

DOI: 10.11686/cyxb2025107

http://cyxb.magtech.com.cn

刘娜, 吴明玥, 纪旭, 等. 塔里木河流域牧草植物分布格局与养分分析. 草业学报, 2026, 35(3): 26—42.

LIU Na, WU Ming-yue, JI Xu, *et al.* Analysis of the distribution pattern and nutrition profiles of forage plants in the Tarim River Basin. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(3): 26—42.

塔里木河流域牧草植物分布格局与养分分析

刘娜¹, 吴明玥¹, 纪旭¹, 胡舒萍¹, 张芙宁¹, 贾昕^{1,2,3*}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 3. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083)

摘要:以塔里木河流域的牧草植物为研究对象,旨在掌握该流域牧草植物资源的分布格局及其影响因子,为牧草资源的科、属、种层次开发利用提供理论支撑,同时基于将营养成分相似性的牧草划分整理,为塔里木河流域潜在高营养价值牧草品种的筛选与替代提供了理论依据。通过整合历史文献、野外调查及在线平台数据,更新了塔里木河流域牧草植物名录并分析了其科属种的组成及分布格局;利用冗余分析(RDA)探讨了人为、气候和土壤因子对不同牧草类群和生活型植物分布的影响;基于主成分分析(PCA)对营养价值相似的牧草植物进行了聚类分析。结果表明:1)塔里木河流域牧草植物共计41科153属269种,呈沿塔里木盆地边缘分布的特点,主要集中于北部和静县、西部乌恰县、西南部叶城县、和田县、东部若羌县及中部阿克苏市;2)年均温(MAT)与地方生产总值(GDP)是影响牧草类群区域分布的主要因子,贡献率达66.8%,年均温是影响牧草植物不同生活型区域分布差异的主要因子,其贡献率达62.2%,pH、速效钾(AK)为次要因子,贡献率分别为13.1%和10.8%,土壤有机质(SOM)仅对牧草类群植物分布有影响;3)牧草植物间的养分相似性独立于其系统发育关系及牧草等级划分。

关键词:塔里木河流域;牧草植物;分布格局;环境因子;养分聚类

Analysis of the distribution pattern and nutrition profiles of forage plants in the Tarim River Basin

LIU Na¹, WU Ming-yue¹, JI Xu¹, HU Shu-ping¹, ZHANG Fu-ning¹, JIA Xin^{1,2,3*}

1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Ningxia Yanchi Mu Us Sandy Land Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Beijing 100083, China; 3. National Key Laboratory for Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The aim of this study was to determine the distribution of forage plant resources in the Tarim River Basin and the factors influencing the distribution. The overall aim of our study was to provide theoretical support for the development and utilization of forage resources at family, genus, and species levels. In addition, based on the grouping of forage plants with similar nutrition profiles, we aimed to identify forage species with potentially high nutrition value in the Tarim River Basin and suggest possible substitutes. By integrating information from historical literature, field surveys, and online databases, we updated the forage plant list for the Tarim River Basin and analyzed the composition and distribution patterns of plant families, genera, and species. We also explored the influence of anthropogenic, climatic, and soil factors on the distribution of different pasture taxa and growth-type plants using redundancy analysis, and carried out a clustering analysis based on principal component analysis to

收稿日期: 2025-03-26; 改回日期: 2025-06-09

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0201)资助。

作者简介: 刘娜(2000—), 女, 内蒙古赤峰人, 在读硕士。E-mail: 2795842977@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xinjia@bjfu.edu.cn

identify groups of pasture plants with similar nutritive value. The main results were as follows: 1) The forage plants in the Tarim River Basin totaled 269 species in 153 genera and 41 families. These plants were mostly distributed along the edge of the Tarim Basin, and were mainly concentrated in Hejing County in the north, Wuqia County in the west, Yecheng County and Hotan County in the southwest, Ruoqiang County in the east, and Aksu City in the central part. 2) The mean annual air temperature and local gross domestic product were the main factors influencing the regional distribution of forage taxa, with a combined contribution of 66.8%. Mean annual temperature was the primary factor influencing the regional distribution of different growth types of forage plants, with a contribution of 62.2%, and acidity and alkalinity (pH) and available potassium were the factors of secondary importance, with contributions of 13.1% and 10.8%, respectively. Soil organic matter only affected the distribution of forage taxa. 3) In terms of nutrition status, similarities among forage plants were independent of their phylogenetic relationships and forage class groupings.

