

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.24032

CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.24032

朱华, 谭运洪, 杨永平. 中国西南干热河谷萨王纳植被综述[J]. 植物科学学报, 2024, 42 (5): 682-696

Zhu H, Tan YH, Yang YP. Review on savanna vegetation in the dry hot river valleys of southwestern China[J]. *Plant Science Journal*, 2024, 42 (5): 682-696

中国西南干热河谷萨王纳植被综述

朱华*, 谭运洪, 杨永平

(中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心, 中国科学院东南亚生物多样性研究中心, 云南省东南亚生物多样性保护国际联合实验室, 云南省热带雨林与亚洲象保护重点实验室, 云南勐腊 666303)

摘要: 中国西南的深切河谷因“焚风”效应形成干热河谷, 具有干热性气候和河谷型萨王纳植被。萨王纳植被的植物群落以禾草占绝对优势, 形成背景, 其间散生灌木和乔木, 在外观上类似“稀树草原”。在生活型构成上, 它们以高位芽植物为主(占总种数的 48.0%), 但地面芽植物(占 23.3%)占比较高; 在叶级谱上, 小叶植物占总种数的 42.5%, 微叶植物占 20.6%; 在乔木树种中, 复叶占乔木总种数的 39.3%, 表现出明显适应干旱生境的特征。西南干热河谷萨王纳植被的植物区系总体上以热带成分占优势, 但不同的干热河谷萨王纳植被的植物区系在演化过程中受地质历史和自然地理的影响发生了明显的分化。在植物区系的相似性上, 金沙江干热河谷与元江干热河谷属相似性为 73.8%, 种相似性为 53.8%, 在本文比较的西南干热河谷中具有最大的属、种相似性。研究发现, 中国西南干热河谷萨王纳植被和植物区系在起源和演化上与自第三纪以来, 伴随着喜马拉雅的隆升, 在云南发生的主要地质事件密切相关。在其植物区系中, 一些种类显示与印度和非洲的萨王纳植被有关联, 这在一定程度上支持印度板块从非洲分离, 筏运了部分非洲植物到亚洲的理论。金沙江与元江干热河谷具有最高的属、种相似性, 支持了金沙江曾流到元江, 后来因河流袭夺改道的假说。怒江干热河谷植物区系中热带成分占绝对优势, 这可能与印度板块向北推挤亚洲板块, 缅甸北部随之发生了北移密切相关。这些地区发生的地质历史事件可以较好地解释西南干热河谷的植物区系组成、特征和分布格局。

关键词: 萨王纳植被; 群落特征; 起源与演化; 干热河谷; 中国西南

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837 (2024) 05-0682-15

Review on savanna vegetation in the dry hot river valleys of southwestern China

Zhu Hua*, Tan Yunhong, Yang Yongping

(Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden & Southeast Asia Biodiversity Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Yunnan International Joint Laboratory of Southeast Asia Biodiversity Conservation, Yunnan Key Laboratory for the Conservation of Tropical Rainforests and Asian Elephants, Mengla, Yunnan 666303, China)

Abstract: The deep valleys in southwestern China experience a dry, hot climate and support savanna-like vegetation, largely shaped by the “foehn” effect. This vegetation is primarily dominated by grasses, interspersed with scattered shrubs and trees, resembling the physiognomy of savannas in other parts of the world. The savanna-like ecosystem hosts a rich diversity of species adapted to the dry, hot valley habitat, including many local endemic plants. In terms of life forms, phanerophytes dominate, accounting for 48.0% of the total

收稿日期: 2024-02-19, 接受日期: 2024-03-04。

基金项目: 云南省重点研发计划专项(202403AC00028); 国家自然科学基金项目(41071040, 31970223); 云南省科技厅建设面向南亚东南亚科技创新中心专项(202203AP140007); 云南省热带雨林与亚洲象保护重点实验室开放课题项目(202305AG070003)。

作者简介: 朱华(1960-), 男, 研究员, 主要从事植被与植物区系研究(E-mail: zhuh@xtbg.ac.cn)。

* 通信作者(Author for correspondence. E-mail: zhuh@xtbg.ac.cn)。

species, while hemicryptophytes account for 23.3%. Regarding leaf characteristics, microphyllous and nanophyllous plants represent 42.5% and 20.6% of the total, respectively; among tree species, 39.3% have compound leaves, reflecting adaptations to arid habitats. The flora in the hot, dry valleys of southwest China are generally dominated by tropical elements, but are influenced by regional geological history and geography. Floristic similarity between the Jinshajiang and Yuanjiang river valleys is high, with 73.8% and 53.8% at the genus and species levels, respectively, representing the greatest similarity among the hot, dry valleys. The origin and evolution of this flora are closely related to major geological events in Yunnan since the Tertiary, including uplift of the Himalayas. Some species exhibit floristic affinities with the savannas of India and Africa, supporting the hypothesis that the Indian plate separated from Africa, collided with Asia, and transported African plants to the continent. The high generic similarity between the Jinshajiang and Yuanjiang river valleys supports the river capture hypothesis. In contrast, the savanna-like vegetation in the Nujiang River valley is dominated by tropical floristic elements, which is likely related to the northward push of the Indian plate into the Asian plate and the subsequent northward shift of northern Myanmar. These geological events help explain the floristic composition, characteristics, and distribution patterns of the savanna-like vegetation in the dry, hot valleys of southwestern China.

Key words: Savanna-like vegetation; Community physiognomy; Origin and evolution; Hot dry valley; Southwestern China

中国西南干热河谷的萨王纳植被以草为主，其间散生灌木和乔木，在外观上类似“稀树草原”^[1]，即以禾草草丛为背景构成的大片草地，是一类在草丛之上散生稀疏的乔木和灌木的植被，它们曾被命名为“河谷型萨王纳”^[2]或“稀树灌木草丛”^[3]。这类植被在人为干扰下，群落结构常有变化，原生的或受人为干扰较小的群落具有乔木、灌木和草本 3 层结构；在受到较大干扰下，一些群落变得有灌木而无乔木，或有乔木而少见灌木，或乔木、灌木都少见，表现为“稀树草丛”、“灌木丛”、“草丛”等外观状态，但群落以草为主这一特征是共同的，它们的草本层盖度一般可达 80% 以上，呈以禾草草丛为背景构成的草地样植被。中国西南干热河谷的萨王纳植被是一类古老的植被，它们具有长期适应干热河谷生境的植物群落特征种和植物区系标识种，是世界萨王纳植被的干热河谷残存者，也是我国一类珍稀濒危的植被类型^[2, 4]。由于干热河谷的萨王纳植被在外观上呈稀树灌木草丛状，至今许多人习惯地认为它们是原来的森林植被被破坏后形成的次生性植被，在受到较多人为干扰或过度放牧的地段，它们会成为处于不同演替阶段、具有不同外貌特征的植被，使得问题很复杂。对中国西南地区地质历史和自然地理的研究发现，这些地区因地质板块断裂、挤压、错位及地形的差异性抬升，形成深切河谷已有远

久的历史^[5-12]。这些深切河谷因“焚风”效应成为干热河谷已存在了上千万年^[13-15]，那时可能就已发育了河谷型萨王纳植被^[16]。因此，西南干热河谷的萨王纳植被是一类古老的原生性植被，并非森林破坏后形成的次生植被。基于生态特征和气候属性，世界热带地区的萨王纳被定义为受季节性干旱而非寒冷强烈影响的地区木本植物和草本植物共存的生态系统^[17]，西南干热河谷的萨王纳植被符合这一定义（图版 I、II）。

西南地区的干热河谷主要是深切河谷，其干流和一级支流的两侧具有高、中山，形成峡谷地貌。例如，元江河谷的元江县（23°36'N，101°59'E），海拔 396.4 m，两侧山脉屏障线（分界线）均在 3 000 m 左右，峡谷高差达 2 600 m；金沙江河谷的元谋县（25°44'N，101°52'E），海拔 1 120.2 m，两侧山脉屏障线（分界线）在 2 500~3 500 m。在这些深切河谷，由于气候上的“焚风”效应，在谷底形成干热的气候。例如在元江县城，它的年平均温 23.7℃，≥10℃年积温 8 078.9℃，年平均降水量 805.1 mm，年平均蒸发量 2 750.9 mm，年蒸发量是年降水量的 3.4 倍；在元谋县城，年平均温 21.8℃，≥10℃年积温 7 996.1℃，年平均降水量 634 mm，年平均蒸发量 3 874.8 mm，年蒸发量为年降水量的 6.1 倍^[4]。怒江干热河谷的情况也一样。总的来说，西南干

