

贺静雯, 刘颖, 李松阳, 余杭, 吴建召, 崔羽, 林勇明, 王道杰, 李键. 蒋家沟流域植物群落灌草层数量分类、排序及其生境解释[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (2): 451-459

He JW, Liu Y, Li SY, Yu H, Wu JZ, Cui Y, Lin YM, Wang DJ, Li J. Quantitative classification, sorting, and habitat interpretation of the shrub and grass layers of the plant communities in the Jiangjiagou Watershed [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2020, 26 (2): 451-459

蒋家沟流域植物群落灌草层数量分类、排序及其生境解释

贺静雯^{1, 2, 3} 刘颖^{1, 2, 3} 李松阳^{1, 2, 3} 余杭^{1, 2, 3} 吴建召^{1, 2, 3} 崔羽^{1, 2, 3} 林勇明^{1, 2, 3}✉
王道杰^{2, 4} 李键^{1, 3}

¹福建农林大学林学院 福州 350002

²中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室 成都 610041

³福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室 福州 350002

⁴中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041

摘要 为探讨蒋家沟流域植物群落灌草层分布格局与环境因子间的相互关系, 在流域内不同海拔梯度选取24个样地进行植被调查, 采用9个环境指标刻画植物群落的地形、空间位置和土壤养分特征; 利用TWINSpan数量分类和DCA、CCA排序的方法, 分析蒋家沟流域主要植物群落灌草层类型及影响植被类型变化和分布的主要环境因子. 结果表明:

(1) TWINSpan数量分类将蒋家沟流域植物群落灌草层划分为7种类型. (2) 样点DCA排序第1轴基本反映了海拔梯度的变化, 第2轴基本反映了土壤全氮含量的变化, DCA排序图可很好地反映TWINSpan分类产生的7个主要群丛.

(3) CCA排序表明, 影响蒋家沟流域植被分布的主要环境因子是海拔高度、土壤含水量和放牧与否. 可见, 蒋家沟流域灌草层植被整体上呈现出明显的垂直地带性分布格局, 且植物群落中物种的分布一定程度上决定了植物群落类型的分布, 该结果可为干热河谷的植被保护和生态恢复提供相应的理论依据. (图5 表4 参50)

关键词 干热河谷; 植物群落; 环境变量; TWINSpan; CCA

Quantitative classification, sorting, and habitat interpretation of the shrub and grass layers of the plant communities in the Jiangjiagou Watershed

HE Jingwen^{1, 2, 3}, LIU Ying^{1, 2, 3}, LI Songyang^{1, 2, 3}, YU Hang^{1, 2, 3}, WU Jianzhao^{1, 2, 3}, CUI Yu^{1, 2, 3}, LIN Yongming^{1, 2, 3}✉, WANG Daojie^{2, 4} & LI Jian^{1, 3}

¹ College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

² Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

³ Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian province, Fuzhou 350002, China

⁴ Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract To study the relationships between the shrub and grass layers of the plant communities and environmental factors in the Jiangjiagou watershed, 24 plots were selected with different vegetation gradients in the basin and surveyed. At the same time, nine environmental indicators to characterize the topography, spatial locations, and soil nutrient characteristics of the plant communities were employed. Through the TWINSpan quantity classification and DCA and CCA ranking methods, the main shrub and grass layers of the plant community types in the Jiangjiagou watershed and the main environmental factors affecting the change and distribution of vegetation types were analyzed. The results showed the following: (1) Shrub and grass layers of plant communities within the study area were classified into seven types by the TWINSpan classification. (2) The first axis mainly reflected the change in the altitude gradient, and the second axis mainly reflected the change in the total carbon content of the soil in the DCA ordination diagram. (3) The CCA ranking indicates that the primary environmental factors affecting the vegetation distribution in the Jiangjiagou watershed were altitude

收稿日期 Received: 2019-05-27 接受日期 Accepted: 2019-07-03

国家自然科学基金(41790434)、中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金资助项目(2019)、福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016)和福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2017111和CXZX2017283)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (4170434), the Research Fund of the Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes of the Chinese Academy of Sciences (2019), the Outstanding Young Scientific Research Project of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq2017016) and the Scientific and Technological Innovation Foundation of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2017111 and CXZX2017283)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: monkey1422@163.com)

and soil water content. This study found that the vegetation of the shrub and grass layers in the Jiangjiagou watershed showed an obvious vertical zonal distribution pattern, and the distribution of species in the plant communities determined the distribution of plant community types to some extent. These results provide a theoretical basis for vegetation protection and ecological restoration in arid and hot valleys.

Keywords dry hot valley; plant community; environmental variable; TWINSpan; CCA

植物群落是植物及其生活环境相互作用的产物,其作用过程中伴随着群落结构的演替与物种多样性的变化^[1-3]。探究植物群落及物种与环境因子之间的生态关系,有助于揭示控制物种和群落分布的主要环境因子,制定相应的环境因子管理对策,进而促进当地群落稳定性的维持和生物多样性的保护^[4-6]。对于不同的植物群落,由于其分布规律及与环境的内在联系十分复杂,凭借传统的定性描述来解释非常困难,需要依托数学方法结合群落数据和环境因子进行综合分析^[7]。近年来,随着多元分析技术应用的快速发展,分类和排序已成为植物与环境关系研究中最常用的数量分析方法^[8-10]。其中分类能够反映群落的种类组成、外貌和结构、地理分布、动态演替和生态环境等,是揭示植被间断性的重要方法^[11-13]。排序则以区域内所调查群落样地的相似性为基准确定各样地的位序,从而阐明样地连续性特征及其与环境因子间的互馈作用,是研究植被连续变化的重要方法^[3, 14-15]。两种方法结合使用,可以更好地揭示植物群落的空间分布格局及其影响因子。国内外学者多以多元回归树(MRT)分析、双向指示种分析(TWINSpan)、聚类分析等作为植被数量分类方法,数量排序方法则主要有除趋势对应分析(DCC)、典范对应分析(CCA)、除趋势典范对应分析(DCCA)等,在具体研究中可根据群落类型、数据来源及梯度范围选择最适合的分析方法^[16-18]。

云南省昆明市东川区境内的蒋家沟属于金沙江一级支流小江流域,是干热河谷的典型流域^[19]。蒋家沟流域新老构造错综复杂,河谷两侧地形陡峻,地面高差悬殊,流域内灾害形式多样,滑坡崩塌活动强烈,泥石流频繁发生,从而导致植被破坏严重^[20],生态系统极度退化^[21]。前人对于干热河谷流域的研究主要涉及泥石流治理^[22]、土壤侵蚀^[23]、生态恢复^[20]等方面,山地植物群落的分类和排序方面鲜见报道。而物种多样性海拔梯度格局研究不仅能反映物种的生物学、生态学特性,还有助于了解物种分布状况及对环境的适应性,是揭示山