Key words: Tarim River Basin; forage plants; distribution patterns; environmental factors; nutrient clustering

野生牧草资源是生物资源的重要组成部分,因其含有丰富的基因源可作为天然的牧草基因库,对牧草的新品种选育、改良以及保护具有重要的意义^[1],同时,牧草具有抗寒、抗旱、耐盐^[2-4]等优点,由此可见,优质牧草不仅是我国畜牧业发展的基石,也是国家粮食安全的重要保障^[5]。在全球范围内,牧草资源的保护与开发利用已成为生态学和农业科学的研究热点。然而,针对干旱区内陆河流域牧草资源的研究仍较为匮乏。

塔里木河流域是我国干旱区典型的内陆河流域,生态环境独特且脆弱。在长期极端干旱、高温及土壤盐渍化等胁迫条件下,该流域形成了独特的植物科属组成与分布格局。然而,目前塔里木河流域牧草植物组成名录更新不及时,且大部分研究聚焦于种质资源、育种^[6-9]以及提高牧草产量和消化率^[10-12],对塔里木河流域牧草植物分布格局掌握有限,此外,目前对于植物分布格局的影响因子研究重点大多集中于其他功能群且多以群落为单元,例如以药用植物^[13]、珍稀濒危植物^[14]、半红树植物群落^[15]为例分析气候、土壤及地形因子对其分布的影响,尽管芦娟^[16]探究了甘肃祁连山区牧草资源构成与土壤生境的关系,但对于牧草植物分布研究依旧较少,同时以群落为单元的分析中会将所有功能群混在一起,综上,在整理更新塔里木河流域牧草植物名录的基础上探究群落单元下的不同功能群之间牧草植物分布格局的影响因子尤为重要。

此外,掌握牧草营养成分与饲用等级是筛选优良牧草的必要前提,牧草的养分含量与饲用等级直接决定了其对草食动物的营养价值与适口性^[17]。如今牧草品质的研究多聚焦于某种或某科牧草,例如刘金平等^[18]对比研究了青海高寒地区 6 种禾本科牧草的营养价值,刘定鑫等^[19]评价了宁夏干旱区的 7 种禾本科牧草的营养价值,张军等^[20]对内蒙古鄂温克草原禾本科牧草营养价值进行了综合评价,候伟峰等^[21]对内蒙古兴安盟 8 种豆科牧草营养成分进行了比较,彭艳等^[22]对西藏 12 种豆科牧草性状进行了综合对比,张凡凡等^[23]对新疆沙尔套山的主要豆科牧草进行了综合评价,而塔里木河流域牧草植物营养成分的整体评价存在研究空白,因该流域生态环境特殊,仅考虑禾本科或豆科牧草可能会造成养分参考片面进而妨碍筛选优良牧草等方面的工作重点。

综上,本研究以塔里木河流域为例,试探究以下科学问题:1)在掌握塔里木河流域牧草植物资源组成的基础上探究不同分类单元下影响植物分布格局变化的人为、气候及土壤因子;2)综合评价塔里木河流域牧草品质并划分营养价值相似的牧草。通过对以上问题的讨论分析,不仅系统阐明了塔里木河流域牧草植物的空间分布特征,同时实现了对营养价值相似的牧草植物的科学筛选。这一研究成果为后续深入开展塔里木河流域特定科、属、种层次的牧草资源开发利用提供了重要的理论支撑,对促进该流域牧草植物资源的系统开发与可持续利用具有重要的科学意义和实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域位于我国新疆南部(73°10'—94°05' E, 34°55'—43°08' N)(图 1),地处天山南麓、昆仑山北麓

