养^[35]、碳储量^[36]、生态保护修复^[37]、生态系统健康评价^[38]等方面也有一些研究。我们对洱海流域不同地质环境下典型灌丛群落的种类组成、结构特征、物种多样性、群落相似性以及分布数量的影响因子进行研究,揭示其植物、植被分布与地质建造、海拔等的相互关系,可为深入评价流域尺度资源环境承载力提供基础数据,为区域生态保护与系统修复提供理论依据。

1 研究区概况

洱海位于云南省大理州中部,地处澜沧江、金沙江和元江三大水系的分水岭地带^[39],西起苍山东麓,东止玉案山西麓,北起洱源县南端,南止大理市下关,南北长约40 km,流域面积2 565 km²。流域内同时具有高山、中山、中山峡谷、高原丘陵和盆地等地貌类型,整体呈现西北高东南低、四周高中间低的地势特征,相对高差达2 200 m。成土母质以片麻岩、花岗岩、大理岩、石灰岩等为主,土壤类型随海拔由低到高依次有红壤、棕壤、黄棕壤、暗棕壤、高山草甸土和高山灌丛草甸土等。气候属亚热带高原季风气候,四季温和,日照充足,干湿季分明。多年平均气温15.1℃,最高月平均气温20.1℃,最低月平均气温8.8℃;全年日照时间2 250-2 480 h,日照百分率52%-56%;多年平均降水量1 048 mm,每年的5月下旬至10月为雨季,降水量占全年的85%以上,11月至翌年5月为干季^[40-41]。流域水平地带性植被主要为半湿润常绿阔叶林和云南松林,前者目前多数已遭破坏而形成各类灌丛,后者为该区域现有分布面积最广的植被类型^[36]。

2 研究方法

2.1 样地设置

采用典型取样法,在洱海流域7个岩性区共设置13个20 m × 20 m典型灌丛样地进行群落调查,根据岩性、植被类型的分布情况,其中在砂岩、泥岩、大理岩、玄武岩、变粒岩-片麻岩区各设1个样地,在泥灰岩区设2个样地、在石灰岩区设6个样地。调查时先将20 m × 20 m的样地划分成16个5 m × 5 m的样方,13个样地共划分208个样方。以每个5 m × 5 m样方为基本单位,调查样地内的所有灌木种类、木质藤本及个别零星分布的乔木,主要记录其种名、高度、盖度、生长状况等指标。同时在样地四角各设置1个2 m × 2 m样方进行草本层植物调查,并记录样地位置、海拔、坡向、坡度、土壤、岩性等生境特征。样地岩性、群落类型及生境概况见表1。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 群落分类与命名方法 采用云南植被类型分类的原则和方法划分植被亚型、群系和群丛,并按照《云南植被》的处理方法将群丛统称为群落^[42]。群落命名也根据群落主要层的优势种来命名,本文采用灌木层重要值最大的两个树种来对群落进行命名。灌木重要值计算方法参阅文献^[43]。

2.2.2 生态位宽度测度 生态位宽度是指一个种群在一个群落中所利用的各种不同资源的总和。一个种的生态位越宽,该种的特化程度就越小,它更倾向于是一个泛化种,具有较强的竞争能力^[44]。本文选用Levins指数 $B_{(L)j}$ 及Shannon指数 $B_{(SW)j}$

来测度生态位宽度,各指数计算方法参阅文献[44].

2.2.3 群落物种多样性测度 选用物种丰富度(S)、Shannon-Wiener指数(H')、Pielou均匀度指数(J)、Simpson指数(D)等4个定量指标来测度和分析不同岩性典型灌丛群落物种多样性特征,各指数计算方法参阅文献[44].采用单因素方差分析对不同样地群落多样性指数的差异进行检验.

2.2.4 群落相似性测度 群落相似程度用相似系数或相异系数来表示,前者数值越大表示越相似,后者数值越小表示越相似.本文的相似系数采用Jaccard关联系数,相异系数采用Euclidean距离系数.各指数计算方法参阅文献[44].

2.2.5 物种分布数量与岩性、海拔因素的方差分析 将208个5 m × 5 m样方按岩性及海拔因子进行分类,其中岩性分为7类:砂岩(1)、泥岩(2)、大理岩(3)、石灰岩(4)、变粒岩-片麻岩(5)、泥灰岩(6)、玄武岩(7);以洱海水域水平面高度(约2 000 m)为基带,以500 m为带高,将海拔分为4类:2 000-2 500 m(1)、2 500-3 000 m(2)、3 000-3 500 m(3)、3 500-4 000 m(4).

统计各灌木种类在不同样方中的个体数量,并分别以岩性、海拔为因素水平进行方差分析,以检验不同岩性、海拔样方中物种分布数量的差异显著性.方差分析中若 $F < F_{0.05}$,说

明物种分布数量在不同样方中没有显著差异,即可认为物种分布不受该因素影响.若 $F > F_{0.05}$ 或 $F > F_{0.01}$,则说明物种分布数量在不同样方中差异达到显著或极显著水平,即可认为物种分布数量受该因素影响,此时再用最小显著差数法(LSD法)进行多重比较,以检验物种分布数量在哪些因子中存在显著差异,从而判定这些灌木种类对岩性或海拔因子的偏好性.方差分析、 F -检验及多重比较方法参阅文献[45].所有计算过程在Microsoft Excel中完成.

3 结果与分析

3.1 不同岩性区典型灌丛群落的种类组成及优势种数量特征

7个岩性区13块样地共记录维管植物115种,隶属49科98属.其中灌木植物55种,主要集中在蔷薇科(Rosaceae, 12种)、蝶形花科(Papilionaceae, 7种)、杜鹃花科(Ericaceae, 6种)及忍冬科(Caprifoliaceae, 4种);草本植物60种,主要集中在菊科(Compositae, 13种)、禾本科(Poaceae, 9种)、唇形科(Labiatae, 5种)及毛茛科(Ranunculaceae, 3种);其他41科各具1-2种.

根据不同岩性区典型灌丛的种类组成及灌木植物在样地

表1 洱海流域不同岩性区典型灌丛群落类型及样地生境
Table 1 Types and habitats of typical shrubs in different lithologic regions of the Erhai Basin

样地号 Sample number	岩性 Lithologic	植被亚型 Sub-vegetation type	群系 Formation	群落 Community	海拔 Altitude (h/m)	坡向 Aspect	坡度 Slope (a/°)	土壤类型 Soil type
1	砂岩 Sandstone	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	西南杭子梢灌丛 Form. <i>Campylotropis delavayi</i>	西南杭子梢、华西小石积群落 <i>C. delavayi</i> & <i>O. schwerinae</i> Comm.	2158	南 South	6	黄红壤 Yellow-red soil
2	泥岩 Mudstone	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i>	华西小石积、铁仔群落 <i>O. schwerinae</i> & <i>Myrsine africana</i> Comm.	2545	西南 Southwest	8	黄棕壤 Yellow-brown soil
3	大理岩 Marble	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i>	华西小石积、车桑子群落 <i>O. schwerinae</i> & <i>D. viscosa</i> Comm.	2283	东南 Southeast	35	黄红壤 Yellow-red soil
4	石灰岩 Limestone	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i>	华西小石积、须弥茜树群落 <i>O. schwerinae</i> & <i>Himalia lichiangensis</i> Comm.	2155	南 South	15	黄红壤 Yellow-red soil
5	石灰岩 Limestone	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	车桑子灌丛 Form. <i>Dodonaea viscosa</i>	车桑子、垫状迎春群落 <i>D. viscosa</i> & <i>Jasminum nudiflorum</i> var. <i>pulvinatum</i> Comm.	2145	东南 Southeast	5	黄红壤 Yellow-red soil
6	石灰岩 Limestone	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	车桑子灌丛 Form. <i>Dodonaea viscosa</i>	车桑子、华西小石积群落 <i>D. viscosa</i> & <i>O. schwerinae</i> Comm.	2069	西 West	6	黄红壤 Yellow-red soil
7	石灰岩 Limestone	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	马桑灌丛 Form. <i>Coriaria nepalensis</i>	马桑、华西小石积群落 <i>C. nepalensis</i> & <i>O. schwerinae</i> Comm.	2395	西南 Southwest	8	黄红壤 Yellow-red soil
8	石灰岩 Limestone	寒温性灌丛 Cold-temperate shrub	棕背杜鹃灌丛 Form. <i>Rhododendron alutaceum</i>	棕背杜鹃、红棕杜鹃群落 <i>R. alutaceum</i> & <i>R. rubiginosum</i> Comm.	3750	西北 Northwest	5	暗棕壤 Dark-brown soil
9	石灰岩 Limestone	寒温性灌丛 Cold-temperate shrub	帽斗栎灌丛 Form. <i>Quercus guyavadfolia</i>	帽斗栎、大白花杜鹃群落 <i>Q. guyavadfolia</i> & <i>R. decorum</i> Comm.	3225	西北 Northwest	12	棕壤 Brown soil
10	变粒岩-片麻岩 Granulite-Gneiss	寒温性灌丛 Cold-temperate shrub	腋花杜鹃灌丛 Form. <i>Rhododendron racemosum</i>	腋花杜鹃、黑穗箭竹群落 <i>R. racemosum</i> & <i>Fargesia melanostachys</i> Comm.	3035	西北 Northwest	15	棕壤 Brown soil
11	泥灰岩 Marlston	寒温性灌丛 Cold-temperate shrub	密枝杜鹃灌丛 Form. <i>Rhododendron fastigiatum</i>	密枝杜鹃、峨眉蔷薇群落 <i>R. fastigiatum</i> & <i>Rosa omeiensis</i> Comm.	3658	西北 Northwest	16	暗棕壤 Dark-brown soil
12	泥灰岩 Marlston	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	华西小石积灌丛 Form. <i>Osteomeles schwerinae</i>	华西小石积、脱毛雀梅藤群落 <i>O. schwerinae</i> & <i>Sageretia yilinii</i> Comm.	2134	南 South	6	黄红壤 Yellow-red soil
13	玄武岩 Basalt	暖温性灌丛 Warm-temperate shrub	车桑子灌丛 Form. <i>Dodonaea viscosa</i>	车桑子、云南松群落 <i>D. viscosa</i> & <i>Pinus yunnanensis</i> Comm.	2100	西 West	10	黄红壤 Yellow-red soil