热河谷的主要气候特征是“干”和“热”，年平均温在 21℃ 以上， $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温 7 500℃ 以上，年降水量 600~1 200 mm，年蒸发量为年降水量的 3~6 倍。

西南干热河谷的土壤主要是燥红土，在发生上属于强烈钙积干润变性土，属干旱/干润沙质新成土^[18]。

西南干热河谷的萨王纳植被是一类西南地区的特有植被。早期金振洲等^[4]对西南干热河谷的植被有较系统的研究；对其植物区系，结合了干暖河谷，即滇川干热与干暖河谷，金振洲^[19-21]发表了专门的论著；其他主要是对具体县域或局域的干热河谷植被和植物区系的研究，如：欧晓昆^[22]、曹敏和金振洲^[23]、曹永恒^[24]、曹永恒和金振洲^[25]等。中国西南干热河谷的萨王纳植被曾与干暖河谷的灌丛类植被合在一起，统称干旱河谷植被。一些研究从植物多样性、植物区系和植被、形成原因和分布格局、生态环境和人为影响等方面对西南干旱河谷的植被进行了探讨^[26-31]。根据我们的考察，在金沙江上游，在 28°N 左右，其干热河谷进入到干暖河谷，气候也从干热性（热带性质）转变为干暖性（亚热带性质），植被类型相应从热带萨王纳植被转变成与地中海地区类似的一种亚热带灌丛状植被，即所谓的马基植被（Maquis），这类亚热带灌丛状植被在澜沧江上游干暖河谷海拔 2 100~2 600 m 地带更为典型。马基植被是地中海沿岸地区常绿或半常绿的硬叶小叶灌丛和灌木林的总称^[32]，因中国西南干暖河谷的这类灌丛状植被，与地中海地区的马基植被在群落结构和外貌上类似，我们建议称它们为河谷型马基植被，以示区别^[33]。河谷型马基植被是西南干暖河谷的一类特殊灌丛植被，它们以灌木为主，与草本共生成簇，但禾草不占优势。干热河谷的萨王纳植被则是一类热带性稀树草原，它以禾草构成群落背景，禾草种类以扭黄茅（*Heteropogon contortus* (L.) P. Beauv. ex Roem. & Schult.）占绝对优势，草本层覆盖度在 80% 以上（在无或少有人为干扰、牛羊啃食的地段），在一些文献中植被分类的高等级上它也被划归“草原或草地”植被；而干暖河谷的马基植被则是一类灌木或灌丛植被，在群落构成上以常绿灌木为主，灌木层具有最大覆盖度，草本层覆盖度一般低于 20%，亦未见禾草扭黄茅。

因此，按一般植被分类的原则和依据，西南干热河谷的萨王纳植被与干暖河谷的马基植被（或称硬叶小叶灌丛）是不同的植被类型。本文只对西南干热河谷的萨王纳植被进行评述，与一些文章中的西南干旱河谷植被有概念上的区别。

由于西南干热河谷的萨王纳植被曾被认为是原来森林植被被破坏后形成的次生性植被，以致在干热河谷萨王纳植被分布区域或分布生境，有很多地方被考虑作为清洁能源光伏电场选址的适宜区域。同样，在干热河谷的萨王纳植被是次生性植被的思想指导下，目前在一些地方已开展了对干热河谷萨王纳植被进行工程性或造林植被恢复，拟使其成为森林植被。我们认为，如果在这些生境大量建设光伏电场，将可能会对这类古老植被的生物多样性构成威胁。另一方面，在干热河谷地区进行的工程性植被恢复或造林，因其生境的年蒸发量为年降水量 3~6 倍，具有很大的风险。针对目前面临的这些严峻问题及对干热河谷萨王纳植被的性质和保护价值认识的差异，我们依据对西南干热河谷的萨王纳植被多年的调查研究，撰写了该综述。本文的重点也在论述西南干热河谷萨王纳植被的原生性及其起源与演化，期望能引起学术界和社会对它们生物多样性保护的关注。

本文从物种组成、群落结构和生态外貌特征、植物区系地理成分上进行简述，并对不同干热河谷的萨王纳植被的植物区系特征与分异进行论述，结合中国西南发生的地质历史事件，探讨它们可能的起源与演化。

目前，对中国西南干热河谷萨王纳植被仍缺少深入的研究，特别是面临着在干热河谷进行工程性植被恢复、清洁能源光伏电场选址等工程，在社会和学术界存在争议，希望这篇综述具有参考价值，也希望该文能为林业、环保及感兴趣的科研人员提供参考。

1 中国西南干热河谷主要植被类型及其分布

中国西南干热河谷的天然植被主要包括 5 大植被类型：热带萨王纳植被或热带稀树草原、热带季雨林（热带落叶林）、肉质多刺灌丛、干热性灌丛以及锥连栎（*Quercus franchetii* Skan）硬

叶常绿阔叶林。在这5类植被中，萨王纳植被主要分布在干热河谷海拔1500 m以下地区河流干流和支流的坡面，面积最大，也最有代表性；热带季雨林主要分布在干热河谷底部河流两岸、沟箐及部分相对湿润的地段；在一些多石局部地段分布有肉质多刺灌丛；干热性灌丛也主要在一些土薄多石地段分布；锥连栎硬叶常绿阔叶林主要分布在金沙江和元江干热河谷，通常在萨王纳植被的上部坡面。

热带萨王纳植被主要分布在元江干热河谷、怒江部分地段干热河谷、金沙江干热河谷和澜沧江部分地段干热河谷及其他的支流。原生性的群落具有乔木、灌木和草本3层结构，并以禾草，特别是扭黄茅，构成草丛背景，外观上类似稀树草原，是其识别特征。原生植被主要存在于人迹稀少的干热河谷地段，而更易被看到的是在人为干扰下形成的呈现为稀树草丛、灌草丛、草丛等具一定次生性质的群落。干热河谷的萨王纳植被因生境独特和起源古老，具有独特的植物区系组成，它们中的大多数种类为热带性（或热带起源）的耐干旱种类，与亚热带山地的草甸和温带草原在种类组成上区别明显。西南干热河谷的萨王纳植被在《云南植被》中被统称为“稀树灌木草丛”^[3]，既包括原生的，也包括次生的群落，它们的面积大、分布广，是西南，特别是云南的主要天然植被类型之一。

干热性灌丛目前鲜有研究资料，它们经常是以单优势灌木种构成的单优群落，草本层覆盖度不大，是一类灌丛植被。据我们长期的野外考察和观察，面积最大的应是清香木（*Pistacia weinmannifolia* J. Poiss. ex Franch.）灌丛，它在元江、澜沧江、金沙江和怒江干热河谷有广泛分布；虾子花（*Woodfordia fruticosa* (L.) Kurz）灌丛在元江和澜沧江有较多分布；疏序黄荆（*Vitex negundo* f. *laxipaniculata* C. P'ei）灌丛和岩柿（*Diospyros dumetorum* W. W. Sm.）灌丛在元江和金沙江有广泛分布；栎菊木（*Nouelia insignis* Franch.）灌丛则为金沙江特有。坡柳（*Dodonaea viscosa* Jacquem.）灌丛和苦刺花（*Sophora davidii* Kom. ex Pavol.）灌丛分布的区域较大，除干热河谷外，在亚热带山地局部地区也有分布。目前大多数干热性灌丛仍缺乏深入研究，是云南

植被研究的一大空白。

在西南的干热河谷，在水分条件相对较好的沟箐和河谷底部河流两岸，具有热带落叶林（一种热带季雨林类型），它的群落高度相对于地带性的热带季雨林较矮，结构相对简单，乔木一般仅有1~2层，树种在干季都落叶，即有一个明显的无叶时期。上层树种树冠通常呈伞状，树皮厚而粗糙，以厚皮树（*Lannea coromandelica* (Houtt.) Merr.）、白头树（*Garuga forrestii* W. W. Sm.）、木棉（*Bombax ceiba* L.）为代表，林内明显较干燥，木质藤本较少，几乎无附生植物。干热河谷中的热带落叶林是一类与萨王纳植被沿水湿条件变化的热带植被，即介于热带季节性雨林与萨王纳之间的植被类型^[34]。