区生态系统结构和功能并对其进行合理经营的重要依据^[24-26]。干热河谷地带由于受独特的气候条件和相对封闭的河谷环境影响,流域内生态系统十分脆弱,植物物种往往呈现出不同的分布格局^[25, 27],因此,对于干热河谷开展植物群落灌草层分布格局的研究可加深脆弱生态区物种分布与环境因子间关系的认识。本研究以蒋家沟流域植被为研究对象,采用双向指示种分析(TWINSpan)、除趋势对应分析法(DCA)和典范对应分析(CCA)对蒋家沟流域不同海拔梯度植被群落进行分类和排序,分析了植被组成、分布规律和影响植被分布的环境因子,揭示植物群落间及其与环境因子的生态关系,可为研究区生态环境质量评价和群落演替预测等提供一定的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于云南省昆明市东川区境内的蒋家沟,地理坐标为103°06'-103°13'E、26°13'-26°17'N,流域面积48.52 km²(图1)。蒋家沟流域属于滇东北高山峡谷区,流域内山高坡陡,相对高度大,沟道发育迅速,其源头在会泽县大海乡杨梅垭口,沟道从东向西经东川区绿茂乡汇入小江。流域地势东高西低,最高海拔3 269 m,最低海拔1 042 m,相对高差达2 227 m,呈阶梯状下降。受地形条件的制约,此流域气候干湿季分明,垂直气候带明显,5-10月为该气候区的雨季,降雨量占全年总降雨量的80%以上^[21]。由于焚风效应的影响,不同海拔区气候表现差异明显,整个流域范围大致分为3个气候区:亚热带干热河谷区(海拔高度1 042-1 600 m),年均温20℃左右,年降雨量600-700 mm,年蒸发量约3 700 mm;亚热带、暖温带半湿润区(海拔高度1 600-2 200 m),年均温13℃左右,年降雨量700-850 mm,年蒸发量约1 700 mm;温带湿润山岭区(海拔高度2 200-3 269 m),年均温7℃左右,年

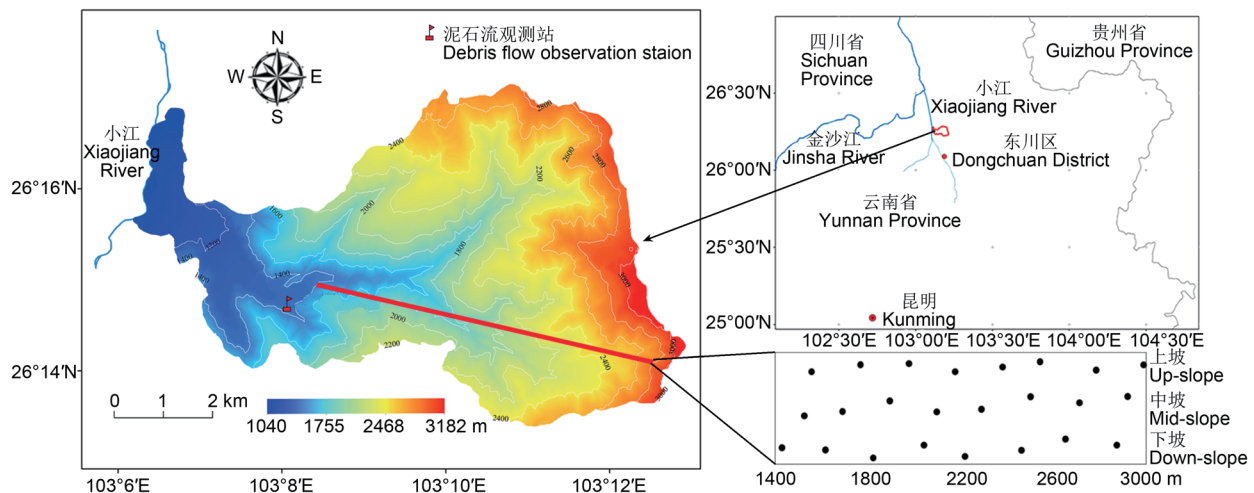


图1 研究区域位置与样地设置示意图。

Fig. 1 Sketch map of the research area location and plots setting.

降雨量1 000-1 200 mm, 年蒸发量约1 350 mm^[19, 28]. 流域内年降水量随海拔的增加而递增, 年蒸发量却随海拔增加而递减. 降水量和气温的垂直分异性, 使植被和岩石风化程度在流域不同海拔区域存在显著差异. 该流域因人类的长期干扰, 原生森林植被为人工林取代, 乔木树种比较单一, 高海拔区以云南松、华山松为主, 低海拔区分布有台湾相思、新银合欢、桉树及部分经济树种. 灌草从种类丰富, 有菊科、禾本科、豆科、蔷薇科、百合科、忍冬科、蓼科等多种类型植物.

1.2 样地设置与调查

调查于2018年7-8月进行, 为了反映整个垂直梯度带上的物种分布格局, 在蒋家沟流域内沿海拔梯度1 400-3 000 m设置样带, 其中以200 m高程为一个海拔梯度设置调查样带, 样带内按S型设置3个10 m × 10 m的样地, 每个样地内沿对角线方向上分别设置两个5 m × 5 m灌木样方和2个1 m × 1 m草本样方; 共设置调查样地24个(图1), 5 m × 5 m灌木样方48个, 1 m × 1 m草本样方48个. 调查内容包括: (1) 群落特征: 在每个样地内用样绳分成 5 m × 5 m和1 m × 1 m的小样方清查样方中全部灌木、草本植物种类, 分物种记载层次、高度、盖度、频度以及生长状况. (2) 环境因子: 用手持GPS确定各样方的经纬度和海拔高度, 利用地质罗盘确定各样地的坡度和坡向, 根据样地所处坡面的整体位置确定坡位, 向当地群众咨询样地是否受到放牧干扰(表1). (3) 土壤: 在每个10 m × 10 m样地内各取3个土样, 分别位于样地中心位置、距中心位置且与上下边界线平行的左右各2.5 m处, 共采集土样24个. 去除地表枯落物后, 对土壤表层0-20 cm进行取样, 将采集的土壤放入自封袋, 带回实验室进行测定. 同时, 用环刀(规格100 cm³)采集原状土, 将环刀取得的土样移入铝盒, 称土样质量. 土样分析指标包括土壤有机碳、全氮、全磷和土壤含水量.

1.3 样品处理及分析

将铝盒样品带回实验室烘干至恒重, 冷却后称量土样干

质量, 计算土壤含水量; 过0.149 mm筛后, 土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法, 土壤全氮为凯氏定氮法, 土壤全磷为碱熔-钼锑抗显色法测定. 对每一样品进行3次重复测定, 取其平均值为最终测定结果.