中重要值的分布情况,发现不同岩性区典型灌丛的物种数量及优势种组成均存在较大差异。在物种数量方面(统计结果见表2),泥岩、大理岩区分布的种类较为丰富,样地种数均超过30种,石灰岩区仅7号样地种数在30种以上,其余样地种数介于8-17种之间,其他岩性区除玄武岩区有24种外,砂岩、变粒岩-片麻岩及泥灰岩区各样地种数介于14-19种之间,物种相对较为贫乏。石灰岩、大理岩区样地中还具有较多的仅限本区的种类,如石灰岩区包括垫状迎春(*Jasminum nudiflorum* var. *pulvinatum*)、尖齿木蓝(*Indigofera argutidens*)、红棕杜鹃(*Rhododendron rubiginosum*)、棕背杜鹃(*Rhododendron alutaceum*)等13种灌木,大理岩区包括密花荚蒾(*Viburnum congestum*)、越南叶下珠(*Phyllanthus cochinchinensis*)、长波叶山蚂蝗(*Desmodium sequax*)等5种灌木。其余岩性区样地中仅限本区的灌木种类则相对较少。

样地中灌木植物重要值排序情况反映了不同岩性区典型灌丛在优势种种类组成方面的差异(统计结果见表3)。从表3中可以看出,砂岩区以西南杭子梢(*Campylotropis delavayi*)重要值较大,泥岩、大理岩区以华西小石积(*Osteomeles schwerinae*)重要值较大,玄武岩区以车桑子(*Dodonaea viscosa*)的重要值较大,变粒岩-片麻岩区则以腋花杜鹃(*Rhododendron racemosum*)重要值最大。在石灰岩区的6个样地中,华西小石积、车桑子、马桑(*Coriaria nepalensis*)、棕背杜鹃和帽斗栎(*Quercus guyavadiifolia*)等种各自在不同的样地中具有较大重要值,而在泥灰岩区的2个样地中,重要值较大的种分别为华西小石积和密枝杜鹃(*Rhododendron fastigiatum*)。从种的分布来看,华西小石积分布于除变粒岩-片麻岩区外的6个岩性区,车桑子和脱毛雀梅藤(*Sageretia yilinii*)分布于除变粒岩-片麻岩、泥灰岩区外的5个岩性区,它们在样地中的出现频率均在60%以上,且在大部分样地中的重要值排位均较靠前。在生态位宽度方面,这3种灌木的Levins指数均在0.35以上、Shannon指数均在0.70以上,说明它们对样地资源的占有率也明显高于其他种类。这些都表明这3种灌木是洱海流域典型灌丛中极为常见和重要的优势种。西南杭子梢、铁仔(*Myrsine africana*)、小雀花(*Campylotropis polyantha*)、岷谷木蓝(*Indigofera lenticellata*)、短绒槐(*Sophora velutina*)、木帚栒子(*Cotoneaster dielsianus*)、须弥茜树(*Himalrandia lichiangensis*)、云南松(*Pinus*

yunnanensis)等种类则分布于3-4个岩性区,生态位宽度Levins指数均在0.15以上、Shannon指数均在0.30以上,它们也是洱海流域典型灌丛中较为常见的优势种或伴生种。另有一些种类分布仅局限于1-2个岩性区,生态位宽度值较低,但数量较丰富,在各自样地中也占有较强的优势,如马桑、帽斗栎、腋花杜鹃、密枝杜鹃、棕背杜鹃等。

3.2 不同岩性区典型灌丛群落的类型及特征

根据各样地灌木植物重要值的分布情况,并参照《云南植被》的分类系统,洱海流域7个岩性区典型灌丛共划分出8个群系(Formation)、13个群落(Community)(详见表1)。其中,砂岩、泥岩、大理岩、变粒岩-片麻岩、玄武岩区各有1个群系1个群落,石灰岩区有5个群系6个群落,泥灰岩区有2个群系2个群落。

群系1:西南杭子梢灌丛(Form. *Campylotropis delavayi*)。

西南杭子梢灌丛为暖温性灌丛,主要分布在砂岩区,包括1个群落,西南杭子梢、华西小石积群落(*C. delavayi* & *O. schwerinae* Comm.)。该群落样地海拔2 158 m,坡向南坡,平均坡度6°,红壤。灌丛呈群丛状,分布较密但丛冠不相连。灌木层高0.5-2.2 m,层盖度30%-50%。其中西南杭子梢密度2 100株/hm²,平均高度达2.5 m以上,重要值33.02%,是样地中优势最大的种类。华西小石积在样地中数量最多,在高度上虽较西南杭子梢稍矮但密集成群,其重要值也达24.73%。其他伴生种包括车桑子、脱毛雀梅藤、须弥茜树、短绒槐、鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)、岷谷木蓝等6种,它们的重要值都在5%以上。草本层高0.05-1.0 m,层盖度50%-70%,种类包括黄背草(*Themeda triandra*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)等10种及一种匍匐木质藤本植物即地果(*Ficus tikoua*)。

群系2:华西小石积灌丛(Form. *Osteomeles schwerinae*)。

华西小石积灌丛为暖温性灌丛,包括4个群落,华西小石积、铁仔群落(*O. schwerinae* & *M. africana* Comm.)、华西小石积、车桑子群落(*O. schwerinae* & *D. viscosa* Comm.)、华西小石积、须弥茜树群落(*O. schwerinae* & *H. lichiangensis* Comm.)及华西小石积、脱毛雀梅藤群落(*O. schwerinae* & *Sageretia yilinii* Comm.)。分别位于泥岩、大

表2 洱海流域不同岩性区典型灌丛群落的物种数量

Table 2 Numbers of species of typical shrubs in different lithologic regions of the Erhai Basin

岩性 Lithologic	灌木数/草本数 Number of shrub/ herb	仅限该区的灌木种类 Shrub species in this area only
砂岩(1号样地) Sandstone (Plot 1)	8/11	无 Nothing
泥岩(2号样地) Mudstone (Plot 2)	13/19	火棘、西南金丝桃(2种) <i>Pyracantha fortuneana</i> and <i>Hypericum henryi</i> (2 species)
大理岩(3号样地) Marble (Plot 3)	17/23	粉叶小檗、密花荚蒾、小叶栒子、越南叶下珠、长波叶山蚂蝗(5种) <i>Berberis pruinosa</i> , <i>Viburnum congestum</i> , <i>Cotoneaster microphyllus</i> , <i>Phyllanthus cochinchinensis</i> , and <i>Desmodium sequax</i> (5 species)
石灰岩(4-9号样地) Limestone (Plot 4-9)	5-16/3-17	垫状迎春、尖齿木蓝、疏果山蚂蝗、细齿樱桃、中华柳、红棕杜鹃、棕背杜鹃等(13种) <i>Jasminum nudiflorum</i> var. <i>pulvinatum</i> , <i>Indigofera argutidens</i> , <i>Desmodium griffithianum</i> , <i>Cerasus serrula</i> , <i>Salix cathayana</i> , <i>Rhododendron rubiginosum</i> , and <i>Rhododendron alutaceum</i> etc. (13 species)
变粒岩-片麻岩(10号样地) Granulite - Gneiss (Plot 10)	7/8	黑穗箭竹、平枝栒子(2种) <i>Fargesiamelanostachys</i> and <i>Cotoneaster horizontalis</i> (2 species)
泥灰岩(11-12号样地) Marlston (Plot 11-12)	4-9/8-10	高山柏、金花小檗、密枝杜鹃(3种) <i>Sabina squamata</i> , <i>Berberis wilsonae</i> , and <i>Rhododendron fastigiatum</i> (3 species)
玄武岩(13号样地) Basalt (Plot 13)	7/17	黄连木(1种) <i>Pistacia chinensis</i> (1 species)