肉质多刺灌丛是世界热带、亚热带干旱、半干旱荒漠植被的主要类型之一。云南虽不存在热带、亚热带干旱、半干旱大区域的荒漠气候，但在西南部的怒江、元江及金沙江等深切河谷，在局部土薄多石的特别干热之处，出现有以霸王鞭（*Euphorbia royleana* Boiss.）和梨果仙人掌（*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller）为代表的具有荒漠植被景观的肉质多刺灌丛，并以元江干热河谷最为典型。元江干热河谷的肉质多刺灌丛以霸王鞭、梨果仙人掌和厚皮树占优势，它主要呈斑块状或带状分布在海拔600 m以下的地区，它的组成物种除霸王鞭和梨果仙人掌外，其他与同地区萨王纳植被的物种一样^[35]。干热河谷中的肉质多刺灌丛与萨王纳植被的分布区经常重叠，或肉质多刺植物霸王鞭和梨果仙人掌自身就作为萨王纳植被中的一个成分，与其混生。组成肉质多刺灌丛的霸王鞭是本土物种，它在印度、缅甸等地干热地区也是肉质多刺灌丛的主要成分，但梨果仙人掌是如何来的仍是未知，因仙人掌类植物一般认为是热带美洲的特产物种。

在金沙江和元江干热河谷，通常在萨王纳植被的上部坡面，具有以常绿栎属植物锥连栎占优势的硬叶常绿阔叶林。锥连栎的叶革质坚硬、常绿，树皮粗厚、树干弯曲，具有明显耐干旱特征。锥连栎硬叶常绿阔叶林是与地中海沿岸植被有亲缘的、古地中海植被的直接衍生物，是在喜马拉雅隆升中适应新的环境而形成的在中国西南地区发育的一个特殊植被类型^[36]。锥连栎硬叶常绿阔叶

林除锥连栎树种外, 其他种类也与同域的萨王纳植被的种类组成几乎一样, 它的乔木和灌木层中常有清香木、余甘子 (*Phyllanthus emblica* L.)、坡柳 (车桑子) (*Dodonaea viscosa* Jacquem.)、岩柿、川滇野丁香 (*Leptodermis pilosa* Diels)、华西小石积 (*Osteomeles schwerinae* C. K. Schneid.) 等。锥连栎硬叶常绿阔叶林群落的草本植物也常以扭黄茅具有最大覆盖度, 它们并没有一个独特的植物区系。

2 中国西南萨王纳植被植物种类组成

西南干热河谷的萨王纳植被, 尽管间断分布在元江、怒江部分地段、金沙江干热河谷和澜沧江部分地段的干热河谷及其支流, 它们的种类组成基本类似, 特别是在草本层, 都以扭黄茅为优势种, 但在其乔木和灌木种类上, 有一定差异, 既有几条河流及流域干热河谷的广域分布种类, 也有各干热河谷的局域分布种类。下面以各主要干热河谷代表性区域或地段在群落中出现频度较高以及具有一定代表性的物种组成进行简述。

在金沙江干热河谷, 在华坪、永仁、元谋等地, 萨王纳植被很典型。群落的草本层以扭黄茅占绝对优势, 形成背景, 其他草本植物常见种有: 细柄草 (*Capillipedium parviflorum* (R. Br.) Stapf)、三芒草 (*Aristida adscensionis* L.)、孔颖草 (*Bothriochloa pertusa* (L.) A. Camus)、臭根子草 (*Bothriochloa bladhii* (Retz.) S. T. Blake)、芸香草 (*Cymbopogon distans* (Nees ex Steud.) Will. Watson)、虎尾草 (*Chloris virgata* Sw.)、旱茅 (*Schizachyrium delavayi* (Hack.) Bor) 等禾草。除禾草外, 其他草本层常见种有: 丛毛羊胡子草 (*Eriophorum comosum* (Wall.) Nees)、蔓草虫豆 (*Atylosia scarabacoides* (L.) Benth.)、草本叶下珠 (*Phyllanthus urinaria* L.)、柳叶斑鸠菊 (*Vernonia saligna* DC.)、丁癸草 (*Zornia diphylla* (L.) Pers.)、地皮消 (*Pararuellia delavayana* (Baill.) E. Hossein)、假杜鹃 (*Barleria cristata* L.)、独脚金 (*Striga asiatica* (L.) Kuntze)、土丁桂 (银丝草) (*Evolvulus alsinoides* (L.) L.)、黄细辛 (*Asarum longiflorum* C. Y. Chenget C. S. Yang.)、千解草 (*Premna herbacea* Roxb.) 等。灌木矮小

疏生, 常见种有: 坡柳、牛角瓜 (*Calotropis gigantea* (L.) W. T. Aiton)、清香木、疏序黄荆、小雀花 (*Campylotropis polyantha* (Franch.) Schindl.)、岩柿、单叶木蓝 (*Indigofera linifolia* (L. f.) Retz.)、毛果扁担杆 (*Grevia eriocarpa* Juss.)、云南山蚂蝗 (*Desmodium yunnanense* Franch.)、灰毛山蚂蝗 (*Desmodium elegans* DC.)、云南灰毛豆 (*Tephrosia purpurea* var. *yunnanensis* Z. Wei)、川滇野丁香、华西小石积等。梨果仙人掌在群落中也经常出现。藤状灌木常见有小花羊蹄甲 (*Bauhinia faberi* Oliv.)、鞍叶羊蹄甲 (*Bauhinia brachycarpa* Wall. ex Benth.) 等; 草质藤本植物常见有白花飞萼藤 (*Porana henryi* Verdc.)、古钩藤 (*Cryptolepis buchananii* Schult.) 等。在萨王纳植被中, 稀疏分布的乔木常见种有: 锥连栎、铁橡栎 (*Quercus cocciferoides* Hand.-Mazz.)、余甘子、滇榄仁 (*Terminalia franchetii* Gagnep.)、狭叶山黄麻 (*Trema angustifolia* (Planch.) Blume)、金合欢 (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.)、木棉、缅甸枣 (*Ziziphus mauritiana* Lam.)、毛叶黄杞 (*Engelhardia colebrookiana* Lindl. ex Wall.)、栉菊木, 还有极小种群特有种云南梧桐 (*Firmiana major* (W. W. Sm.) Hand.-Mazz.)。

在澜沧江中、下游干热河谷地段, 萨王纳植被最常见的乔木主要有: 厚皮树、火绳树 (*Eriolaena spectabilis* (DC.) Planch. ex Mast.)、家麻树 (*Sterculia pexa* Pierre)、木棉、羽叶楸 (*Stereospermum colais* (Buchanan-Hamilton ex Dillwyn) Mabblerley)、千张纸 (*Oroxylum indicum* (L.) Kurz)、余甘子、钝叶黄檀 (*Dalbergia obtusifolia* (Baker) Prain)、灰毛浆果楝 (*Cipadessa cinerascens* (Pellegr.) Hand.-Mazz.)、毛叶黄杞等。灌木主要有虾子花、清香木、坡柳、山芝麻 (*Helicteres angustifolia* L.)、白菊木 (*Leucomeris decora* Kurz)、毛果扁担杆、小齿锥花 (*Gomphostemma microdon* Dunn) 等。草本植物仍以扭黄茅占优势, 其他常见种有: 细柄草、硬秆子草 (*Capillipedium assimile* (Steud.) A. Camus)、臭根子草、孔颖草、类芦 (*Neyrandia reynaudiana* (Kunth) Keng ex Hitchc.)、翅茎草 (*Pterygiella nigrescens* Oliv.) 等。藤本植

物常见种有白叶藤 (*Cryptolepis elegans* Wall. ex G. Don)、翅果藤 (*Myriopteron extensum* (Wight & Arn.) K. Schum.) 等。

怒江干热河谷主要是在海拔 1 300 m 以下六库的怒江下游河段。乔木层常见种有：厚皮树、滇榄仁、钝叶黄檀、毛叶黄杞、木棉、羽叶楸、余甘子、金合欢、黄毛合欢 (*Albizia garrettii* I. C. Nielsen)、诃子 (*Terminalia chebula* Retz.)、翅果麻 (*Kydia calycina* Roxb.)、缅甸枣、毛叶黄檀 (*Dalbergia sericea* G. Don)、灰毛浆果楝等。灌木层以清香木占绝对优势，其他种有：虾子花、坡柳、岩柿、山芝麻、白菊木、三叶木蓝 (*Indigofera trifoliata* L.)、粗叶水锦树等；霸王鞭和梨果仙人掌也常见。草本层仍以扭黄茅占优势，孔颖草占亚优势，其他常见种有：土丁桂、丛毛羊胡子草、丁癸草、假杜鹃、蛇婆子 (*Waltheria indica* L.)、蔓草虫豆。藤本植物常见种有：络石 (*Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem.)、古钩藤、白叶藤、牛皮消 (*Cynanchum auriculatum* Royle ex Wight)、美飞蛾藤 (*Porrana spectabilis* Kurz) 等。