1.4 数据处理与分析

考虑到蒋家沟流域内包括3个气候区, 各样点间既有生境差异, 又有空间隔离, 因此本研究仅考虑某一物种在其所在样方中的相对重要性, 即只统计该物种在各样方中的相对多度和相对盖度, 不考虑该物种在全部样方中出现的频度^[29]. 此外, 由于蒋家沟流域乔木物种组成较为单一, 本研究在分析中仅考虑灌草层植物的重要值, 具体计算公式如下:

$$\text{灌木和草本重要值(IV)} = (\text{相对盖度} + \text{相对多度}) / 2^{[30]}$$

其中, 物种*i*的相对多度 = (物种*i*的数量/样方中所有物种的数量) × 100%, 物种*i*的相对盖度 = (物种*i*的盖度/样方中所有物种的盖度) × 100%^[29-30], 考虑到样方优势种对群落的意义和统计的方便, 这里只取重要值>1的物种用于植被的数量分析. 本研究共调查植物93种, 剔除重要值<1的植物7种, 用于植物群落数量分类、排序的植物共86种. 其中, 根据样地的重要值对蒋家沟流域植物群落灌草层进行分类, 根据调查数据建立2个矩阵, 由24个样地96个样方中86种灌草丛的重要值组成的植被矩阵和由24个样点和9个环境参数组成的环境属性矩阵.

为了便于进行数据分析, 海拔、坡度等定量数据以实测数据为表达方式; 放牧与否这样的虚拟变量则取值为0(未受人为放牧影响)和1(受人为放牧影响)^[31]. 采用分级方法对坡位、坡向等定性的有序多变量数据赋值, 坡位用3级制, 分别使用数字1、2、3表示, 其中1代表上坡, 2代表中坡, 3代表下坡; 由于本研究主要侧重于西、南坡, 因此坡向同样采用3级制, 分别用数字3、4、5表示, 其中3代表西坡, 4表示西南坡,

表1 样地基础信息
Table 1 Basic information of sample area

样地 Plot	海拔(h/m) Elevation	纬度 Latitude	经度 Longitude	坡向 Aspect	坡度(α/°) Slope	坡位 Position	盖度(r/%) Coverage	放牧与否 Grazed or not
S1	3050	26°15'15"	103°11'55"	5	30	1	61	1
S2	2910	26°15'17"	103°11'53"	4	28	2	66	1
S3	2870	26°15'16"	103°11'50"	4	31	3	82	1
S4	2790	26°15'24"	103°11'45"	4	28	1	80	1
S5	2705	26°15'22"	103°11'43"	4	26	2	69	1
S6	2655	26°15'28"	103°11'48"	4	25	3	55	1
S7	2550	26°13'50"	103°12'15"	3	25	1	72	0
S8	2503	26°13'35"	103°12'22"	3	28	2	70	0
S9	2440	26°13'20"	103°12'31"	3	30	3	80	0
S10	2390	26°14'05"	103°11'48"	5	38	1	58	1
S11	2285	26°14'07"	103°11'52"	5	41	2	60	1
S12	2210	26°14'08"	103°11'55"	5	40	3	55	1
S13	2195	26°14'10"	103°10'50"	4	35	1	52	0
S14	2100	26°14'12"	103°10'55"	4	33	2	67	0
S15	2050	26°14'13"	103°10'58"	4	30	3	58	0
S16	1985	26°14'29"	103°10'20"	5	20	1	41	0
S17	1870	26°14'26"	103°09'35"	5	16	2	52	0
S18	1765	26°14'24"	103°09'25"	5	15	3	47	0
S19	1685	26°13'25"	103°08'35"	4	28	1	45	0
S20	1614	26°13'31"	103°08'42"	4	30	2	43	0
S21	1563	26°13'37"	103°08'45"	4	33	3	40	0
S22	1575	26°14'20"	103°08'12"	4	16	1	89	0
S23	1498	26°14'28"	103°08'19"	4	15	2	92	0
S24	1410	26°14'32"	103°08'22"	4	12	3	90	0

坡位一列中1、2、3分别代表上坡、中坡和下坡; 放牧与否一列中, 受放牧影响为1, 不受放牧影响为0; 坡向一列中3、4、5分别代表西坡, 西南坡和南坡. 1, 2, 3 represent upper, middle and downhill in position, respectively; 1 represent grazed, and 0 represent not affected by grazing or not; 3, 4, and 5 represent the west slope, the southwest slope, and the south slope in aspect.

Fig. 2 Taxonomic tree map of 24 plots based on TWINSpan classification. D represent division of plots; N represent number of plots; S1-S24 represent plot codes.

表2 植物群落分布DCA排序
Table 2 DCA ordinations of plant communities

内容 Content	轴一 Axis 1	轴二 Axis 2	轴三 Axis 3	轴四 Axis 4
特征值 Eigenvalue	0.749	0.311	0.202	0.137
梯度长度 Gradient length	5.42	2.77	2.15	2.57
物种数据解释变异的累计百分比 Cumulative percentage variance of species data	14.71	20.81	24.77	27.46
辅助变量解释变异的百分比 Supplementary variables account	52.30%			

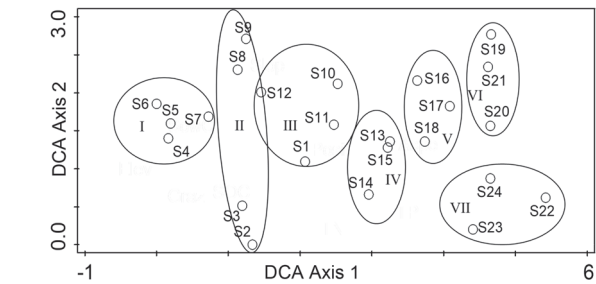


图3 样地DCA二维排序图。I-VII表示TWINSpan分类中7个群丛类型
Fig. 3 Two-dimensional DCA ordination diagram of 24 plots. I-VII represent 7 cluster types in the TWINSpan classification.

的关系。DCA第1轴主要反映了各群落海拔环境梯度，由左到右海拔逐渐降低，据此可将24个样地划分为如图所示的7个区(图3)。DCA第2轴所指示的环境特征并不明显，根据排序结果可能反映的是土壤全氮含量的变化，即第二轴从下往上，土壤全氮含量逐渐变小。排序的结果显示DCA将24个样地划分成7个群落类型，与TWINSpan分类结果基本一致，验证了TWINSpan分类结果的合理。

2.3 样地CCA排序

为进一步研究群落分布与环境因子之间的关系，在此对24个样点和9个环境因子(表3)进行CCA排序分析，获得样点CCA排序图(图4)。从图4可以看出，沿排序轴第1轴从左往右，随着海拔的升高，群落从排序图最左侧亚热带干热河谷区物种多样性较低的是群丛V(苦刺-牛膝菊+豨莶群落)、群丛VII(披碱草+牛膝菊+鬼针草群落)和群丛VI(新银合欢-宽叶十万错群落)逐渐过渡到亚热带、暖温带半湿润区群丛III(马桑-牛至+小叶荇草群落)，最后到物种多样性更为丰富的温带湿润山岭区群丛II(牛至+小叶荇草+川滇委陵菜群落)和群丛I(马唐+龙芽草+银莲花群落)。沿排序轴第2轴从上往下，随着坡向由南到西南再到西方向，群落由群丛V(苦刺-牛膝菊+豨莶群落)过渡到群丛IV(艾+紫荆泽兰+牛膝