表3 洱海流域不同岩性区典型灌丛群落主要物种重要值及生态位宽度
Table 3 Importance values and niche widths of main species of typical shrubs in different lithologic regions of the Erhai Basin

物种名称 Name of species	砂岩 Sand- stone	泥岩 Mud- stone	大理岩 Marble	石灰岩 Limestone						变粒岩- 片麻岩 Granulite - Gneiss	泥灰岩 Marlston	玄武岩 Basalt	生态位宽度 Niche width		
	样地1 Plot 1	样地2 Plot 2	样地3 Plot 3	样地4 Plot 4	样地5 Plot 5	样地6 Plot 6	样地7 Plot 7	样地8 Plot 8	样地9 Plot 9	样地10 Plot 10	样地11 Plot 11	样地12 Plot 12	样地13 Plot 13	$B_{(L)j}$	$B_{(SW)j}$
华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i>	24.73	22.29	21.03	33.91	14.91	19.45	10.19					24.40	8.12	0.6063	0.8276
车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	11.11		13.96	5.27	25.15	39.04	7.36					8.44	45.98	0.3963	0.7095
脱毛雀梅藤 <i>Sageretia yilinii</i>	6.82		4.97	12.63	11.88	9.29	3.23					18.31	3.23	0.4676	0.7496
铁仔 <i>Myrsine africana</i>		9.76	7.11			4.65	9.80					4.79		0.3501	0.6079
岷谷木蓝 <i>Indigofera lenticellata</i>	5.79			5.83			2.84					5.18		0.2897	0.5270
小雀花 <i>Campylotropis polyantha</i>		6.94	4.89		8.40		4.86							0.2912	0.5296
鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i>	5.88			6.39			4.25							0.2246	0.4228
短绒槐 <i>Sophora velutina</i>	6.11					13.43						7.49		0.2053	0.4052
灰毛蕨 <i>Caryopteris forrestii</i>				13.34		4.20						7.19		0.1903	0.3873
木帚栒子 <i>Cotoneaster dielsianus</i>		6.32	3.37				8.13							0.2081	0.4057
西南杭子梢 <i>Campylotropis delavayi</i>	33.02			4.79								11.76		0.1510	0.3266
须弥茜树 <i>Himalrandia lichiangensis</i>	6.54			17.84								12.43		0.2022	0.3994
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>		8.85							8.83				23.83	0.1830	0.3811
大白花杜鹃 <i>Rhododendron decorum</i>								18.99	10.63					0.1425	0.2545
峨眉蔷薇 <i>Rosa omeiensis</i>										11.27	16.55			0.1485	0.2632
红棕杜鹃 <i>Rhododendron rubiginosum</i>								21.19	8.12					0.1284	0.2301
马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>		6.55					24.90							0.1148	0.1995
帽斗栎 <i>Quercus guyavadfolia</i>									26.65	19.74				0.1505	0.2659
米饭花 <i>Lyonia ovalifolia</i>									12.92	7.58				0.1441	0.2568
腋花杜鹃 <i>Rhododendron racemosum</i>									8.99	22.33				0.1302	0.2337
淡红忍冬 <i>Lonicera acuminata</i>								15.60						0.0769	0.0000
垫状迎春 <i>Jasminum nudiflorum</i> var. <i>pulvinatum</i>					17.27									0.0769	0.0000
多变石栎 <i>Lithocarpus variolosus</i>									12.42					0.0769	0.0000
高山柏 <i>Sabina squamata</i>											10.41			0.0769	0.0000
黑穗箭竹 <i>Fargesia melanostachys</i>										21.36				0.0769	0.0000
金花小檗 <i>Berberis wilsonae</i>											15.90			0.0769	0.0000
密枝杜鹃 <i>Rhododendron fastigiatum</i>											57.14			0.0769	0.0000
细齿樱桃 <i>Cerasus serrula</i>								19.56						0.0769	0.0000
中华柳 <i>Salix cathayana</i>								14.37						0.0769	0.0000
棕背杜鹃 <i>Rhododendron alutaceum</i>								29.28						0.0769	0.0000

其余25种仅出现于1-2个样地，且在样地中重要值低于10%，因篇幅原因未在表中列出。
The other 25 species only appeared in one or two plots, and their importance value was less than 10% in the plots, so they were not listed in the table due to space reasons.

理岩、石灰岩和泥灰岩区。华西小石积灌丛各群落样地海拔2 134-2 545 m，坡向为阳坡或半阳坡，坡度6-35°，黄壤或红壤。灌丛呈群丛状，多数地段丛冠密集相连。灌木层一般高0.2-2.0 m，局部地段可达2.5 m以上，层盖度20%-40%，局部地段可达70%以上。其中华西小石积常密集成球状，密度2 100-5 300株/hm²，高度0.8-1.5m，个别高度可达2.0 m以上，重要值都在20%以上，优势极为明显。除上述建群种外，其他伴生种包括水红木（*Viburnum cylindricum*）、小雀花（*Campylotropis polyantha*）、马桑、火棘（*Pyracantha fortuneana*）、常绿假丁香（*Ligustrum sempervirens*）、火把花（*Colquhounia coccinea* var. *mollis*）、长尖叶蔷薇（*Rosa longicuspis*）、灰毛蕨（*Caryopteris forrestii*）、沙针（*Osyris*

wightiana）、密花荚蒾（*Viburnum congestum*）、青刺尖（*Prinsepia utilis*）、粉绿野丁香（*Leptodermis potanini* var. *glauca*）、清香木（*Pistacia weinmannifolia*）等。草本层高0.05-1.0 m，层盖度50%-70%，局部地段可达95%以上，种类包括黄背草、白茅（*Imperata cylindrica* var. *major*）、茅叶荩草（*Arthraxon prionodes*）、黄茅、小叶三点金（*Desmodium microphyllum*）、尼泊尔老鹳草（*Geranium nepalense*）、千里光（*Senecio scandens*）、川续断（*Dipsacus asperoides*）、野拔子（*Elsholtzia rugulosa*）、匍匐风轮菜（*Clinopodium repens*）、兖州卷柏（*Selaginella involvens*）等。另外群落中也有匍匐木质藤本植物地果。

群系3: 车桑子灌丛 (Form. *Dodonaea viscosa*) .

车桑子灌丛为暖温性灌丛,主要分布在石灰岩和玄武岩区,其中石灰岩区包括2个群落,车桑子、垫状迎春群落(*D. viscosa* & *J. nudiflorum* var. *pulvinatum* Comm.)和车桑子、华西小石积群落(*D. viscosa* & *O. schwerinae* Comm.),玄武岩区包括1个群落车桑子、云南松群落(*D. viscosa* & *Pinus yunnanensis* Comm.).各群落样地海拔2 069-2 145 m,多为阳坡或半阳坡,平坡度5-10°,红壤.灌丛呈散生丛状,丛冠多不相连.灌木层高0.3-3.0 m,层盖度30%-70%.其中车桑子个体不大但数量较丰富,密度达到5 500-8 700株/hm²,高度1.5-3.0 m,重要值25.15%-45.98%.云南松作为乔木树种在周边地区有大面积分布,但在该群落中仅有其幼树或小老树分布,个体矮小,生长缓慢,并不能形成明显的乔木层.其他伴生种包括脱毛雀梅藤、短绒槐、铁仔、灰毛菴、粉枝莓(*Rubus biflorus*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、小雀花、蓝黑果荚蒾(*Viburnum atrocyaneum*)等.草本层高0.05-1.2 m,层盖度20%-80%,种类包括黄茅、黄背草、西南野古草(*Arundinella hookeri*)、细柄草(*Capillipedium parviflorum*)、黑足金粉蕨、白花鬼针草(*Bidens pilosa* var. *radiata*)、腺梗豨薟(*Siegesbeckia pubescens*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、白毛多花蒿等.另外群落中同样有匍匐木质藤本植物地果.

群系4: 马桑灌丛(Form. *Coriaria nepalensis*).