元江干热河谷是云南省最典型的干热河谷，其萨王纳植被的群落类型也最多样化，主要包含厚皮树-华西小石积-扭黄茅群落、火索麻 (*Helicteres isora* L.)-扭黄茅+孔颖草群落，华西小石积+疏序黄荆-扭黄茅群落、细基丸 (*Polyalthia cerasoides* (Roxb.) Benth. & Hook. f. ex Bedd.)-石山羊蹄甲 (*Bauhinia mairei* Harms)-扭黄茅群落，余甘子-扭黄茅群落、豆腐果 (*Buchanania latifolia* Roxb.)-三叶漆 (*Terminthia paniculata* (Wall. ex G. Don) C. Y. Wu & T. L. Ming)-扭黄茅群落及心叶水团花 (*Adina cordifolia* (Roxb.) Hook. f.)+细基丸-扭黄茅群落^[37]。

元江干热河谷的萨王纳植被研究较多。我们以中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站萨王纳植被 1 hm² 样地的调查资料为例^[38]，群落乔木高 5~10 m，盖度仅约 20%，优势度较大的树种为厚皮树、细基丸和鞍叶羊蹄甲；灌木层包含了部分幼树，高 1~1.5 m，盖度约为 20%，以假杜鹃最为优势，其次是疏序黄荆、细梗美登木 (*Maytenus graciliramulus* S. J. Pei et Y. H. Li)、元江素馨 (*Jasminum yuanjiangense* P. Y. Pai)

及虾子花；草本层高度为 1 m 左右，盖度可达 90%，以扭黄茅和沟颖草 (*Sehima nervosum* (Rottler) Stapf) 这两种禾本科植物占绝对优势，土丁桂、蛇婆子为最常见的种类；藤本植物以吊山桃 (*Secamone sinica* Hand.-Mazz.)、相思子 (*Abrus precatorius* L.) 为优势种。肉质多刺植物霸王鞭在群落中数量也较多。

在元江干热河谷，肉质多刺灌丛很有代表性，以霸王鞭和梨果仙人掌为特征，具有荒漠植被景观^[35]。金振洲^[20]把元江的这类肉质多刺灌丛定义为河谷型萨王纳植被的一个类型，属于“灌萨王纳植被”。

3 萨王纳植被的群落结构和生态外貌特征

中国西南干热河谷的萨王纳植被，虽原生或干扰较少的植物群落具有类似的结构和生态外貌特征，但在较严重或较大的人为干扰情况下，群落的结构和外貌常有变化。原生的群落具有乔木、灌木和草本 3 层结构，其草本层盖度一般可达 80% 以上。在受到干扰的情况下，群落可体现为“稀树草丛”、“灌草丛”、“草丛”等外观状态。也就是说，群落的结构和外貌依干扰的程度会发生各种各样的变化，形成各种不同退化或次生演替阶段的群落。

我们仍以西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站较典型萨王纳植被 1 hm² 样地的调查资料为例^[38]，对其群落的生态外貌特征进行简述。该群落生活型构成上，以高位芽植物为主，占到总种数的 48.0%，其中又以小高位芽为优势，占 26.0%；中高位芽与矮高位芽分别占 12.3% 与 9.6%；无大高位芽植物。藤本植物中的木质藤本与草质藤本各占群落总种数的 9.6%。草本植物中以地面芽植物为主，占 23.3%。群落中地上芽、地下芽与一年生草本植物占的比例都较低，没有发现草本高位芽植物与附生植物，反映了这里的生境非常干旱。该 1 hm² 样地群落的叶级谱以小叶植物为主，占到了 42.5%；其次是微叶与中叶，分别占到了 20.6% 与 17.8%。偏小型叶占了总种数的 16.4%。鳞叶只存在于草本植物中，有 2 种，占 2.7%，没有大叶植物。

整个群落叶型以单叶为主，占 74%；叶质以纸质为主，占 79.5%；叶缘以全缘为主，占

83.6%。单叶在灌木中比例最大，为 87.5%。纸质叶在草本植物中占的比例最大，为 95.7%。全缘叶在藤本植物中占的比例最大，为 92.9%。如果针对乔木树种，则小叶占 42.9%，偏小叶占 28.6%；复叶占 39.3%；纸质叶（主要是落叶树种）占 64.3%。显示了明显的适应干旱生境的特征。

4 萨王纳植被的植物区系特征及地理成分

西南干热河谷的萨王纳植被，尽管在群落结构与生态外貌特征上相似，但在植物区系组成上有明显分异。

我们在西南的干热河谷中记录到了 163 科、

1 038 属及 3 217 个野生种子植物^[1]。植物地理成分分析结果显示，西南干热河谷植物区系总体上热带成分占总属数的 57.18%，温带成分占 36.45%，以热带成分为主，但对比这些干热河谷萨王纳植被的植物区系，它们显示了明显差异，这可能因不同的干热河谷在其演化过程中受地质历史事件，包括河流袭夺等的影响，而导致它们的植物区系发生了明显的分异（表 1、表 2）^[1]。

在种的地理成分上，以对元江萨王纳植被 5 200 m² 的样地调查记录的 194 个种的分析为例，热带亚洲分布种占除去广布种以外的所有种的 46.3%，如：厚皮树、老人皮、豆腐果、火绳树、

表 1 元江、怒江、金沙江干热河谷萨王纳植被的植物区系属的地理成分比较

Table 1 Comparison of geographical elements of seed plant genera among savanna vegetation flora in the dry, hot valleys of Yuanjiang, Nujiang, and Jinshajiang

比较的干热河谷植物区系 Compared regional floras	元江干热河谷植物区系 (475 属) Flora of Yuanjiang (475 genera)	怒江干热河谷植物区系 (443 属) Flora of Nujiang (443 genera)	金沙江干热河谷植物区系 (823 属) Flora of Jinshajiang (823 genera)
地理成分 Geographical elements at genus level	%	%	%
1 世界广布 Cosmopolitan	7.79	7.22	7.78
2 泛热带 Pantropic	33.05	27.09	20.66
3 热带亚洲至热带美洲间断 Tropical Asia and Tropical America disjunct	2.74	2.71	1.58
4 旧世界热带 Old World Tropic	10.95	9.93	7.17
5 热带亚洲至热带大洋洲 Tropical Asia to Tropical Australia	6.53	7.90	3.77
6 热带亚洲至热带非洲 Tropical Asia to Tropical Africa	7.58	9.48	5.71
7 热带亚洲 Tropical Asia	16.42	17.38	8.38
热带成分合计 Tropical elements (types 2-7) in total*	77.26	74.49	47.27
8 北温带 North Temperate	6.53	9.03	18.23
9 东亚及北美间断 East Asia and North America disjunct	1.89	2.71	4.62
10 旧世界温带 Old World Temperate	2.32	2.71	7.17
11 温带亚洲 Temperate Asia	0.63	0.90	1.70
12 地中海、西亚至中亚 Mediterranean, W. Asia to C. Asia	0.42	0.45	1.34
13 中亚 Center Asia	0.00	0.00	0.24
14 东亚 East Asia	2.32	2.48	8.14
15 中国特有 Endemic to China	0.84	0.00	3.52
温带成分合计 Temperate elements (types 8-15) in total*	14.95	18.28	44.96
总计 Total	100.00	100.00	100.00

注：*为世界广布成分以外的热带成分合计和温带成分合计。

Note: * is the total of tropical and temperate elements outside the world element.