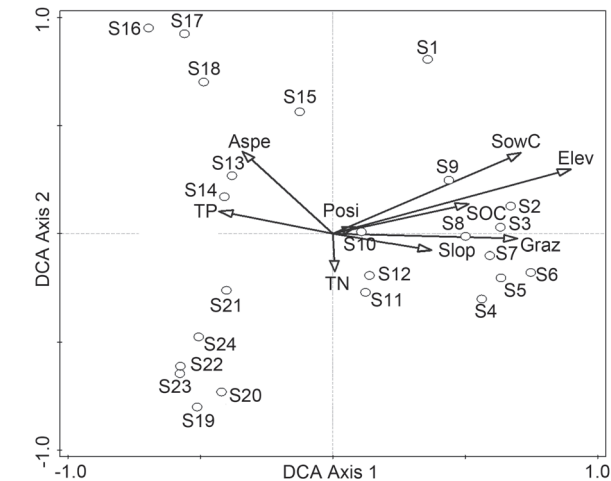


图4 样地CCA排序图。
Fig. 4 CCA ordination diagram of 24 plots.

表 3 环境变量名缩写对照
Table 3 Abbreviation of environment variable

环境变量名 Variable	缩写 Abbreviations	环境变量名 Variable	缩写 Abbreviation
海拔 Elevation	Elev	土壤有机质 Soil organic matter	SOC
坡向 Aspect	Aspe	土壤全氮 Soil total nitrogen	TN
坡度 Slope	Slop	土壤全磷 Soil total phosphorus	TP
坡位 Position	Posi	土壤含水量 Soil water content	SowC
放牧与否 Graze or not	Graz		

菊群落)，最后到群丛VII(披碱草+牛膝菊+鬼针草群落)和群丛VI(新银合欢-宽叶十万错群落)。从排序结果可以看出，影响群落分布的首要环境因子是海拔高度和土壤含水量，其次是坡向和人类活动的影响，即海拔高度的差异造成不同群落气候的差异，使得研究区的植被分为3种类型，即亚热带干热河谷区植被，亚热带、暖温带半湿润区植被和温带湿润山岭区植被。其次，受坡向和放牧的影响程度差异所限，3个气候区的植被类型又可细分为不同植物群落。另外，TWINSpan划分的7类植物群落在CCA排序图中有各自的分布范围和界限，说明TWINSpan的分类结果和样方CCA排序一致。

2.4 物种CCA排序

采用CCA对86个物种进行数量分析，结果表明前2个排序轴对物种的影响最大(表4)，海拔、土壤含水量、放牧、坡向、土壤全氮与第1轴、第2轴的关系较密切(图5)。其中，与第1轴的相关性较强的是海拔、土壤含水量和放牧，与第2轴的相关性较强的是坡向、土壤全氮。排序图第1轴从左往右，有牛膝菊、鱼眼草、酢浆草、天胡荽、两头毛、牛至、夏枯草、马桑、新银合欢、小舌紫苑、香青等，表明随着海拔的升高、土壤含水量逐渐升高，植物群落中灌木的种类逐渐增加，生境较为湿润的植物种类也逐渐增加。排序图第2轴从上往下，坡向由南到西南再到西方向，光照强度逐渐减弱，土壤全氮含量逐渐增加。滇魔芋、一把伞南星、豨莶、车前草、支柱蓼、川西老鹳草、野棉花等植物分布在排序图左侧，说明其对光照需求较大，对土壤全氮需求较小；马桑、火绒草、肾叶山蓼、小叶荇草、天胡荽、白子菜、南莎草、兰香草等分布在排序图中央，说明上述物种的生态适应幅度较大；宽叶十万错、猩猩草、龙爪茅等植物分布在排序图右侧，说明其对光照和水分的需求较小，对土壤全氮的含量需求较大。结合以上植物群落灌草层分类、样地与物种排序结果，可以发现物种的分布格局与群落类型的分布格局有较强的相关性。

3 讨论

本实验蒋家沟流域植物群落的研究结果具有一定的现实意义和代表性，但在调查过程发现蒋家沟流域原生乔木群落几乎消失殆尽，现有的乔木多为人工种植的云南松、桉树和台

表4 植物种CCA排序

Table 4 CCA ordinations of plant species

内容 Content	轴一 Axis 1	轴二 Axis 2	轴三 Axis 3	轴四 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.736	0.4609	0.3384	0.3106
解释变异 Explained variation (cumulative)	13.33	21.68	27.8	33.43
范式典范相关 Pseudo-canonical correlation	0.9833	0.9682	0.9568	0.9212
解释拟合变异 Explained fitted variation (cumulative)	26.36	42.86	54.98	66.1
置换检验结果 Permutation test results	pseudo- $F = 1.3$, $P = 0.002$			