马桑灌丛为暖温性灌丛,主要分布在石灰岩区,包括1个群落:马桑、华西小石积群落(*C. nepalensis* & *O. schwerinae* Comm.).该群落样地海拔2 395 m,坡向西南坡,平均坡度8°,红壤.灌丛呈群丛状,高低错落.灌木层高0.5-3.0 m,层盖度40%-70%.其中马桑枝条伸展,覆盖优势明显,其密度达到2 000株/hm²,平均高度2.8 m,单株最高达3.5 m,重要值在20%以上.其他伴生种包括铁仔、木帚栒子(*Cotoneaster dielsianus*)、车桑子、水红木、脱毛雀梅藤、青刺尖、鞍叶羊蹄甲、沙针等14种.草本层高0.05-0.8 m,层盖度70%-90%,种类包括旱茅、黄茅、白毛多花蒿、细柄草、川续断、西南野古草、野拔子等17种.

群系5: 帽斗栎灌丛(Form. *Quercus guyavadvolia*).

帽斗栎灌丛为寒温性灌丛,主要分布在浅灰色石灰岩区,包括1个群落:帽斗栎、大白花杜鹃群落(*Q. guyavadvolia* & *R. decorum* Comm.).该群落样地海拔3 225 m,坡向西北坡,平均坡度12°,黄棕壤.帽斗栎呈灌木状,与多种杜鹃混生,形成密集的栎类萌生灌丛群落.灌木层高0.5-2.5 m,层盖度50%-70%.其中帽斗栎、大白花杜鹃密度都在2 000株/hm²以上,平均高度都在1.5m以上,重要值都在15%以上.其他伴生种还包括米饭花(*Lyonia ovalifolia*)、多变石栎(*Lithocarpus variolosus*)、腋花杜鹃(*R. racemosum*)、云南松等6种.草本层高0.05-0.5 m,层盖度10%-20%,种类包括华火绒草(*Leontopodium sinense*)、柳叶菜(*Epilobium hirsutum*)、纤维鳞毛蕨(*Dryopteris sinofibrillosa*)、绵毛橐吾(*Ligularia vellerea*)、瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme*)等5种.

群系6: 腋花杜鹃灌丛(Form. *Rhododendron racemosum*).

腋花杜鹃灌丛为寒温性灌丛,主要分布在变粒岩-片麻岩区,包括1个群落,腋花杜鹃、黑穗箭竹群落(*R. Racemosum* & *Fargesia melanostachys* Comm.).该群落样地海拔3 035 m,坡向西北坡,平均坡度15°,棕壤.灌丛群丛状.灌木层高

0.5-2.2 m,层盖度60%-80%.其中腋花杜鹃平均高1.1 m,个别植株可达1.5 m,密度6 400株/hm²,黑穗箭竹平均高度0.5 m,呈散生状,密度达到80 100株/hm²,在样地中几乎形成背景,它们的重要值都在20%以上.其他伴生种包括帽斗栎、峨眉蔷薇、大白花杜鹃、米饭花及平枝栒子等种,它们重要值都在5%以上.草本层高0.05-0.4 m,层盖度20%-40%.种类包括钩状蒿草(*Kobresia uncinoides*)、凉山悬钩子(*Rubus fockeanus*)、草血竭(*Polygonum paleaceum*)、鞭打绣球(*Hemiphragma heterophyllum*)等8种.

群系7: 密枝杜鹃灌丛(Form. *Rhododendron fastigiatum*).

密枝杜鹃灌丛为寒温性灌丛,主要分布在泥灰岩区,包括1个群落,密枝杜鹃、峨眉蔷薇群落(*R. Fastigiatum* & *Rosa omeiensis* Comm.).该群落样地海拔3 658 m,坡向西北坡,平均坡度16°,黄棕壤.群落属典型的高山垫状杜鹃灌丛类型.灌木层高0.2-0.5 m,层盖度50%-80%.其中密枝杜鹃极度矮化呈垫状丛生,高度一般不超过0.5 m,盖度在60%以上,在样地中形成背景,其重要值超过50%.其他伴生种仅有峨眉杜鹃、金花小檗(*Berberis wilsonae*)及高山柏(*Sabina squamata*)3种,都为零星分布.草本层高0.05-0.3 m,层盖度10%-30%.种类包括钩状蒿草、滇蝇子草(*Silene yunnanensis*)、柳叶菜、草血竭、蒲公英、凉山悬钩子等.

群系8: 棕背杜鹃灌丛(Form. *Rhododendron alutaceum*).

棕背杜鹃灌丛为寒温性灌丛,主要分布在海拔较高的石灰岩区,包括1个群落,棕背杜鹃、红棕杜鹃群落(*R. alutaceum* & *R. rubiginosum* Comm.).该群落样地海拔3 750 m,坡向西北坡,平均坡度5°,棕壤.群落属典型的高山高大杜鹃灌丛类型.灌木层高2.0-6.0 m,层盖度50%-70%.其中棕背杜鹃数量较丰富(密度2 100株/hm²)、植株较为高大(高度多在4.0 m以上,有时主干较明显而呈小乔木状,但胸径一般都不超过5 cm),在群落中优势明显.其他种类包括红棕杜鹃、细齿樱桃(*Cerasus serrula*)、淡红忍冬(*Lonicera acuminata*)、中华柳(*Salix cathayana*)等4种.草本层高0.05-0.1 m,层盖度5%-20%.种类仅记录到繁缕(*Stellaria media*)、凉山悬钩子、钩状蒿草3种细弱匍匐草本,个体也都较矮小,平均高度不到0.1 m,盖度不超过20%.

3.3 不同岩性区及不同海拔典型灌丛群落的物种多样性

不同岩性区样地群落灌木层物种丰富度指数($F = 1.197\ 5$, $P < 0.5$)介于7-17之间, Simpson指数($F = 0.969\ 5$, $P < 0.5$)介于0.104 2-0.289 0之间, Shannon-Wiener 指数($F = 1.089\ 5$, $P < 0.5$)介于1.523 3-2.540 3之间, Pielou均匀度指数($F = 1.460\ 8$, $P < 0.5$)介于0.782 2-0.951 8之间;草本层物种丰富度指数($F = 2.454\ 8$, $P < 0.5$)介于8-23之间, Simpson指数($F = 0.725\ 0$, $P < 0.5$)介于0.057 4-0.209 3之间, Shannon-Wiener 指数($F = 1.444\ 2$, $P < 0.5$)介于1.767 7-2.990 5之间, Pielou均匀度指数($F = 0.980\ 4$, $P < 0.5$)介于0.842 9-0.953 7之间(表4).可以看出,无论是灌木层还是草本层,不同岩性间样地群落物种多样性指数差异较小.

不同海拔样地群落灌木层物种丰富度指数($F = 1.951\ 8$, $P < 0.5$)介于5-13之间, Simpson指数($F = 2.388\ 5$, $P < 0.5$)介于0.104 2-0.301 9之间, Shannon-Wiener 指数($F = 2.788$

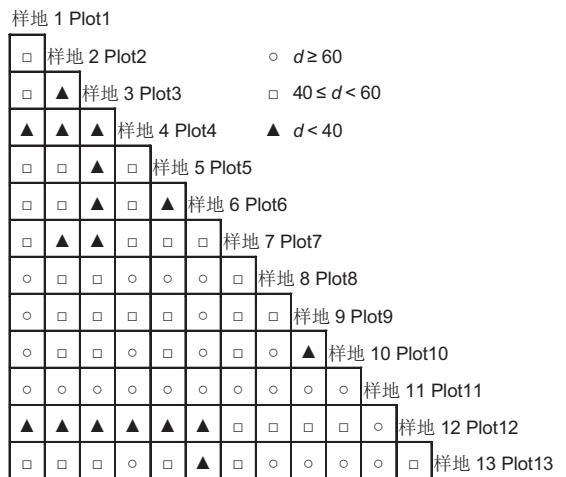


图2 洱海流域不同岩性区典型灌丛群落Euclidean距离系数半矩阵图。
Fig. 2 Semi-matrix diagram about Euclidean distance coefficient of typical shrubs in different lithologic regions of the Erhai Basin.