表 2 元江、怒江、金沙江干热河谷萨王纳植被的植物区系科、属、种的相似性比较

Table 2 Comparison of floristic similarities at the family, genus, and species levels among savanna vegetation flora in the dry, hot valleys of Yuanjiang, Nujiang, and Jinshajiang

比较的干热河谷植物区系 Compared regional flora	元江干热河谷 (117 科、475 属、798 种) Yuanjiang (117 families, 475 genera, 798 species)	怒江干热河谷 (110 科、443 属、788 种) Nujiang (110 families, 443 genera, 788 species)	金沙江干热河谷 (143 科、823 属、2 500 种) Jinshajiang (143 families, 823 genera, 2 500 species)
科相似性 Similarity coefficients at family level / %			
元江干热河谷 Yuanjiang	100		
怒江干热河谷 Nujiang	87.27	100	
金沙江干热河谷 Jinshajiang	88.89	90.00	100
属相似性 Similarity coefficients at genus level / %			
元江干热河谷 Yuanjiang	100		
怒江干热河谷 Nujiang	62.16	100	
金沙江干热河谷 Jinshajiang	73.84	67.80	100
种相似性 Similarity coefficients at species level / %			
元江干热河谷 Yuanjiang	100		
怒江干热河谷 Nujiang	35.03	100	
金沙江干热河谷 Jinshajiang	53.76	42.13	100

余甘子、蛇婆子、相思子等；中国特有种占到 23.5%，居第 2 位^[37]，它们中更多的是局域特有种。

萨王纳植被的植物区系在不同干热河谷差异较明显。元江、怒江和金沙江干热河谷萨王纳植被均以泛热带分布属比例最高，分别占总属数的 33.05%、27.09% 和 20.66%，为其共性；但元江和怒江干热河谷植物区系的热带分布属占总属数的 77.26% 和 74.49%，其中的热带亚洲分布属分别占总属数的 16.42% 和 17.38%，为其特征；金沙江干热河谷的热带分布属仅占 47.27%，其中热带亚洲分布属也仅占 8.38%，但北温带分布属占 18.23%，显示了这些干热河谷同类植被的植物区系已有明显分异。

表 1 是对元江、怒江、金沙江这 3 条主要干热河谷萨王纳植被的植物区系的总的比较，在同一干热河谷的不同地段，情况也有不同。元江和怒江干热河谷植物区系不同地段的植物地理成分差异不大，但金沙江干热河谷不同地段植物区系的地理成分差异明显。例如，在金沙江干热河谷最南部的元谋干热河谷植物区系中，热带属占到总属数（不包括世界分布属）的 72.3%^[22]，与元江和怒江干热河谷植物区系比较接近。

对元江、怒江、金沙江干热河谷的植物区系科、属、种的相似性的比较（表 2）结果显示，在属和种的类似性上，金沙江干热河谷与元江干热

河谷属相似性为 73.84%，种相似性为 53.76%，在所比较的这 3 条干热河谷中具有最大的相似性，尽管它们彼此相距最远。这 3 条干热河谷具有类似的气候和同样的河谷型萨王纳植被，但在它们的植物区系地理成分和属、种相似性上，显得与它们的地理位置关系不相符。结合云南的地质历史演化事件，这种不相符可以获得解释^[16]。

5 中国西南干热河谷萨王纳植被的起源

中国西南干热河谷萨王纳植被的起源是一个在研究上学术界很关注，在资源开发利用和保护上有争议的问题，下面将重点进行论述。

中国西南干热河谷的萨王纳植被不仅在景观上与印度、非洲萨王纳植被很相似，组成它的一些物种具有非洲亲缘，或本身就是非洲萨王纳植被同样的物种，这类植被是如何产生和演化的，这一问题很令人寻味。金振洲等^[19, 39]对滇川干热河谷植物区系的起源进行了探讨，提出这些干热河谷具有明显的特有现象和丰富的标志物种，并具有古南大陆（冈瓦纳）亲缘。对于干热河谷萨王纳植被的起源与演化已有进一步的认识^[1, 33]。我们提出西南干热河谷的萨王纳植被是在环境演变历史中自然形成的，因它们存在的这些深切河谷，底部接受辐射后散热差，产生“焚风”效应，从而形成了干热的气候环境和成为干热河谷，具备萨

王纳植被发育的条件。研究显示,西南的干热河谷气候是在地质历史演化中自然形成的,如元江和金沙江干热河谷,形成时间至少已有几百万年至千万年^[12, 13, 15]。元江(古红河)被认为是云南省最古老的一条河流^[30],它位于哀牢山-红河断裂剪切带,这个断裂剪切带的发生时间开始于早中新世(27~21) Mya (百万年)^[15]。干热河谷的萨王纳植被的起源与演化与第三纪以来在这些地区发生的地质事件密切相关。

自第三纪以来,伴随着喜马拉雅的隆升,在云南发生了 3 个主要地质事件:(1)喜马拉雅形成与隆升导致云南西北部地区发生了快速抬升^[5],其他地区亦发生了或多或少的抬升;(2)印度支那地质板块向东南亚逃逸^[6],直到晚中新世时才结束^[40];(3)兰坪-思茅地质板块发生了顺时针旋转并向东南位移^[9, 10],其结果是该地质板块向东南错位了 800 km,这个顺时针旋转和向东南的逃逸也持续到了中新世^[7, 11]。除了这几个主要地质事件外,随着印度板块的北移,缅甸北部也发生了北移(北移了约 1 000 km)^[41],导致高黎贡山和相关的怒江相应北移,以及伴随地形抬升而发生的河流袭夺,这些地质事件影响了干热河谷植物区系和植被的形成与演化。

对萨王纳植被的代表性物种的研究可以为探讨它们的起源与演化提供线索。扭黄茅是非洲稀树草原的一种主要禾草,在西南的干热河谷萨王纳植被中它是优势植物,常形成草原背景。虾子花属植物在世界上只有 2 个种,其中的一个种分布在非洲的稀树草原,另一种即虾子花,它从非洲的马达加斯加经印度分布到云南的干热河谷,它的这种分布式样与印度板块从马达加斯加分离,向北漂移,与亚洲大陆板块碰撞融合,将原来非洲的植物区系成分筏运到亚洲的说法相符^[42, 43]。西南干热河谷萨王纳植被的另一特征植物牛角瓜,该植物也主要分布在非洲稀树草原植被中,它的存在也可为西南干热河谷萨王纳植被与非洲的稀树草原的联系提供线索。金合欢属植物广泛分布在泛热带的干旱地区,是世界稀树草原的主要树种。在元江、金沙江干热河谷萨王纳植被中很有代表性,它与仙人掌一样,有些文献认为它原产热带美洲,但在西南干热河谷中广泛存在,它的来源也是一个值得探讨的问题,因在种子植物分

布区类型的研究中,已有越来越多的中国西南-热带美洲分布属种被报道。

希陶木属(*Tsaiodendron*)是元江干热河谷的特有属,分子系统学研究揭示该属植物形成的时间与哀牢山的隆升、红河河谷深切、干热气候随之形成的时间吻合,该属起源于晚中新世,起源时间约 10.42 Mya^[13]。金沙江干热河谷具有特有种单属菊科乔木栌菊木,栌菊木属是菊科系统发育的基部类群,这个特有属与最近缘的白菊木属(*Leucomeris*)的分化时间在 6.225-2.796 Mya,而栌菊木属的起源时间推测是在 17-3 Mya^[14],特有种单属栌菊木在金沙江河谷的存在暗示了该河谷的古老性。更为特别的是特有种单属丁茜属(*Trilliaedoxa*),它间断分布在金沙江和元江干热河谷,提示在地质历史上发生了河流袭夺,支持了金沙江曾向南流入元江,随着喜马拉雅的快速隆升,金沙江发生了河流袭夺,与元江分离,转北再转东形成长江的假设^[12]。地涌金莲属(*Musella*)为金沙江干热河谷的特有属,对它的谱系地理学研究揭示了其起源和演化与喜马拉雅隆升和金沙江河流袭夺密切相关^[44]。使君子科的滇榄仁也是一个典型的例子,分布格局和谱系地理学显示了它与喜马拉雅的快速隆升和金沙江河流袭夺密切相关^[45, 46]。最近发表的伞形科柴胡属龙血树柴胡(*Bupleurum dracaenoides* Huan C. Wang, Z. R. He & H. Sun)是分布在金沙江干热河谷悬崖峭壁上的特殊的像龙血树一样的木本植物,该种植物显然是在金沙江干热河谷中演化形成^[47]。西南干热河谷中有较多的局域特有种或间断分布在各河谷中的属和种,已有的分子生物地理学研究揭示,西南的这些深切河谷和“焚风”效应形成了干热性气候,以及地质事件,如河流袭夺等,影响了它们的起源与演化。