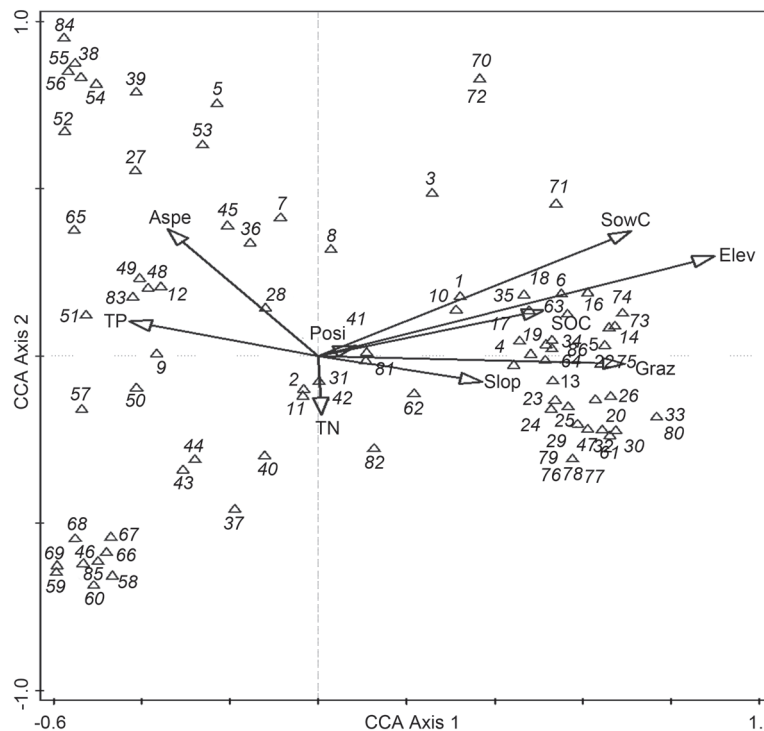


图5 所有物种的CCA二维排序图。1: 牛至; 2: 肾叶山蓼; 3: 白酒草; 4: 青蒿; 5: 支柱蓼; 6: 香青; 7: 天名精; 8: 两头毛; 9: 鬼针草; 10: 马唐; 11: 小叶荩草; 12: 酢浆草; 13: 猪殃殃; 14: 百脉根; 15: 苜蓿菜; 16: 地毯草; 17: 金丝桃; 18: 小舌紫菀; 19: 风轮菜; 20: 木蓝; 21: 川滇委陵菜; 22: 叶下珠; 23: 野草莓; 24: 毛茛; 25: 银莲; 26: 大丁草; 27: 蛇床; 28: 天胡荽; 29: 龙芽草; 30: 千里光; 31: 白子菜; 32: 香附子; 33: 薯蓣; 34: 三叶草; 35: 夏枯草; 36: 紫荆泽兰; 37: 飞蓬; 38: 川西老鹳草; 39: 车前草; 40: 胡枝子; 41: 火绒草; 42: 南沙草; 43: 披碱草; 44: 董菜; 45: 知风草; 46: 羽芒菊; 47: 香茶菜; 48: 艾; 49: 箭姑草; 50: 薄荷; 51: 牛膝菊; 52: 黄花稔; 53: 狗尾草; 54: 豨莶; 55: 一把伞南星; 56: 蝎子草; 57: 藜; 58: 宽叶十万错; 59: 猩猩草; 60: 龙爪茅; 61: 蕨; 62: 马桑; 63: 薊; 64: 琉璃草; 65: 苦刺; 66: 黄背草; 67: 新银合欢; 68: 戟叶酸模; 69: 滇梨; 70: 野棉花; 71: 野芥麦; 72: 油菜; 73: 百日菊; 74: 毛连菜; 75: 荔枝草; 76: 乌鸦果; 77: 苍葱; 78: 积雪草; 79: 二褶羊耳蒜; 80: 七叶一枝花; 81: 兰香草; 82: 忍冬; 83: 鱼眼草; 84: 滇魔芋; 85: 扭黄茅; 86: 蔷薇。

Fig. 5 Two dimensional ordination diagram of the first two axes of CCA of all 86 species. 1: *Origanum vulgare*; 2: *Oxyria digyna*; 3: *Conyza japonica*; 4: *Artemisia carvifolia*; 5: *Polygonum suffultum*; 6: *Anaphalis sinica*; 7: *Carpesium abrotanoides*; 8: *Incarvillea arguta*; 9: *Bidens pilosa*; 10: *Digitaria sanguinalis*; 11: *Arthraxon lancifolius*; 12: *Oxalis corniculata*; 13: *Galium aparine*; 14: *Lotus corniculatus*; 15: *Sonchus arvensis*; 16: *Axonopus compressus*; 17: *Hypericum monogynum*; 18: *Aster albescens*; 19: *Clinopodium chinense*; 20: *Indigofera tinctoria*; 21: *Potentilla fallens*; 22: *Phyllanthus urinaria*; 23: *Fragaria nilgerrensis*; 24: *Ranunculus japonicus*; 25: *Anemone cathayensis*; 26: *Gerbera anandria*; 27: *Cnidium monnieri*; 28: *Hydrocotyle sibthorpioides*; 29: *Agrimonia pilosa*; 30: *Senecio scandens*; 31: *Gynuradivariata*; 32: *Cyperus rotundus*; 33: *Dioscorea opposita*; 34: *Trifolium subterraneum*; 35: *Prunella vulgaris*; 36: *Eupatorium odoratum*; 37: *Erigeron acer*; 38: *Geranium orientali-tibeticum*; 39: *Plantago asiatica*; 40: *Lespedeza bicolor*; 41: *Leontopodium leontopodioides*; 42: *Cyperus niveus*; 43: *Elymus dahuricus*; 44: *Viola verecunda*; 45: *Eragrostis ferruginea*; 46: *Tridax procumbens*; 47: *Rabdosia amethystoides*; 48: *Artemisia argyi*; 49: *Stellaria vestita*; 50: *Mentha haplocalyx*; 51: *Galinsoga parviflora*; 52: *Sida rhoimbifolia*; 53: *Setaria viridis*; 54: *Siegesbeckia orientalis*; 55: *Arisaema erubescens*; 56: *Girardinia suborbiculata*; 57: *Chenopodium album*; 58: *Asystasia gangetica*; 59: *Euphorbia cyathophora*; 60: *Dactyloctenium aegyptium*; 61: *Pteridium aquilinum*; 62: *Coriaria nepalensis*; 63: *Cirsium japonicum*; 64: *Cynoglossum zeylanicum*; 65: *Sophora davidii*; 66: *Themedra japonica*; 67: *Leucaena leucocephala*; 68: *Rumex hastatus*; 69: *Pyrus pseudopashia*; 70: *Anemone vitifolia*; 71: *Fagopyrum urophyllum*; 72: *Brassica campestris*; 73: *Zinnia elegans*; 74: *Picris divaricata*; 75: *Salvia plebeia*; 76: *Vaccinium fragile*; 77: *Allium victorialis*; 78: *Centella asiatica*; 79: *Liparis cathcartii*; 80: *Paris polyphylla*; 81: *Caryopteris incana*; 82: *Lonicera japonica*; 83: *Dichrocephala auriculata*; 84: *Amorphophallus yunnanensis*; 85: *Heteropogon contortus*; 86: *Rosa multiflora*.

湾相思, 物种单一, 不具有代表性, 因此, 此次植物群落调查以灌草丛为主。从数量分类结果来看, TWINSpan数量分类将蒋家沟流域植物群落灌草层分为7种群落类型, 分别为马唐+龙芽草+银莲花群落、牛至+小叶荩草+川滇委陵菜群落、马桑+牛至+小叶荩草群落、艾+紫荆泽兰+牛膝菊群落、苦刺+牛膝菊+豨莶群落、新银合欢+宽叶十万错群落、披碱草+牛膝菊+鬼针草群落, 体现了从温带湿润山岭区到亚热带、暖

温带半湿润区, 再到亚热带干热河谷区群落植被类型的变化趋势。同时, 经TWINSpan数量分类得到的同一群落所包含的样点大体上分布在同一海拔梯度, 说明在200 m海拔梯度范围内, 植被的空间异质性较为明显。这与张广帅等对于小江流域土壤环境因子与植被群落的研究结论^[21]一致。