木物种分布数量进行方差分析,结果表明在两个因子中,各有17、13种的 F 值没有达到显著水平($F < F_{0.05}$),各有13、17种的 F 值达到了显著或极显著水平($F > F_{0.05}$ 或 $F > F_{0.01}$)。综合比较后发现样地中实际共有11种(占36.67%)的 F 值在两个因子

中均没有达到显著水平,说明它们分布数量受岩性、海拔因子影响不大。其余19种(占63.33%)的 F 值至少在一个因子中达到了显著或极显著水平,说明这些种的分布数量受岩性或海拔因子的影响较大。它们的方差分析及多重比较结果见表6。

从表6中可以看出,西南杭子稍、云南松2种仅在岩性因子中达到极显著水平,经多重比较发现它们各自在砂岩及泥灰岩区的数量与其他岩性区有极显著差异。脱毛雀梅藤、米饭花、淡红忍冬、多变石栎、中华柳、棕背杜鹃等6种仅在海拔因子中达到极显著水平,经多重比较发现脱毛雀梅藤在2 000-2 500 m、米饭花及多变石栎在3 000-3 500 m、其余3种在3 500-4 000 m的分布数量与其他海拔区有极显著差异。

其余11种则在岩性及海拔因子中均达到了极显著水平。对它们的多重比较结果显示,华西小石积、铁仔及小雀花等在砂岩、泥岩及大理岩区、车桑子在玄武岩区的数量分布有极显著差异,在海拔高度上则集中在2 000-2 500 m或2 500-3 000 m范围。金花小檗及密枝杜鹃在泥灰岩区的数量分布有显著或极显著差异,在海拔高度上集中在3 500-4 000 m范围。大白花杜鹃、峨眉蔷薇、帽斗栎、腋花杜鹃及黑穗箭竹等5种的数量分布均在变粒岩-片麻岩区存在极显著差异,在海拔高度上都集中在3 000-3 500 m范围。

以上方差分析及多重比较结果表明洱海流域灌木种类中

表6 洱海流域不同岩性区典型灌丛群落物种分布受岩性、海拔影响的方差分析及多重比较结果

Table 6 Results of analysis of variance and multiple comparison of the distribution of species affected by lithology & altitude factors in different lithologic regions of the Erhai Basin

物种名称 Name of species	岩性 Lithologic			海拔 Altitude		
	F	极显著 Extremely significant difference	显著 Significant difference	F	极显著 Extremely significant difference	显著 Significant difference
华西小石积 <i>Osteomeles schwerinae</i>	7.9513**	2-3, 6, 4, 7, 5; 1-4, 7, 5; 3-7, 5; 6-5	1-6; 3-4	24.7665**	2-1, 4, 3; 1-4; 1-3	
车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i>	5.4887**	7-3, 4, 1, 6, 2, 5		5.7011**		1-2, 3, 4
脱毛雀梅藤 <i>Sageretia yilinii</i>	1.5722			6.8527**	1-2, 3, 4	
铁仔 <i>Myrsine africana</i>	26.1246**	2-3, 4, 6, 1, 5, 7; 3-4, 6, 1, 5, 7		37.2640**	2-1, 3, 4	
峨眉木蓝 <i>Indigofera lenticellata</i>	1.1853			0.9846		
小雀花 <i>Campylotropis polyantha</i>	13.0042**	2-4, 1, 5, 6, 7; 3-4, 1, 5, 6, 7	2-3	12.6257**	2-1, 3, 4	
鞍叶羊蹄甲 <i>Bauhinia brachycarpa</i>	0.9661			1.2637		
短绒槐 <i>Sophora velutina</i>	0.4326			1.3140		
灰毛蕨 <i>Caryopteris forrestii</i>	1.5318			1.5990		
木帚栒子 <i>Cotoneaster dielsianus</i>	0.6796			1.2049		
西南杭子稍 <i>Campylotropis delavayi</i>	48.2578**	1-6, 4, 2, 3, 5, 7		1.0256		
须弥茜树 <i>Himalrandia lichiangensis</i>	1.1216			2.1327		
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	7.2796**	7-2, 4, 1, 3, 5, 6		0.4103		
大白花杜鹃 <i>Rhododendron decorum</i>	8.2781**	5-4, 2, 1, 3, 6, 7		108.5538**	3-1, 2, 4	
峨眉蔷薇 <i>Rosa omeiensis</i>	4.0714**	5-1, 2, 3, 4, 7	6-1, 2, 3, 4, 7	18.0158**	3-1, 2, 4	
红棕杜鹃 <i>Rhododendron rubiginosum</i>	0.5286			2.4824		
马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	0.7097			0.7252		
帽斗栎 <i>Quercus guyavardfolia</i>	11.0865**	5-4, 2, 1, 3, 6, 7		34.8191**	3-1, 2, 4	
米饭花 <i>Lyonia ovalifolia</i>	0.7004			17.8223**	3-1, 2, 4	
腋花杜鹃 <i>Rhododendron racemosum</i>	18.8795**	5-4, 1, 2, 3, 6, 7		58.1952**	3-1, 2, 4	
淡红忍冬 <i>Lonicera acuminata</i>	0.3518			4.2843**	4-1, 2, 3	
垫叶迎春 <i>Jasminum nudiflorum</i> var. <i>pulvinatum</i>	0.6622			0.7270		
多变石栎 <i>Lithocarpus variolosus</i>	0.5769			8.1231**	3-1, 2, 4	
高山柏 <i>Sabina squamata</i>	0.9066			1.9341		
黑穗箭竹 <i>Fargesia melanostachys</i>	383.8781**	5-1, 2, 3, 4, 6, 7		13.0671**	3-1, 2, 4	
金花小檗 <i>Berberis wilsonae</i>	2.3680		6-1, 2, 3, 4, 5, 7	5.0517**	4-1, 2, 3	
密枝杜鹃 <i>Rhododendron fastigiatum</i>	5.4000**	6-1, 2, 3, 4, 5, 7		11.5200**	4-1, 2, 3	
细齿樱桃 <i>Cerasus serrula</i>	0.1756			1.9341		
中华柳 <i>Salix cathayana</i>	0.3671			4.5128**	4-1, 2, 3	
棕背杜鹃 <i>Rhododendron alutaceum</i>	0.5061			6.7923**	4-1, 2, 3	

**表示差异达到极显著水平, *表示差异达到显著水平。岩性: 1, 砂岩; 2, 泥岩; 3, 大理岩; 4, 石灰岩; 5, 变粒岩-片麻岩; 6, 泥灰岩; 7, 玄武岩。海拔: 1, 2 000-2 500 m; 2, 2 500-3 000 m; 3, 3 000-3 500 m; 4, 3 500-4 000 m。
** indicates extremely significant difference ($F > F_{0.01}$), and * indicate significant difference ($F > F_{0.05}$). Lithologic: 1, Sandstone; 2, Mudstone; 3, Marble; 4, Limestone; 5, Granulite - Gneiss; 6, Marlstone; 7, Basalt. Elevation: 1, 2 000-2 500 m; 2, 2 500-3 000 m; 3, 3 000-3 500 m; 4, 3 500-4 000 m.

大部分的分布数量与岩性、海拔因子均有一定关系,且其中较多种类的分布数量同时受到二者的影响。

4 讨论

4.1 岩性对植物群落结构及物种多样性的影响

不同岩石由于成因、构造和化学成分等的差异,在自然演化过程中经不断的物理、化学、生物等风化作用及剥蚀作用,发育为不同的地貌形态,如石灰岩地区发育峰林、峡谷地形,石英岩山地峰高且陡峻,砂岩分布地区多悬崖和石柱^[46]。不同岩性形成的生态地理环境也有较大差异,杨胜元等的研究表明在贵州东南部变质岩分布区生态环境最好,西部玄武岩分布区生态环境也较好,而碳酸盐岩分布区生态环境则较差,石漠化严重,土壤贫瘠^[47]。张晓晓等通过检测不同岩性和植被类型条件下喀斯特土壤丛枝菌根真菌群落结构的变化^[48],栗维斌等通过比较桂西石灰岩和白云岩发育土壤的土层厚度、pH值、有机质含量、全氮、全磷和全钾等含量的差异,均发现岩性对土壤理化性质有显著性影响^[49]。另外刘映良等研究了不同岩性上马尾松、杉木生长和生物量关系^[50],杜文军等研究了不同岩性上日本柳杉的生长情况^[51],符裕红等研究了喀斯特不同岩石生境下白栎群落的物种多样性特征^[52]。这些研究都表明岩石可通过影响地貌形态、地理环境、土壤养分含量等对植物生长、分布以及植物群落结构及物种多样性等产生影响。本研究通过分析洱海流域典型灌丛的群落特征,发现不同岩性间灌丛植被在群落结构、种类组成、生态外貌及群落物种多样性方面具有很强的一致性,但各群落间的相似性、优势种组成及数量分布则存在较大的差异。就灌丛类型(亚型级)而言,除变粒岩-片麻岩外,各岩性区均分布有暖温性灌丛,不仅有多种灌木(如华西小石积、车桑子、脱毛雀梅藤、西南杭子梢、铁仔、小雀花、岷谷木蓝、木帚栒子等)作为优势种或常见种或较为显著的种为各区域所共有,而且在生态外貌上多表现出丛生、小叶、多刺、根系发达等旱生生态特点。这类灌丛受干旱基质的影响严重,主要分布在亚热带气候下的石灰岩山地,在以往文献中往往被统称为暖性石灰岩灌丛^[42],很少在岩性上作进一步区分。洱海形成年代久远,地质构造复杂,流域内多种岩石镶嵌分布,灌丛类型也丰富多样,各群落物种数量及优势种组成都各有不同,对这些灌丛按岩性进行区分有利于深入认识该流域灌丛植被的性质特征。就群落物种多样性而言,不同岩性间样地群落灌木层及草本层各物种多样性指数间的差异均未达到显著水平,其中大理岩、泥岩样地群落的物种多样性水平相对较高,而泥灰岩、玄武岩样地群落的物种多样性水平相对较低。岩性对这些灌丛群落的相似性程度也有较大影响,前面分析结果表明,砂岩与泥灰岩(群落1-12)、泥岩与大理岩(群落2-3)间灌丛群落的相似性程度较高,而变粒岩-片麻岩(群落10)与其他岩性间灌丛群落的相似性程度都较低。石灰岩区灌丛间群落相似性还与海拔有一定关系,较低海拔区(群落4、5、6、7)与其他岩性之间的相似性程度较高,而较高海拔区(群落8、9)与其他岩性之间的相似性程度较低(图1、图2)。