另外,在元江干热河谷中,发现的特有种最多,这与元江被认为是中国西南最古老的河谷^[12]有关系。元江干热河谷特有的希陶木属的分化形成时间较金沙江干热河谷特有的栌菊木属的分化形成时间更早,这点也支持元江河谷可能是中国西南最古老的河谷。

地质历史和对萨王纳植被的一些代表性物种的研究均揭示了西南的干热河谷存在了几百万至千万年,西南干热河谷中的萨王纳植被无疑是一

类古老的原生性植被，并非人为破坏后形成的次生植被。

我们对西南干热河谷萨王纳植被的植物区系地理学研究发现，尽管金沙江干热河谷与怒江干热河谷位于相近的纬度带，它们都具有在生态上类似的萨王纳植被和干热性气候，但金沙江干热河谷热带分布属占总属数的47.27%，温带分布属占到44.96%，并且北温带分布属占了总属数的18.23%；而怒江干热河谷热带分布属占74.49%，其中热带亚洲分布属占到了17.38%，与金沙江干热河谷差异明显^[1]。这个情况在地质历史上可以获得解释：河流袭夺后的金沙江基本的东西走向，在一定程度上阻隔了热带成分的后期迁入，并随着喜马拉雅的抬升，温带成分在其植物区系演化中获得发展；怒江地区可能曾经位于较现在低的纬度，怒江干热河谷植物区系中热带成分占绝对优势，这与印度板块向北推挤，缅甸北部随之发生了北移（北移了约1 000 km）相关^[41]。这几大河流的萨王纳植被的植物区系的分异，显然与第三纪以来这些地区发生的地质事件密切相关。

上述这些研究，一方面揭示了西南的干热河谷是在地质演化过程中形成，其干热的气候已存在了至少上百万年。这些深切河谷是在喜马拉雅隆升过程中形成的，在河谷底部因“焚风”效应形成了干热的气候环境，在这样的生境中，萨王纳植被自然形成。也就是说，地形地貌（深切河谷）决定了气候（干热气候），气候决定了植被类型（河谷型稀树草原）。因此，西南干热河谷的萨王纳植被是一种古老的原生性质的植被，而地质历史原因，又使得它们在这些彼此隔离的河谷中在演化上植物区系发生了明显分异。

6 讨论和建议

中国西南干热河谷的萨王纳植被在分布生境和生态外貌上符合世界热带萨王纳植被的定义，即为受季节性干旱而非寒冷强烈影响的地区的木本植物和草本植物共存的生态系统^[6]，它们与东南亚植被分类中的干旱灌木丛（Dry thickets）^[48]有一定相似性，具有基本的热带植物区系组成和具有长期适应干热生境的植物群落特征种和植物区系标识种，我们认为定义它们为热带萨王纳植被是适合的。地质历史研究和对萨王纳植被的一些

代表性物种的研究均揭示了西南的干热河谷存在了几百万至千万年，这些干热河谷中萨王纳植被是一类古老的原生性植被，在人为干扰较大的地区，它们表现为次生演替阶段的各种群落类型，在结构和外貌上与原始植被有差异。因干热河谷萨王纳植被的“稀树灌木草丛”状外观，不对它们进行深入研究，的确易让人理解为是原来森林植被破坏后形成的次生性植被。

近年来清洁能源光伏电在西南地区大力发展，在干热河谷萨王纳植被分布区域或分布生境，因太阳能充足及植被自身的稀树灌木草丛状特征，在林业上一般不被作为林地，故对光伏电场选址不构成制约因素，很多地方被考虑作为光伏电场选址的优越场所。另一方面，随着社会在生态保护上对植被恢复力度的加大，干热河谷地区也是优选的地方，有些地段进行了大规模的工程性植被修复（造林）。

从生态学和生物多样性保护的角度，我们有几个建议提出来需要考虑。

水分是干热河谷植被修复上的最大制约因素。通过对非洲萨王纳植被的研究，年降水量（ 650 ± 134 ）mm被认为是一个门槛，在此条件之下，萨王纳植被能稳定存在，在此条件之上，可发展形成疏林和树冠郁闭的森林^[49]。任海等^[50]在“非洲稀树草原生态系统概况”中论述年降水量为250~750 mm，天然植被为稀树草原即萨王纳植被，如果降水量大于750 mm，可发展成林地。

金沙江干热河谷地区的工程性植被修复特别突出。金沙江干热河谷地区年降水量600（云南元谋）~900 mm，年蒸发量为年降水量的3~6倍。在这样的水分条件下，在理论上，在金沙江的干流和一、二级支流的面山干热河谷坡地，现存的未经人为干扰的稀树草原植被，已是处在水分制约下的顶级植被了，如果没有持续的补水措施，要靠降水，在这些地区规模化种树，风险是很大的，因这些地方的水分条件是养不起森林的。

另外，未受干扰的原始萨王纳植被，草本植物的覆盖度达80%以上，这些草本植物的根系很发达，具有好的水土保持功能，如果翻动了地表，很容易造成水土流失。研究发现，在裸地上一次降水量仅4.4 mm，就会发生水土流失，而在保存较好的稀树草原（萨王纳植被），一次降水量在

191 mm 时, 才会发生水土流失^[51]。因此, 在干热河谷, 特别是坡地, 如果破坏了草本层去进行造林, 会导致水土流失。

关于西南干热河谷地区大量发展清洁能源光伏电, 因萨王纳植被呈稀树灌木草丛外观, 一般不被作为林地, 对光伏电场选址不构成制约因素, 这对保护这些古老、原生性的萨王纳植被, 有大的威胁。我们建议, 对具有乔木、灌木和草本 3 层结构, 草本层盖度达 80% 以上的原生性群落, 不应作为光伏电场选址, 因气候条件的制约, 也没有必要进行造林性植被恢复。

7 结论

中国西南干热河谷的萨王纳植被分布在元江、怒江、金沙江和澜沧江的部分深切河谷, 这些深切河谷在底部因“焚风”效应, 形成了干热的气候环境, 在这样的生境中, 萨王纳植被自然演化形成。在植物区系组成上, 它们显示了与印度的萨王纳植被有亲缘关系, 与非洲的萨王纳植被也有许多联系。西南的深切河谷是在地质演化过程中形成的, 其干热河谷气候有证据证明已有上百万年至千万年的历史, 决定了干热河谷的萨王纳植被是一种古老的原生性质的植被。自第三纪以来, 伴随着喜马拉雅的隆升, 在云南发生的地质事件及河流袭夺等, 影响了干热河谷植物区系和植被的形成与演化。对于干热河谷萨王纳植被的生物地理研究支持了随喜马拉雅的快速隆升, 金沙江发生了河流袭夺, 并随着海拔抬升, 导致了在金沙江干热河谷中温带性质的植物地理成分在其植物区系后期演化中获得发展。怒江干热河谷尽管与金沙江有类似纬度, 但其植物区系中热带成分占绝对优势, 这与印度板块向北推挤亚洲板块, 缅甸北部随之发生了北移密切相关。同时, 对西南干热河谷萨王纳植被的植物地理研究在一定程度上支持了通过印度板块, 中国西南的干热河谷植物区系与非洲植物区系具有一定的渊源。在生态上, 西南干热河谷地区的年蒸发量为年降水量的 3~6 倍, 萨王纳植被已是处在自然演化的顶级(稳定)阶段的植被, 在这些地区规模化植树, 风险较大。由于萨王纳植被呈稀树灌木草丛外观, 对光伏电场选址不占林地不构成制约因素, 对萨王纳植被合理的保护应给予关注。

参考文献:

- [1] Zhu H, Tan YH, Yan LC, Liu FY. Flora of the savanna-like vegetation in hot dry valleys, southwestern China with implications to their origin and evolution[J]. *Bot Rev*, 2020, 86 (1-2): 281-297.
- [2] 金振洲. 云南热带、亚热带山地灌草丛植被特点及利用途径[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1986, 10 (2): 81-89. Jin ZZ. The characteristics and utilization of shrub-grasslands in tropical and subtropical mountains of Yunnan[J]. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica*, 1986, 10 (2): 81-89.
- [3] 吴征镒. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1024.
- [4] 金振洲, 欧晓昆. 干热河谷植被: 元江、怒江、金沙江、澜沧江[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2000: 302.
- [5] Jain AK. When did India-Asia collide and make the Himalaya?[J]. *Curr Sci*, 2014, 106 (2): 254-266.
- [6] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH, Schärer U, Zhong DL, et al. The Ailao Shan-Red River metamorphic belt: tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 1990, 343 (6257): 431-437.
- [7] Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH, Zhong D, et al. Intraplate tectonics in Asia: a precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 97 (1-2): 65-77.
- [8] Leloup PH, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong DL, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251 (1-4): 3-10.
- [9] Sato K, Liu YY, Wang YB, Yokoyama M, Yoshioka S, et al. Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from Pu'er, western Yunnan, China, Evidence of internal deformation of the Indochina block[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 258 (1-2): 1-15.
- [10] Sato K, Liu YY, Zhu ZC, Yang ZY, Otofujii YI. Tertiary paleomagnetic data from northwestern Yunnan, China: further evidence for large clockwise rotation of the Indochina block and its tectonic implications[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 185 (1-2): 185-198.
- [11] Chen HH, Dobson J, Heller F, Jie H. Paleomagnetic evidence for clockwise rotation of the Simao region since the Cretaceous: a consequence of India-Asia collision[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 134 (1-2): 203-217.
- [12] Clark MK, Schoenbohm LM, Royden LH, Whipple KX, Burchfiel BC, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns[J]. *Tectonics*, 2004, 23 (1): TC1006.
- [13] Zhou Z, Gu BJ, Sun H, Zhu H, Tan YH. Molecular phyloge-

- netic analyses of Euphorbiaceae tribe Epiptineae, with the description of a new genus, *Tsaiodendron* gen. nov., from south-western China[J]. *Bot J Linn Soc*, 2017, 184 (2): 167-184.
- [14] Zhang CF, Huang CH, Liu M, Hu Y, Panero JL, et al. Phylotranscriptomic insights into Asteraceae diversity, polyploidy, and morphological innovation[J]. *J Integr Plant Biol*, 2021, 63 (7): 1273-1293.
- [15] Cao SY, Liu JL, Leiss B, Neubauer F, Genser J, et al. Oligo-Miocene shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: constraints from structural analysis and zircon U/Pb geochronology of magmatic rocks in the Diancang Shan massif, SE Tibet, China[J]. *Gondwana Res*, 2011, 19 (4): 975-993.
- [16] 朱华. 地质事件和季风气候影响了云南植物区系和植被的演化[J]. *生物多样性*, 2023, 31 (12): 23262.
Zhu H. Flora and vegetation of Yunnan are shaped by geological events and monsoon climate[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31 (12): 23262.
- [17] Scholes RJ, Archer SR. Tree-grass interactions in savannas[J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1997, 28: 517-544.
- [18] 龚子同, 陈志诚, 骆国保, 张甘霖, 赵文君. 中国土壤系统分类参比[J]. *土壤*, 1999, 31 (2): 57-63.
- [19] 金振洲. 滇川干热河谷种子植物区系成分研究[J]. *广西植物*, 1999, 19 (1): 1-14.
Jin ZZ. The floristic study on seed plants in the dry-hot valleys in Yunnan and Sichuan[J]. *Guihaia*, 1999, 19 (1): 1-14.
- [20] 金振洲. 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究[J]. *广西植物*, 1999, 19 (4): 289-302.
Jin ZZ. A phytosociological study on the semi-savanna vegetation in the dry-hot valleys of Yuanjiang River, Yunnan[J]. *Guihaia*, 1999, 19 (4): 289-302.
- [21] 金振洲. 滇川干热河谷与干暖河谷植物区系特征[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002: 226.
- [22] 欧晓昆. 元谋干热河谷植物区系研究[J]. *云南植物研究*, 1988, 10 (1): 11-18.
Ou XK. The study of flora in Yuanmou dry-hot river valley[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1988, 10 (1): 11-18.
- [23] 曹敏, 金振洲. 云南巧家金沙江干热河谷的植被分类[J]. *云南植物研究*, 1989, 11 (3): 324-336.
Cao M, Jin ZZ. Classification of vegetation in Qiaojia dry-hot river valley of Jinsha river, Yunnan[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1989, 11 (3): 324-336.
- [24] 曹永恒. 云南澜江坝怒江干热河谷植物区系研究[J]. *云南植物研究*, 1993, 15 (4): 339-345.
Cao YH. A research on the flora of Nujiang dry-hot valley in Lujiangba of Yunnan[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1993, 15 (4): 339-345.
- [25] 曹永恒, 金振洲. 云南澜江坝怒江干热河谷植被研究[J]. *广西植物*, 1993, 13 (2): 132-138.
Cao YH, Jin ZZ. A research on the vegetation of Nujiang dry-hot river valley in Lujiangba of Yunnan[J]. *Guihaia*, 1993, 13 (2): 132-138.
- [26] 沈泽昊. 中国西南干旱河谷的植物多样性: 区系和群落结构的分异与成因[J]. *生物多样性*, 2016, 24 (4): 363-366.
Shen ZH. Plant diversity in the dry valleys of Southwest China: spatial deviation and determinants for flora and plant communities[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24 (4): 363-366.
- [27] 沈泽昊, 张志明, 胡金明, 韩杰, 杨济达, 等. 西南干旱河谷植物多样性资源的保护与利用[J]. *生物多样性*, 2016, 24 (4): 475-488.
Shen ZH, Zhang ZM, Hu JM, Han J, Yang JD, et al. Protection and utilization of plant biodiversity resources in dry valleys of Southwest China[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24 (4): 475-488.
- [28] 刘晔, 朱鑫鑫, 沈泽昊, 孙航. 中国西南干旱河谷植被的区系地理成分与空间分异[J]. *生物多样性*, 2016, 24 (4): 367-377.
Liu Y, Zhu XX, Shen ZH, Sun H. Flora compositions and spatial differentiations of vegetation in dry valleys of Southwest China[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24 (4): 367-377.
- [29] 杨济达, 张志明, 沈泽昊, 欧晓昆, 耿宇鹏, 等. 云南干热河谷植被与环境研究进展[J]. *生物多样性*, 2016, 24 (4): 462-474.
Yang JD, Zhang ZM, Shen ZH, Ou XK, Geng YP, et al. Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24 (4): 462-474.
- [30] 李云琴, 杜凡, 汪健. 金沙江上游干旱河谷维管植物区系特征[J]. *西部林业科学*, 2019, 48 (1): 93-99, 138.
Li YQ, Du F, Wang J. Floristic characteristics of vascular plants in dry valleys of the upstream of Jinsha River[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, 48 (1): 93-99, 138.
- [31] 李云琴, 杜凡, 汪健, 李瑞年, 刘洋. 金沙江上游干旱河谷植被[J]. *生物多样性*, 2016, 24 (4): 489-494.
Li YQ, Du F, Wang J, Li RN, Liu Y. Desert vegetation in dry valleys of the upstream of Jinsha River[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24 (4): 489-494.
- [32] Loidi J, Herrera M, Olano JM, Silván F. Maquis vegetation in the eastern Cantabrian coastal fringe[J]. *J Veg Sci*, 1994, 5 (4): 533-540.
- [33] 朱华, 杜凡. 设立云南金沙江干热河谷萨王纳植被自然保护地的建议[J]. *生物多样性*, 2022, 30 (3): 21519,