植被分布、结构及物种组成特征是环境因子对植被影响的综合反应, 因此植物群落特征可起到指示其生境的作

用^[33-34]。本研究DCA排序结果表明,二维排序图第1轴和第2轴分别反映了海拔高度变化和土壤全氮含量对植被的影响效果。同时,在二维排序图上各群落类型之间显示出明确的分布范围和界限,体现了群落与环境因子间的互馈关系,验证了TWINSpan分类结果的合理性,验证了朱军涛^[35]、张海燕^[32]等的研究结果。但是,前人研究发现,受气候地带性与微地形条件的限制,DCA排序轴的环境解释可能会得到不同的研究结论^[24, 36-37]。如在降雨充足的地区,热量是植被组成和分布的第一限制因子;但在某些干旱地区,水分条件则是第一限制因子;在水热条件基本一致的区域,第一限制因子则可能是土壤养分^[38]。蒋家沟流域地处干热河谷区,热量条件充足,但受“焚风效应”影响,不同海拔区域降水量差异较大,土壤中的有效水分含量会随着降水的减少而降低,造成土壤干化及植物养分吸收利用效率减弱,从而引起群落中植物种类和比例的差异化^[38-39]。从CCA的排序结果可知,海拔高度和土壤含水量是影响蒋家沟流域群落分布的主要因子,验证了TWINSpan的分类结果。随着海拔的升高,研究区气候类型从物种多样性较低的亚热带干热河谷气候逐渐过渡到亚热带、暖温带半湿润气候,最后到物种多样性更为丰富的温带湿润山岭气候区。这与我们在调查过程中发现的高海拔地区灌草层植物种类较多,而低海拔地区植被较为单一的现象一致。此外,各群丛优势种的分布格局与群丛类型的分布格局基本相似,如以新银合欢和宽叶十万错(67, 58)为优势种的群丛VI和以披碱草、牛膝菊和鬼针草(43, 51, 9)为优势种的群丛VII,优势种和群丛均分布在排序图的左下方,其他优势种及其对应的群丛遵循相似的规律,说明优势种分布格局和植物群落类型的分布格局存在较大的相关性,这与朱军涛等在额济纳荒漠绿洲植物群落中的研究^[36]一致。

关于植被与环境因子关系的研究有很多,其中影响植物群落格局的主要因素包括地形、海拔、降雨、土壤理化性质、人类活动等^[40-43]。DCA和CCA排序结果显示,蒋家沟流域具有明显的植被垂直地带性,随着海拔的升高,大气温度降低,湿润系数增大,土壤有机质和土壤含水量升高,土壤全磷逐渐降低。因此,在小尺度内海拔高度变化可涵盖各种环境因子

的综合变化过程,进而成为影响植物群落分布的第一限制因子^[44]。然而,在不同生境中,各环境因子对植物群落特征的影响程度大不相同^[45-47]。张燕杰等对拉萨河谷植物群落研究^[48]发现,湿度是影响拉萨河谷植物分布的主导因素;朱媛军等对毛乌素沙地的研究^[49]中,地下水位和土壤 Ca^{2+} 、 K^{+} 和 Na^{+} 含量影响丘间低地植物群落特征的主要因子;李婷婷等对东北阔叶红松林群落研究^[50]发现,该森林群落的分布格局主要受温度和降水的影响。在本研究中,除海拔高度、土壤含水量、坡向和土壤养分外,人类活动(如放牧)对群落的分布格局也产生了很大的影响。在研究区中,发现放牧的干扰程度随着海拔的升高而升高,这可能与当地高海拔区人口分布较多、放牧强度较大有关。

4 结论

(1) TWINSpan将蒋家沟流域不同海拔梯度植物群落灌草层的24个样地划分为7个群丛类型。即马唐+龙芽草+银莲花群丛、牛至+小叶荩草+川滇委陵菜群丛、马桑-牛至+小叶荩草群丛、艾+紫荆泽兰+牛膝菊群丛、苦刺-牛膝菊+豨莶群丛、新银合欢-宽叶十万错群丛、披碱草+牛膝菊+鬼针草群丛。

(2) DCA、CCA样点排序表明,海拔梯度、土壤含水量和放牧是影响蒋家沟流域植物群落灌草层分布格局的主要限制性因子;CCA物种排序表明各群丛优势种的分布格局与群丛类型的分布格局基本相似。

(3) 蒋家沟流域植被分布呈现明显的垂直地带性分布格局,随着海拔的升高,土壤有机质和土壤含水量升高,物种多样性也逐渐增加,当地典型的植被种类也从宽叶十万错、披碱草、牛膝菊过渡到马唐、龙芽草、牛至等。

TWINSpan分类和DCA、CCA排序很好地揭示了蒋家沟流域植物群落的间断性、连续性和生境异质性,阐明蒋家沟流域植物群落、物种的分布特征及其与环境因子间的互馈作用,为干热河谷生态脆弱区生物多样性的保护和生态环境建设提供了一定的理论基础。

参考文献 [References]

- 王世雄, 王孝安, 李国庆, 郭华, 朱志红. 陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释[J]. 生态学报, 2010, **30** (6): 1638-1647 [Wang SX, Wang XA, Li GQ, Guo H, Zhu ZH. Species diversity and environmental interpretation in the process of community succession in the Ziwu Mountain of Shaanxi Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (6): 1638-1647]
- 白晓航, 张金屯, 曹科, 王云泉, Sadia S, 曹格. 河北小五台山国家级自然保护区森林群落环境的关系[J]. 生态学报, 2017, **37** (11): 3683-3696 [Bai XH, Zhang JT, Cao K, Wang YQ, Sehrish Sadia, Cao G. Relationship between forest communities and the environment in the Xiaowutai Mountain National Nature Reserve, Hebei [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (11): 3683-3696]
- 张庆, 牛建明, Alexander B, 丁勇, 康萨如拉, 王凤兰, 张艳楠, 杨艳, 韩砚君. 内蒙古短花针茅群落数量分类及环境解释[J]. 草业学报, 2012, **21** (1): 83-92 [Zhang Q, Niu JM, Buyantuyev A, Ding Y, Kang SRL, Wang FL, Zhang YN, Yang Y, Han YJ. Ecological analysis and classification of *Stipa breviflora* communities in the Inner Mongolia region: the role of environmental factors [J]. *Acta Pra Sin*, 2012, **21** (1): 83-92]
- 赵从举, 康慕谨, 雷加强. 准噶尔盆地典型地段植物群落及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2011, **31** (10): 2669-2677 [Zhao CJ, Kang MY, Lei JQ. Relationships between plant community characteristics and environmental factors in the typical profiles from Dzungaria Basin [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (10): 2669-2677]
- Eiserhardt WL, Svenning JC, Kissling WD. Geographical ecology of the palms (Arecaceae): determinants of diversity and distributions across spatial scales [J]. *Ann Bot*, 2011, **108** (8): 1391-1416
- Ermakov N, Makhatkov I. Classification and ordination of north boreal light-coniferous forests of the West Siberian Plain [J]. *Plant Bios*, 2011, **145** (S1): 199-207
- 廉凯敏, 吴应建, 张丽, 赵璐璐, 张峰. 太宽河自然保护区板栗群落数量分类与排序[J]. 生态学报, 2015, **34** (1): 33-39 [Lian KM, Wu YJ, Zhang L, Zhao LL, Zhang F. Numerical classification and ordination