4.2 海拔对植物群落结构、物种多样性的影响及生态学解释

洱海流域海拔3 000 m以下范围为暖温带、中温带区,年平均气温在8℃以上,降水量在1 600 mm以下,其中海拔2 000 m左右的基带年平均气温在14℃以上,多年平均降雨量不足1 200 mm,气候特征总体表现为气温较高但降水量

少^[27, 30]。该范围影响植被的主导因子主要是基质干旱条件,灌丛植被以暖温性灌丛为主,种类多数具耐干旱、适应性广等特征,物种也较为丰富,其中海拔2 000-2 500 m范围主要以华西小石积、西南杭子梢、车桑子、马桑等为优势种,海拔2 500-3 000 m范围主要以华西小石积、铁仔、小雀花等为优势种。海拔3 000 m以上范围为寒温带区,年平均气温在8℃以下,降水量在1 600 mm以上,最高可达2 500 mm,气候特征表现为雨量充沛但气温较低。该范围影响植被的主导因子已变为受海拔因子控制的偏冷偏湿生境,灌丛植被以寒温性灌丛为主,群落中物种较为贫乏,其中海拔3 000-3 500 m范围灌丛群落主要以帽斗栎、大白花杜鹃、腋花杜鹃等为优势种,海拔3 500-4 000 m范围灌丛群落主要以密枝杜鹃、棕背杜鹃、红棕杜鹃、峨眉蔷薇等为优势种(表1)。可以看出,海拔变化对灌丛植物群落结构特征及种类组成的影响非常明显,这很大程度是因为海拔梯度变化引起温度、降水等环境条件的梯度变化,进而影响植被的群落结构和种类组成,决定群落的物种多样性格局^[11-12, 53-54]。

洱海流域灌丛群落各物种多样性指数随海拔升高主要表现为先升高后降低的变化趋势,这种单峰格局在各山地均较为常见^[13-14, 21, 55-58]。一般认为这是由于低海拔区植物生长主要受降水限制,高海拔区植物生长主要受温度限制,而中海拔区的降水量和温度则可能为植物生长提供了相对优越的水热资源配置^[19-21]。本文分析认为洱海流域海拔2 500-3 000 m范围灌丛群落的物种多样性水平最高,其原因除气温、降水等关键因素外,还应考虑原生植被、土壤及人为干扰等因素。该海拔范围原生植被主要是以栎类林为代表的中山湿性常绿阔叶林^[29],林下植被复杂,经破坏后形成的灌丛群落地被物较为丰富,土壤(黄棕壤)肥力较高,故仍有可能保存较多的喜湿种类。海拔2 500 m以下范围原生植被则为半湿润常绿阔叶林,林下植被简单,经破坏后形成的灌丛群落地被物稀疏,土壤(黄红壤)肥力低下,水土流失严重,一些喜湿种类难以得到保留。此外,洱海流域也是云南少有的多民族聚居区之一,城镇、交通及农田用地分布在2 500 m以下范围的比例高达96.57%^[39],因而砍伐、放牧、农耕等人为活动也都主要集中在该区域,明显增加了该区域的受干扰程度。可见受干扰程度强也可能是该区域物种多样性低于更高海拔区的原因之一,这与冯建孟的研究结果^[59]较为一致。

洱海流域灌木种类中大部分的分布数量与岩性、海拔因子均有一定关系,且其中多数种类的分布数量同时受到二者的影响。究其原因,可能是洱海流域普遍存在的岩石裸露、土壤干旱的山地生境,使得该区域不同岩性区灌丛群落拥有基本一致的种类组成及外貌特征,而由于局部生境下土壤理化性质的差异以及长期以来日益加剧的人为活动的影响,造成了不同岩性间灌丛群落组成结构的差异。今后可进一步结合岩石风化、土壤侵蚀、人为活动等因素综合分析这些灌丛群落的演替动态,有利于更全面地了解该地区岩性、海拔与植物群落的相互作用关系。

5 结论

洱海流域7个岩性区13块样地共记录维管植物115种,共划分出8个群系、13个群落。海拔3 000 m以下范围岩石除变粒岩-片麻岩外都有分布,灌丛植被以暖温性灌丛为主,以华西小石积、西南杭子梢、车桑子、马桑等为优势种,海拔3 000 m以上范围主要分布石灰岩、变粒岩-片麻岩、泥灰岩,灌丛植

被以寒温性灌丛为主,以帽斗栎、腋花杜鹃、密枝杜鹃、棕背杜鹃等为优势种。不同岩性间灌木物种丰富度指数介于7-17之间, Shannon-Wiener 指数介于1.523 3-2.540 3之间,岩性间物种多样性指数差异均不显著。不同海拔间灌木物种丰富度指数介于5-13之间, Shannon-Wiener 指数介于1.360 8-2.429 7之间,随海拔升高物种多样性指数表现为先升高后降低的变化趋势。群落间Jaccard关联系数介于0-0.777 8之间,

Euclidean距离系数介于19.199 8-82.400 3之间,不同岩性、海拔间群落相似性程度差异均较显著。本研究表明岩性对洱海流域灌丛植被群落结构、种类组成及物种多样性的影响较小,但对群落相似性、优势种种类及数量的影响较大,而海拔对以上各方面的影响均较大,其中由海拔梯度变化导致气温、降水的梯度性变化是其关键因素,同时可能还与原生植被、土壤及人为干扰等因素有关。

参考文献 [References]