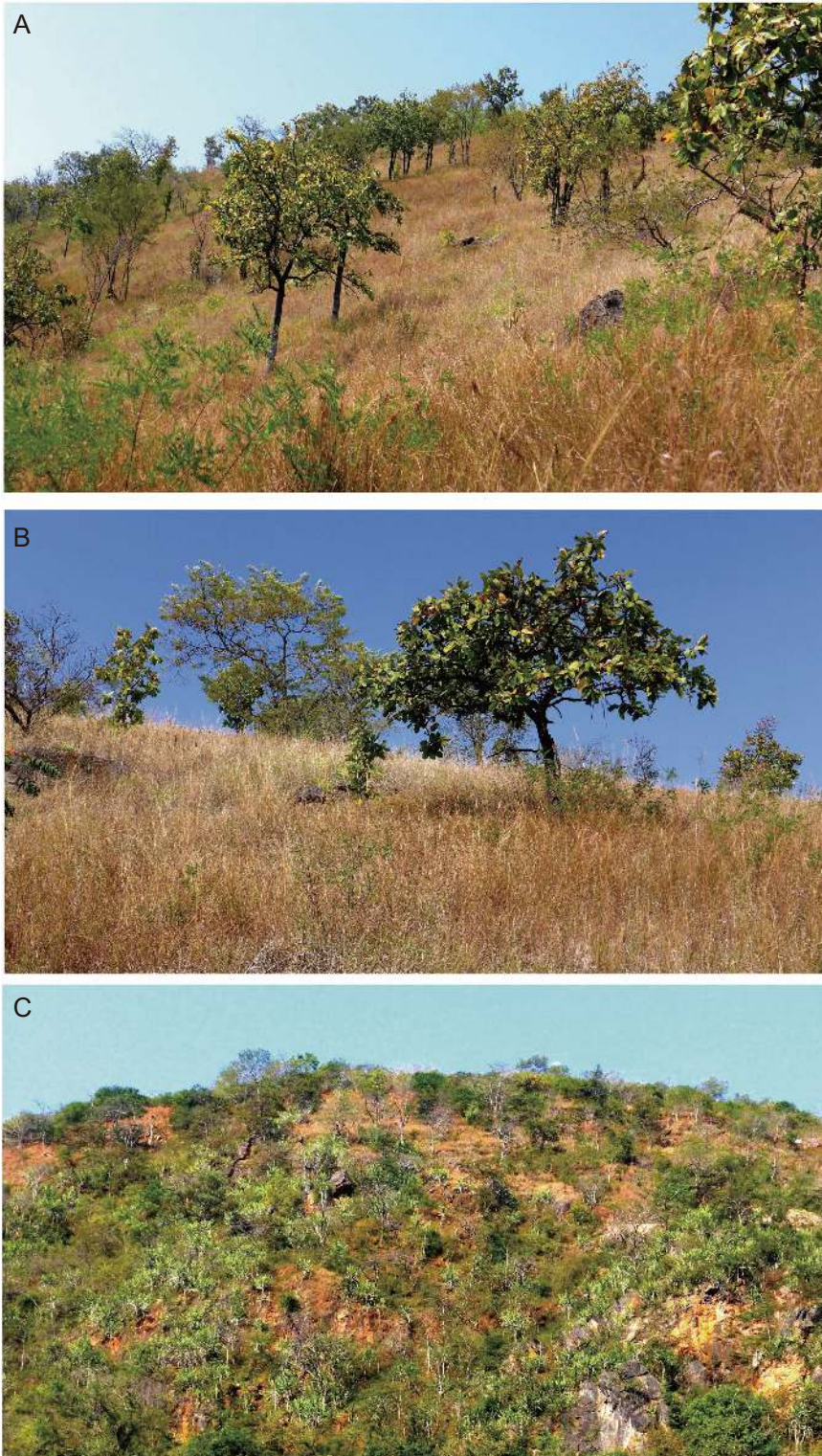
- Zhu H, Du F. Suggestion to establish a nature reserve for protecting native savanna vegetation in hot dry valley of Jinshajiang, Yunnan[J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30 (3): 215-19.
- [34] Zhu H, Ashton P, Gu BJ, Zhou SS, Tan YH. Tropical deciduous forest in Yunnan, southwestern China: implications for geological and climatic histories from a little-known forest formation[J]. *Plant Diversity*, 2021, 43 (6): 444-451.
- [35] 朱华. 元江干热河谷肉质多刺灌丛的研究 [J]. 云南植物研究, 1990, 12 (3): 301-310.
- Zhu H. A study on the thorny succulent shrubs in dry-hot valley of Yuanjiang County[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1990, 12 (3): 301-310.
- [36] 朱华. 云南的硬叶常绿阔叶林——古地中海残余植被 [J]. 广西植物, 2023, 43 (2): 234-241.
- Zhu H. Sclerophyllous evergreen broad-leaved forest in Yunnan: a remnant vegetation related to Tethys[J]. *Guihaia*, 2023, 43 (2): 234-241.
- [37] 刘方炎, 朱华, 施济普, 陈晓鸣. 元江干热河谷植物群落特征及土壤肥力研究 [J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13 (6): 782-787.
- Liu FY, Zhu H, Shi JP, Chen XM. Characteristics of plant communities and their soil fertilities in dry-hot valley of Yuanjiang County, Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2007, 13 (6): 782-787.
- [38] 顾伯键. 云南绿汁江下游与元江干热河谷普漂段季雨林与萨王纳植被的群落学研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015: 1-10.
- [39] 金振洲, 杨永平, 陶国达. 华西南干热河谷种子植物区系的特征、性质和起源 [J]. 云南植物研究, 1995, 17 (2): 129-143.
- Jin ZZ, Yang YP, Tao GD. The floristic characteristics, nature and origin of seed plants in the dry-hot river valley of SW China[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1995, 17 (2): 129-143.
- [40] Hall R. The plate tectonics of Cenozoic SE Asia and the distribution of land and sea[M]//Hall R, Holloway JD, eds. Biogeography and Geological Evolution of SE Asia. Leiden: Backhuys Publishers, 1998: 99-131.
- [41] Mitchell AHG. Cretaceous-Cenozoic tectonic events in the western Myanmar (Burma) -Assam region[J]. *J Geol Soc, London*, 1993, 150 (6): 1089-1102.
- [42] Morley RJ. Assembly and division of the South and South-East Asian flora in relation to tectonics and climate change[J]. *J Trop Ecol*, 2018, 34 (4): 209-234.
- [43] Bansal M, Morley RJ, Nagaraju SK, Dutta S, Mishra AK, et al. Southeast Asian Dipterocarp origin and diversification driven by Africa-India floristic interchange[J]. *Science*, 2022, 375 (6579): 455-460.
- [44] Ma H, Wang DS, Li TQ, Li ZH. Phylogeographic study of *Musella lasiocarpa* (Musaceae): providing insight into the historical river capture events[J]. *Pak J Bot*, 2019, 51 (1): 191-199.
- [45] Zhang TC, Sun H. Phylogeographic structure of *Terminalia franchetii* (Combretaceae) in southwest China and its implications for drainage geological history[J]. *J Plant Res*, 2011, 124 (1): 63-73.
- [46] Zhang TC, Comes HP, Sun H. Chloroplast phylogeography of *Terminalia franchetii* (Combretaceae) from the eastern Sino-Himalayan region and its correlation with historical river capture events[J]. *Mol Phylogenet Evol*, 2011, 60 (1): 1-12.
- [47] Wang HC, He ZR, Wang YH, Sun H. *Bupleurum draecaenoides* (Subgenus *Bupleurum*, Apiaceae): a new shrubby species from Southwestern China[J]. *Syst Bot*, 2013, 38 (4): 1188-1195.
- [48] Blasco F, Bellan MF, Aizpuru M. A vegetation map of tropical continental Asia at scale 1: 5 million[J]. *J Veg Sci*, 1996, 7 (5): 623-634.
- [49] Sankaran M, Hanan NP, Scholes RJ, Ratnam J, Augustine DJ, et al. Determinants of woody cover in African savannas[J]. *Nature*, 2005, 438 (7069): 846-849.
- [50] 任海, Daane J, 彭少麟. 非洲稀树草原生态系统概况 [J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10 (4): 381-390.
- Ren H, Daane J, Peng SL. Ecosystem of savanna in Africa[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, 10 (4): 381-390.
- [51] Mivoria JK. Resilience of soils and vegetation in veld[J]. *Afr J Range Forest Sci*, 1997, 14: 26-31.

朱 华等：图版 I

Zhu Hua *et al.*: Plate I

金沙江干热河谷萨王纳植被。A: 萨王纳植被远景；B: 萨王纳植被近景；C: 含木棉的萨王纳植被；D: 余干子-扭黄茅群落；E: 疏序黄荆-扭黄茅群落。

Savanna-like vegetation in dry, hot valleys of Jinshajiang. A: Distant view of savanna; B: Close view of savanna; C: Savanna characterized by *Bombax ceiba* L.; D: *Phyllanthus emblica* L.-*Heteropogon contortus* (L.) P. Beauv. ex Roem. & Schult. community; E: *Vitis negundo* f. *laxipaniculata* C. P'ei-*Heteropogon contortus* (L.) P. Beauv. ex Roem. & Schult. community.



元江干热河谷萨王纳植被。A: 萨王纳植被外貌；B: 豆腐果-扭黄茅群落；C: 霸王鞭刺灌丛。

Savanna-like vegetation in dry, hot valleys of Yuanjiang. A: Physiognomy of savanna; B: *Buchanania latifolia* Roxb.-*Heteropogon contortus* (L.) P. Beauv. ex Roem. & Schult. community; C: Succulent and thorny shrub dominated by *Euphorbia royleana* Boiss.