- of wild *Castanea mollissima* communities in Taikuan River Nature Reserve, Shanxi [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34** (1): 33-39]
- 8 Pinder JE, Kroh GC, White JD, May AB. The relationships between vegetation type and topography in Lassen Volcanic National Park [J]. *Plant Ecol*, 1997, **131** (1): 17-29
 - 9 Mabry C, Ackerly D, Gerhardt F. Landscape and species level distribution of morphological and life history traits in a temperate woodland flora [J]. *J Veg Sci*, 2000, **11**: 213-224
 - 10 袁铁象, 张合平, 欧芷阳, 谭一波. 地形对桂西南喀斯特山地森林地表植物多样性及分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (10): 2803-2810 [Yuan TX, Zhang HP, Ou YZ, Tan YB. Effects of topography on the diversity and distribution pattern of ground plants in karst montane forests in Southwest Guangxi [J]. *Chin J Appl Eco*, 2014, **25** (10): 2803-2810]
 - 11 Oldeland J, Dorigo W, Lieckfeld L, Lucieer A, Jürgens N. Combining vegetation indices, constrained ordination and fuzzy classification for mapping semi-natural vegetation units from hyperspectral imagery [J]. *Rem Sens Environ*, 2010, **114** (6): 1155-1166
 - 12 刘万德, 丁易, 臧润国, 苏建荣, 杨民, 蔡笃磊, 李儒财, 陈少伟. 海南岛霸王岭林区低海拔热带林群落数量分类与排序[J]. 生态学杂志, 2010, **29** (8): 1526-1532 [Liu WD, Ding Y, Zang RG, Shu JR, Yang M, Cai DL, Li RC, Chen SW. Quantitative classification and ordination of low-altitudinal tropical forests in Bawangling, Hainan Island [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29** (8): 1526-1532]
 - 13 李博. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 168-172 [Li B. *Ecology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 168-172]
 - 14 牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳. 基础生态学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007 [Niu CJ, Lou AR, Shun RU. *Basic Ecology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher education press, 2007]
 - 15 张文静, 张钦弟, 王晶, 冯飞, 毕润成. 多元回归树与双向指示种分析在群落分类中的应用比较[J]. 植物生态学报, 2015, **39** (6): 586-592 [Zhang WJ, Zhang QD, Wang J, Feng F, Bi RC. A comparison of multivariate regression tree and two-way indicator species analysis in plant community classification [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, **39** (6): 586-592]
 - 16 Ahmad SS, Quratulann. Vegetation classification in Ayubia National Park, Pakistan using ordination method [J]. *Pakistan J Botany*, 2011, **43** (5): 2315-2321
 - 17 Zhang YM, Chen YN, Pan BR. Distribution and floristics of desert plant communities in the lower reaches of Tarim River, southern Xinjiang, People's Republic of China [J]. *J Arid Environ*, 2005, **63** (4): 772-784
 - 18 Garnier E. Interspecific variation in plasticity of grasses in response to nitrogen supply [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
 - 19 林勇明. 金沙江小流域景观格局变化与土壤侵蚀的耦合作用——以云南蒋家沟为例[D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2008 [Lin YM. Study on Interactions of Landscape Change and Soil erosion in the Typical Watershed of Jinsha River —A Case Study of Jiangjia Gully in Yunnan Province [D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resource, Institute of Mountain Hazards and Environment, 2008]
 - 20 崔鹏, 王道杰, 韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应: 以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. 中国水土保持科学, 2005, **3** (3): 60-64 [Cui P, Wang DJ, Wei FQ. Model and effect of ecological restoration of dry-hot valley: a case study of the CAS Dongchuan Debris Flow Observation Station [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2005, **3** (3): 60-64]
 - 21 张广帅, 邓浩俊, 俞伟, 林勇明, 马瑞丰, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析——以云南小江流域为例[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (4): 646-654 [Zhang GS, Deng HJ, Yu W, Lin YM, Ma RF, Wang DJ, Wu CZ, Hong W. Vertical gradient analysis of soil environmental factors and vegetation community in mountain areas of frequent debris flow: a case study in the Xiaojang Watershed, Yunnan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (4): 646-654]
 - 22 温钦舒, 王道杰, 武绍周, 王军, 王海帆. 云南东川深沟泥石流分区治理模式初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, **25** (3): 14-19 [Wen QS, Wang DJ, Wu SZ, Wang J, Wang HF. Preliminary investigation on zonal control pattern of debris flow in Shengousmall watershed in Dongchuan, Yunnan province [J]. *Chin J Geo Hazard Control*, 2014, **25** (3): 14-19]
 - 23 陈爱民, 严思维, 林勇明, 邓浩俊, 杜锟, 孙凡, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38** (9): 62-70 [Chen AM, Yan SW, Lin YM, Deng HJ, Du K, Shun F, Wang DJ, Wu CZ, Hong W. Evaluation of soil anti-erodibility at different ages of *Leucaena leucocephala* forests in the area with high-frequency debris flow [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, **38** (9): 62-70]
 - 24 陈云, 冯佳伟, 牛帅, 许宁, 韩军旺, 叶永忠, 袁志良. 小秦岭自然保护区苔藓植物群落数量分类、排序及多样性垂直格局[J]. 生态学报, 2017, **37** (8): 2653-2664 [Chen Y, Feng JW, Niu S, Xu N, Han JW, Ye YZ, Yuan ZL. Numerical classification, ordination, and species diversity of bryophytes along elevation gradients in Xiaoqinling [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (8): 2653-2664]
 - 25 Gaston K J. Global patterns in biodiversity [J]. *Nature*, 2000, **405** (6783): 220-227
 - 26 Rahbek C. The role of spatial scale and the perception of largescale species richness patterns [J]. *Ecol Letters*, 2005, **8** (2): 224-239
 - 27 Lomolino MV. Elevation gradients of species-density: historical and prospective views [J]. *Global Ecol Biog*, 2001, **10** (1): 3-13
 - 28 郭晓军, 崔鹏, 庄建琦, 刘应辉, 张建强. SCS模型在泥石流多发区降雨—径流模拟中的应用——以云南省蒋家沟流域为例[J]. 水土保持通报, 2010, **30** (2): 225-228 [Guo XJ, Cui P, Zhuang JQ, Liu YH, Zhang JQ. SCS Model and its application to rainfall—runoff in debris activity region—a case from Jiangjiagou Watershed of Yunnan Province [J]. *Bull Soil Water Convers*, 2010, **30** (2): 225-228]
 - 29 刘晔, 李鹏, 许玥, 石松林, 应凌霄, 张婉君, 彭培好, 沈泽昊. 中国西南干旱河谷植物群落数量分类和排序分析[J]. 生物多样性, 2016, **24** (4): 378-388 [Liu Y, Li P, Xu Y, Shi SL, Ying LX, Zhang WJ, Peng PH, Sheng ZH. Quantitative classification and ordination for plant communities in dry valleys of Southwest China [J]. *Biod Sci*, 2016, **24** (4): 378-388]
 - 30 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004 [Zhang JT. *Quantitative Ecology* [M]. Beijing: Science Press, 2004]