- 李昌龙, 肖斌, 王多泽, 魏林源, 郭树江. 石羊河下游盐渍化弃耕地植被演替与土壤养分相关性分析[J]. 生态学杂志, 2011, **30** (2): 241-247 [Li CL, Xiao B, Wang DZ, Wei LY, Guo SJ. Correlation analysis on vegetation succession and soil nutrients in abandoned salinized fields in lower reaches of Shiyang River [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30** (2): 241-247]
- 徐亮, 陈功锡, 刘慧娟, 廖春燕, 张代贵. 吉首蒲儿根种群土壤养分特征与分布格局[J]. 西北植物学报, 2012, **32** (8): 1664-1670 [Xu L, Chen GX, Liu HJ, Liao CY, Zhang DG. Characteristics of soil nutrients and distribution pattern of *Sinosenecio jishouensis* population [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2012, **32** (8): 1664-1670]
- 舒媛媛, 黄俊胜, 赵高卷, 包维楷, 李根前, 庞学勇. 青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J]. 生态学报, 2016, **36** (2): 394-402 [Shu YY, Huang JS, Zhao GJ, Bao WK, Li GQ, Pang XY. Effects of afforestation with different tree species on soil enzyme activities and nutrient content in eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (2): 394-402]
- 田大伦, 项文化, 闫文德. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征[J]. 生态学报, 2004, **24** (10): 2207-2210 [Tian DL, Xiang WH, Yan WD. Comparison of biomass dynamic and nutrient cycling between *Pinus massoniana* plantation and *Pinus elliottii* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (10): 2207-2210]
- Lejon DPH, Ranjard L. Microbial community structure and density under different tree species in an acid forest soil (Morvan, France) [J]. *Microb Ecol*, 2005, **50** (4): 614-625
- Takoutsing B, Weber JC, Tchoundjeu Z, Shepherd KD. Soil chemical properties dynamics as affected by land use change in the humid forest zone of Cameroon [J]. *Agrofor Syst*, 2016, **90** (6): 1089-1102
- Meglioli PA, Aranibar JN, Villagra PE, Riveros CV. Spatial patterns of soil resources under different land use in Prosopis woodlands of the Monte desert [J]. *Catena*, 2016, **149** (1): 86-97
- Priha O, Grayston SJ, Hiukka R, Pennanen T, Smolander A. Microbial community structure and characteristics of the organic matter in soils under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites [J]. *Biol Fert Soils*, 2001, **33** (1): 17-24
- Meglioli PA, Villagra PE, Aranibar JN. Does land use change alter water and nutrient dynamics of phreatophytic trees in the Central Monte desert? [J]. *Ecohydrology*, 2015, **9** (5): 738-752
- Tang ZY, Fang JY, Chi XL, Feng JM, Liu YN, Shen XH, Wang XP, Wang XH, Wu XP, Zheng CY, Gaston KJ. Patterns of plant beta diversity along elevational and latitudinal gradients in mountain forests of China [J]. *Ecography*, 2012, **35** (12): 1083-1091
- Fyllas NM, Bentley LP, Shenkin A, Asner GP, Atkin OK, Díaz S, Enquist BJ, Farfan-Rios W, Gloor E, Guerrieri R, Huasco WH, Ishida Y, Martin RE, Meir P, Phillips O, Salinas Norma, Silman M, Weerasinghe L K, Zaragoza-Castells J, Malhi Y. Solar radiation and functional traits explain the decline of forest primary productivity along a tropical elevation gradient [J]. *Ecol Lett*, 2017, **20** (6): 730-740
- Liu B. Vertical patterns in plant diversity and their relations with environmental factors on the southern slope of the Tianshan Mountains (middle section) in Xinjiang (China) [J]. *J Mount Sci*, 2017, **14** (4): 742-757
- 刘哲, 李奇, 陈懂懂, 翟文婷, 赵亮, 徐世晓, 赵新全. 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响[J]. 生物多样性, 2015, **23** (4): 451-462 [Liu Z, Li Q, Chen DD, Zhai WT, Zhao L, Xu SX, Zhao XQ. Patterns of plant species diversity along an altitudinal gradient and its effect on above-ground biomass in alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Biodiv Sci*, 2015, **23** (4): 451-462]
- 黄甫昭, 丁涛, 李先琨, 郭屹立, 王斌, 向悟生, 文淑均, 李冬兴, 何运林. 弄岗喀斯特季节性雨林不同群落物种多样性随海拔的变化[J]. 生态学报, 2016, **36** (14): 4509-4517 [Huang PZ, Ding T, Li XK, Guo YL, Wang B, Xiang WS, Wen SJ, Li DX, He YL. Species diversity for various associations along an altitudinal gradient in the karst seasonal rainforest in Nonggang [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (14): 4509-4517]
- 丛明旸, 曹迪, 陈国平, 陈宝政, 孙丰宾. 燕山和太行山过渡区植物多样性垂直变化特点[J]. 植物研究, 2017, **37** (5): 673-681 [Cong MY, Cao D, Chen GP, Chen BZ, Sun FB. Vertical characteristics of plant diversity in transition between Mount. Yan and Mount. Taihang [J]. *Bull Bot Res*, 2017, **37** (5): 673-681]
- 邓清月, 张晓龙, 牛俊杰, 秦浩. 晋西北饮马池山植物群落物种多样性沿海拔梯度的变化[J]. 生态环境学报, 2019, **28** (5): 865-872 [Deng QY, Zhang XL, Niu JJ, Qin H. Species diversity of plant communities along an altitude gradient in Yinmachi Mountain, northwestern Shanxi, China [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28** (5): 865-872]
- 张晓龙, 邓清月, 秦浩, 史利江, 苏迎庆, 张殷波, 牛俊杰. 不同海拔梯度灌丛草甸群落多样性的分布特征——以五台山亚高山-高山带南坡为例[J]. 生态环境学报, 2020, **29** (4): 657-664 [Zhang XL, Deng QY, Qin H, Shi LJ, Su YQ, Zhang YB, Niu JJ. The distribution characteristics of shrub-meadow community diversity at different elevations: a case study of the southern slope of subalpine-alpine zone in Wutai Mountain [J]. *Ecol Environ Sci*, 2020, **29** (4): 657-

- 664]
- 18 Tang CQ, Ohsawa M. Zonal transition of evergreen, deciduous, and coniferous forests along the altitudinal gradient on a humid subtropical mountain, Mt. Emei, Sichuan, China [J]. *Plant Ecol*, 1997, **133** (1): 63-78
 - 19 McCain CM. Could temperature and water availability drive elevational species richness patterns? A global case study for bats [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2007, **16** (1): 1-13
 - 20 Wang ZH, Tang ZY, Fang JY. Altitudinal patterns of seed plant richness in the Gaoligong Mountains, south-east Tibet, China [J]. *Div Distr*, 2007, **13** (6): 845-854
 - 21 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性, 2004, **12** (1): 20-28 [Tang ZY, Fang JY. A review on the elevational patterns of plant species diversity [J]. *Biodiv Sci*, 2004, **12** (1): 20-28]
 - 22 Sanders NJ. Elevational gradients in ant species richness: area, geometry, and rapoport's rule [J]. *Ecography*, 2002, **25** (1): 25-32
 - 23 谢宗强, 唐志尧. 中国灌丛生态系统碳储量的研究[J]. 植物生态学报, 2017, **41** (1): 1-4 [Xie ZQ, Tang ZY. Studies on carbon storage of shrubland ecosystems in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2017, **41** (1): 1-4]
 - 24 戴黎聪, 郭小伟, 柯浔, 杜岩功, 张法伟, 李以康, 李茜, 林丽, 曹广民, 朋措吉, 舒锴. 青藏高原金露梅灌丛草甸植物群落对退化演替的响应[J]. 生态环境学报, 2019, **28** (4): 732-740 [Dai LC, Guo XW, Ke X, Du YG, Zhang FW, Li YK, Li X, Lin L, Cao GM, Peng CJ, Shu K. The response of *Potentilla fruticosa* communities to degradation succession in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28** (4): 732-740]
 - 25 金铭, 李毅, 王顺利, 张学龙, 雷蕾. 祁连山高山灌丛生物量及其分配特征[J]. 干旱区地理, 2012, **35** (6): 952-959 [Jin M, Li Y, Wang SL, Zhang XL, Lei L. Alpine shrubs biomass and its distribution characteristics in Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geogr*, 2012, **35** (6): 952-959]
 - 26 段诚忠主编. 苍山植物科学考察[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1995 [Duan CZ. Scientific Investigation of Plant of Cangshan Mountain [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1995]
 - 27 闵天禄, 方瑞征. 点苍山的植被与杜鹃属植物的分布[J]. 云南植物研究, 1982, **4** (4): 383-391 [Ming TL, Fang RZ. The vegetation on Cangshan Yunnan and the distribution of Genus *Rhododendron* [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1982, **4** (4): 383-391]
 - 28 况明生, 谢世友, 曾艳, 李林立, 冯绍国, 张远瞩. 云南大理点苍山区晚更新世以来的古植被和古气候[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2002, **27** (5): 759-765 [Kuang MS, Xie SY, Zeng Y, Li LL, Feng SG, Zhang YZ. Study on the palaeovegetation and palaeoclimate since late pleistocene in the Dianchang Mountain area in Dali of Yunnan province [J]. *J SW China Norm Univ (Nat Sci)*, 2002, **27** (5): 759-765]
 - 29 袁睿佳, 杨树华, 王宝荣. 苍山东坡植被垂直分布格局研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2008, **30** (3): 318-324 [Yuan RJ, Yang SH, Wang BR. Study on the altitudinal pattern of vegetation distribution along the eastern slope of Cangshan Mountain, Yunnan, China [J]. *J Yunnan Univ*, 2008, **30** (3): 318-324]
 - 30 厉恩华, 王学雷, 蔡晓斌, 王晓艳, 赵素婷. 洱海湖滨带植被特征及其影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2011, **23** (5): 738-746 [Li EH, Wang XL, Cai XB, Wang XY, Zhao ST. Features of aquatic vegetation and influence factors in Erhai lakeshore wetland [J]. *J Lake Sci*, 2011, **35** (5): 738-746]
 - 31 尹志坚, 彭华. 大理苍山种子植物区系的研究[J]. 植物分类与资源学报, 2015, **37** (3): 233-245 [Yin ZJ, Peng H. A floristic study on the seed plants of the Cangshan Mountain Range, Dali, Yunnan, China [J]. *Plant Div Resour*, 2015, **37** (3): 233-245]
 - 32 卢少勇, 张森霖, 金鑫, 毕润成. 洱海湖滨缓冲带主要入湖河流植被特征分析[J]. 科技导报, 2017, **35** (9): 41-49 [Lu SY, Zhang SL, Jin X, Bi RC. Analysis of main rivers vegetation features in Erhai lakeside and buffer zone [J]. *Sci Technol Rev*, 2017, **35** (9): 41-49]
 - 33 谢应雯, 张玉泉. 云南洱海东部新生代岩浆岩岩石化学[J]. 岩石学报, 1995, **11** (4): 423-433 [Xie YW, Zhang YQ. Petrochemistry of the cenozoic magmatic rocks in the eastern Erhai, Yunnan Province [J]. *Acta Petrol Sin*, 1995, **11** (4): 423-433]
 - 34 沙绍礼, 刘宇淳. 大理点苍山正片麻岩初步研究[J]. 云南地质, 2000, **19** (3): 260-269 [Sha SL, Liu YC. A preliminary study on the orthogneiss of Diancang Mountain, Dali [J]. *Yunnan Geol*, 2000, **19** (3): 260-269]
 - 35 丁怡然, 潘宇, 秦颖, 宋迪. 洱海流域沿岸土壤营养盐含量分布特征[J]. 环境科学导刊, 2019, **38** (1): 24-31 [Ding YR, Pan Y, Qin Y, Song D. Distribution of nutrients in the littoral region of the Erhai lake basin [J]. *Environ Sci Survey*, 2019, **38** (1): 24-31]
 - 36 茶枝义. 云南洱海流域森林植被碳储量与碳密度估算[J]. 福建林业科技, 2018, **45** (4): 33-42 [Cha ZY. Estimation of forest vegetation carbon storage and density in Erhai basin of Yunnan province [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2018, **45** (4): 33-42]
 - 37 储昭升, 高思佳, 庞燕, 王圣瑞, 熊仲华, 段彪, 杨学松, 赵继东. 洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施[J]. 环境工程技术学报, 2019, **9** (5): 507-514 [Chu ZS, Gao SJ, Pang Y, Wang SR, Xiong ZH, Duan B, Yang XS, Zhao JD. Characteristics, problems and ecological protection and restoration measures of mountain-river-forest-farmland-lake- grassland elements in Lake Erhai Basin [J]. *J Environ Eng Technol*, 2019, **9** (5): 507-514]
 - 38 李杨, 李斌, 李淑丹, 汪兴中, 蔡庆华. 洱海流域河流生态系统健康评价[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23** (3): 427-431 [Li Y, Li B, Li SD, Wang XZ, Cai QH. River ecosystem health assessment of the Erhai basin [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2017, **23** (3): 427-431]
 - 39 李锦胜. 洱海流域土地利用格局研究[J]. 环境科学导刊, 2011, **30** (4): 34-39 [Li JS. Research on structure and patterns of land and use of Erhai watershed [J]. *Environ Sci Survey*, 2011, **30** (4): 34-39]
 - 40 李恒. 洱海水生植被回顾[C]//沈仁湘. 云南洱海科学论文集. 昆明: 云南民族出版社, 1989: 31-44 [Li H. Review of aquatic vegetation in Erhai Lake [C]//Shen RX. Papers on the Science of Erhai Lake in Yunnan. Kunming: Yunnan Nationalities Publishing House, 1989: 31-44]
 - 41 李芸, 李宝芬, 张坤, 朱俊, 杨秋萍. 云南高原湖泊洱海流域年降水量时空分布特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, **15** (3): 234-240 [Li Y, Li BF, Zhang K, Zhu J, Yang QP. Study on spatiotemporal distribution characteristics of annual precipitation of Erhai Basin [J]. *J China Inst Water Resour Hydropower Res*, 2017, **15** (3): 234-240]
 - 42 吴任镒, 朱彦丞主编. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987 [Wu ZY, Zhu YC. Yunnan Vegetation [M]. Beijing: Science Press, 1987]