- 31 臧润国, 井学辉, 丁易, 成克武, 白志强, 张新平, 郭仲军, 张炜银. 新疆阿尔泰山小东沟林区木本植物群落数量分类、排序及其环境解释[J]. 林业科学, 2010, **46** (2): 24-31 [Zang RG, Jing XH, Ding Y, Cheng KW, Bai ZQ, Zhang XP, Guo ZJ, Zhang WY. Quantitative classification, ordination and environmental analysis of woody plant communities in Xiaodonggou Forest Area of the Altai Mountain, Xinjiang [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46** (2): 24-31]
- 32 张海燕, 刘彬. 博斯腾湖湖滨湿地植被数量分类与排序[J]. 植物科学学报, 2015, **33** (1): 36-43 [Zhang HY, Liu B. Quantitative classification and ordination of plant vegetation in the Bosten Lake Wetlands [J]. *Plant Sci J*, 2015, **33** (1): 36-43]
- 33 Hu YX, Huang JL, Du Y, Han PP, Wang JL, Huang W. Monitoring wetland vegetation pattern response to water-level change resulting from the Three Gorges Project in the two largest freshwater lakes of China [J]. *Ecol Eng*, 2015, **74**: 271-285
- 34 覃红燕, 李景德, 邹冬生, 李峰. 涡河水生植被特征及分布成因[J]. 生态学杂志, 2012, **31** (11): 2781-2787 [Qin HY, Li JD, Zhou DS, Li F. Characteristics and distribution causation of aquatic macrophytes in Guohe River of East China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, **31** (11): 2781-2787]
- 35 朱军涛, 于静洁, 王平, 王志勇. 额济纳荒漠绿洲植物群落数量分类及其与地下水环境的关系分析[J]. 植物生态学报, 2011, **35** (5): 480-489 [Zhu JT, Yu JJ, Wang P, Wang ZY. Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater environment in the Ejina Desert Oasis of China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (5): 480-489]
- 36 徐建霞, 王建柱. 三峡库区香溪河消落带植被群落特征与土壤环境相关性[J]. 生态学杂志, 2018, **37** (12): 3661-3669 [Xu JX, Wang JZ. Correlation between vegetation community and soil physical-chemical factors in water-level fluctuation zone of Xiangxi River of the Three Gorges Reservoir area [J]. *Chin J Ecol*, 2018, **37** (12): 3661-3669]
- 37 周欣, 左小安, 赵学勇, 王少昆, 刘川, 张婧, 吕朋, 张建鹏. 科尔沁沙地植物群落分布与土壤特性关系的DCA、CCA及DCCA分析[J]. 生态学杂志, 2015, **34** (4): 947-954 [Zhou X, Zuo XA, Zhao XY, Wang SK, Liu C, Zhang Q, Lv P, Zhang JP. Comparison analyses of DCA, CCA and DCCA on relationships between plant community distribution and soil properties of Horqin Sandy Land [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34** (4): 947-954]
- 38 王景升, 姚帅臣, 普穷, 王志凯, 冯继广. 藏北高原草地群落数量分类与排序[J]. 生态学报, 2016, **36** (21): 6889-6896 [Wang JS, Yao SC, Pu Q, Wang ZK, Feng JG. Quantitative classification and ordination of grassland communities on the northern Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (21): 6889-6896]
- 39 董林水, 张旭东, 周金星, 宋爱云. 晋西黄土丘陵与土石山区交错地带灌木的数量分类与排序[J]. 生态学报, 2007, **27** (7): 3072-3080 [Dong LS, Zhang XD, Zhou JX, Song AY. Quantitative classification and ordination of shrub species and communities in a loess landscape of western Shanxi [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (7): 3072-3080]
- 40 张广帅, 邓浩俊, 杜锬, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例[J]. 生态学报, 2016, **36** (3): 675-687 [Zhang GS, Deng HJ, Du K, Lin YM, Ma RF, Yu W, Wang DJ, Wu CZ, Hong W. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: a case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (3): 675-687]
- 41 Vittoz P, Bayfield N, Brooker R, Elston D A, Duff E I, Theurillat J P, Guisan A. Reproducibility of species lists, visual cover estimates and frequency methods for recording high-mountain vegetation [J]. *J Veg Sci*, 2010, **21** (6): 1035-1047.
- 42 孙丽文, 史常青, 李丹雄, 赵廷宁. 汶川地震滑坡迹地植物群落与环境的关系[J]. 生态学报, 2016, **36** (21): 6794-6803 [Sun LW, Shi CQ, Li DX, Zhao YN. Relationship between plant communities and environment after landslide of Wenchuan Earthquake [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (21): 6794-6803]
- 43 胡相明, 赵艳云, 程积民, 万惠娥, 刘京涛. 云雾山天然草地物种分布与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2008, **28** (7): 3102-3107 [Hu XM, Zhao YY, Cheng JM, Wan HE, Liu JT. The relationship between species distribution pattern and environment factors in grassland of the Yunwu Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (7): 3102-3107]
- 44 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, 2003, **23** (10): 2000-2008 [Hao ZQ, Guo SL. Canonical correspondence analysis on relationship of herbs with their environments on northern slope of Changbai Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (10): 2000-2008]
- 45 冶民生. 岷江上游植被群落特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007 [Ye MS. Characteristics of the Vegetation Communities in the Upper Reaches of the Minjiang River [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007]
- 46 姚帅臣, 王景升, 丁陆彬, 包小婷, 李超, 王彤, 刘文婧, 李妍妍. 拉萨河谷草地群落数量分类与排序[J]. 生态学报, 2018, **38** (13): 4779-4788 [Yao SC, Wang JS, Ding LB, Bao XT, Li C, Wang T, Liu WQ, Li YY. Quantitative classification and ordination of grassland communities in Lhasa River Valley [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (13): 4779-4788]
- 47 Zhang JT, Xu B, Li M. Vegetation patterns and species diversity along elevational and disturbance gradients in the Baihua Mountain reserve, Beijing, China [J]. *Mount Res Dev*, 2013, **33** (2): 170-178
- 48 张燕杰, 崔玲玲, 庞有智, 刘杰, 拉多. 拉萨河谷植物群落分类与排序及物种丰富度与环境的关系[J]. 生态学杂志, 2015, **34** (12): 3289-3299 [Zhang YJ, Cui LL, Pang YZ, Liu J, La D. Classification and ordination of plant communities and the relationship between species richness and environmental factors in Lhasa valley [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34** (12): 3289-3299]
- 49 朱媛君, 张璞进, 邢娜, 闫颖超, 清华, 赵利清. 毛乌素沙地丘间低地植物群落分类与排序[J]. 中国沙漠, 2016, **36** (6): 1580-1589 [Zhu YJ, Zhang PJ, Xing N, Yan YC, Qing H, Zhao LQ. Classification and Ordination Analysis of Plant Communities in Inter-dune Lowland in the Mu Us Sandy Land [J]. *J Desert Res*, 2016, **36** (6): 1580-1589]
- 50 李婷婷, 姬兰柱, 于大炮, 周莉, 周旺明, 毛沂新, 代力民. 东北阔叶红松林群落分类、排序及物种多样性比较[J]. 生态学报, 2019, **39** (2): 620-628 [Li TT, Ji LZ, Yu DP, Zhou L, Zhou WM, Mao YX, Dai LM. Forest community classification, ordination, and comparison of species diversity in broadleaved-Korean pine mixed forests of Northeast China [J]. *Chin J Ecol*, 2019, **39** (2): 620-628]