- 43 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001 [Song YC. Vegetation Ecology [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001]
- 44 覃林. 统计生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009 [Qin L. Statistical Ecology[M]. Beijing: China Forestry Publishing, 2009]
- 45 李春喜, 姜丽娜, 邵云. 生物统计学[M]. 3版. 北京: 科学出版社: 2005 [Li CX, Jiang LN, Shao Y. Biometrics [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005]
- 46 曾昭璇. 岩石地形学[M]. 北京: 地质出版社, 1960 [Zeng ZX. Rock topography [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1960]
- 47 杨胜元, 张建江. 贵州环境地质[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2008: 1-328 [Yang SY, Zhang JJ. Environmental Geology of Guizhou [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2008: 1-328]
- 48 张晓晓, 王苗苗, 冯书珍, 邱虎森, 盖爽爽, 赵蕾, 胡亚军, 何寻阳, 陆祖军. 岩性与植被类型对喀斯特土壤AM真菌群落的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2019, **37** (2): 158-167 [Zhang XX, Wang MM, Feng SZ, Qiu HS, Ge SS, Zhao L, Hu YJ, He XY, Lu ZJ. Effects of lithology and vegetation type on the soil AM fungi community in Karst region [J]. *J Guangxi Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, **37** (2): 158-167]
- 49 粟维斌, 朱桂田. 桂西喀斯特石漠化区不同岩性土壤与植被调查分析[J]. 福建林业科技, 2008, **35** (4): 75-79 [Su WB, Zhu GT. Diagnoses of soil and vegetation upon different rock in karst rocky desertification areas in the west of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2008, **35** (4): 75-79]
- 50 刘映良, 谢双喜, 丁贵杰. 不同岩性上马尾松、杉木生长的比较[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2010, **28** (3): 1-3+18 [Liu YN, Xie SX, Ding GJ. Comparison of growth of masson pine and Chinese fir in different lithological characters [J]. *J Guizhou Nom Univ (Nat Sci)*, 2010, **28** (3): 1-3+18]
- 51 杜文军, 谢双喜, 梁佳, 李爱民, 赵祥秀. 不同岩性土体的日本柳杉幼树生物量研究[J]. 西北林学院学报, 2009, **24** (2): 23-25 [Du WJ, Xie SX, Liang J, Li AM, Zhao XX. Biomass of *Cryptomeria japonica* young tree on soils from different rocks [J]. *J NW For Univ*, 2009, **24** (2): 23-25]
- 52 符裕红, 喻理飞, 黄宗胜. 喀斯特不同岩石产状生境类型下白栎群落的物种多样性研究[J]. 农业现代化研究, 2016, **37** (5): 972-980 [Fu YH, Yu LF, Huang ZS. Study on the species diversity of *Quercus fabric* community under different carbonate rock occurrence habitat in Karst area [J]. *Res Agric Mod*, 2016, **37** (5): 972-980]
- 53 张树斌, 王襄平, 吴鹏, 孙晗, 李巧燕, 吴玉莲, 韩威, 武嫔. 吉林灌木群落物种多样性与气候及局域环境因子的关系[J]. 生态学报, 2018, **38** (22): 7990-8000 [Zhang SB, Wang XP, Wu P, Sun H, Li QY, Wu YL, Han W, Wu X. Relationship between shrub species diversity and climate and local environmental factors across Jilin [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (22): 7990-8000]
- 54 Brown JH. Mammals on mountainsides: elevational patterns of diversity [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2001, **10** (1): 101-109
- 55 Mahdavi P, Akaani H, Van der Maarel E. Species diversity and life-form patterns in steppe vegetation along a 3000 m altitudinal gradient in the Alborz Mountains, Iran [J]. *Folia Geobot*, 2013, **48** (1): 7-22
- 56 Lee C, Chun J, Cho H. Elevational patterns and determinants of plant diversity in the Baekdudaegan Mountains, South Korea: species vs. functional diversity [J]. *Chin Sci Bull*, 2013, **58** (31): 3747-3759
- 57 苏闯, 张芯毓, 马文红, 赵利清, 梁存柱. 贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释[J]. 山地学报, 2018, **36** (5): 699-708 [Su C, Zhang XY, Ma WH, Zhao LQ, Liang CZ. Altitudinal pattern and environmental interpretation of species diversity of scrub community in the Helan Mountains, China [J]. *Mount Res*, 2008, **36** (5): 699-708]
- 58 王飞, 屠彩芸, 曹秀, 刘锦乾, 杨永红, 张涛, 齐昊. 白龙江干旱河谷不同坡向主要灌丛群落随海拔梯度变化的物种多样性研究[J]. 植物研究, 2018, **38** (1): 26-36 [Wang F, Tu CY, Cao X, Liu JQ, Yang YH, Zhang T, Qi H. The different altitude gradient change rules of the main shrub community in arid valleys of the Bailongjiang River with different slope [J]. *Bull Bot Res*, 2018, **38** (1): 26-36]
- 59 冯建孟, 王襄平, 徐成东, 杨元合, 方精云. 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局[J]. 山地学报, 2006, **24** (1): 110-116 [Feng JM, WANG XP, Xu CD, Yang YH, Fang JY. Altitudinal patterns of plant species diversity and community structure on Yulong Mountains, Yunnan, China [J]. *Mount Res*, 2006, **24** (1): 110-116]