以及帕米尔高原和阿尔金山之间,是我国最大的内陆河流域,流域面积约 $103.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[24],该流域属于暖温带大陆性干旱气候,年平均降水量为 50~100 mm,而年蒸发量却高达 2000~3000 mm。冬季寒冷,夏季炎热,极端最高气温可达 40℃以上,极端最低气温能低至 -20℃以下。在行政区上包含巴音郭勒蒙古族自治州、阿克苏地区、克尔柯孜族自治州、喀什、和田 5 个地区^[25]。主要土壤类型为盐化草甸土、胡杨林土、盐土、绿洲潮土、风沙土和沼泽土等。植被类型属暖温带稀疏灌木、半灌木荒漠地带,主要建群种有胡杨(*Populus euphratica*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、花花柴(*Karelinia caspia*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、骆驼刺(*Alhagi camelorum*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、芦苇(*Phragmites australis*)等^[26]。

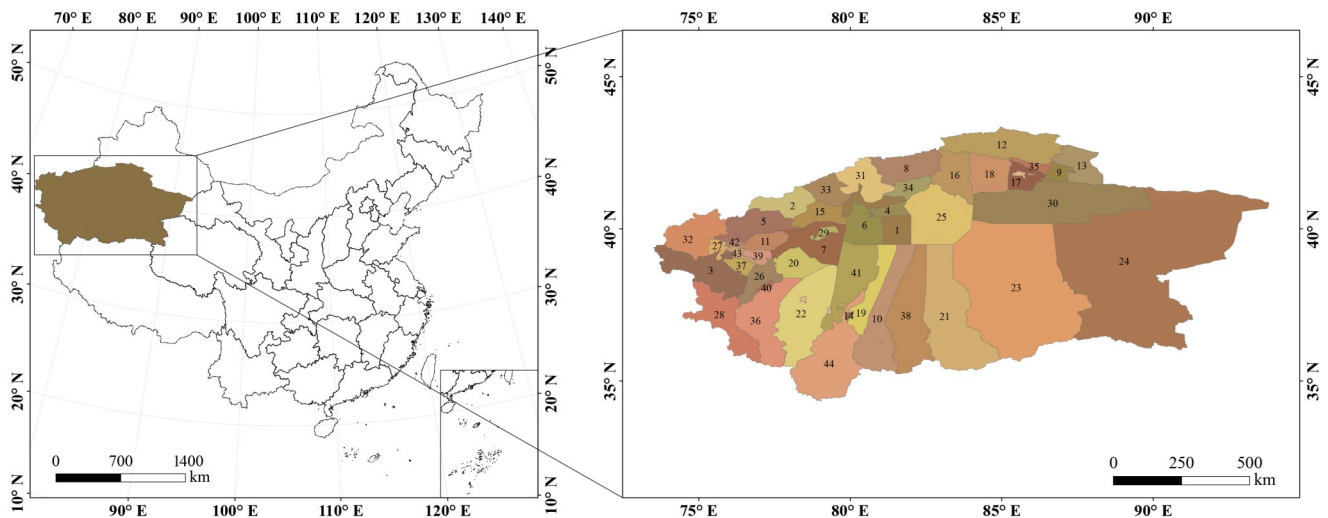


图 1 塔里木河流域县域行政区划概况

Fig. 1 Overview of county-level administrative divisions in the Tarim River Basin

1: 阿克苏市 Aksu City; 2: 阿合奇县 Akqi County; 3: 阿克陶县 Akto County; 4: 阿拉尔市 Alar City; 5: 阿图什市 Artux City; 6: 阿瓦提县 Awat County; 7: 巴楚县 Bachu County; 8: 拜城县 Bai County; 9: 博湖县 Bohu County; 10: 策勒县 Qira County; 11: 伽师县 Jiashi County; 12: 和静县 Hejing County; 13: 和硕县 Hoxud County; 14: 和田市 Hotan City; 15: 柯坪县 Keping County; 16: 库车市 Kucha City; 17: 库尔勒市 Korla City; 18: 轮台县 Luntai County; 19: 洛浦县 Lop County; 20: 麦盖提县 Makit County; 21: 民丰县 Minfeng County; 22: 皮山县 Pishan County; 23: 且末县 Qiemo County; 24: 若羌县 Ruoqiang County; 25: 沙雅县 Shaya County; 26: 莎车县 Yarkant County; 27: 疏附县 Shufu County; 28: 塔什库尔干塔吉克自治县 Tashkurgan Tajik Autonomous County; 29: 图木舒克市 Tumushuke City; 30: 尉犁县 Yuli County; 31: 温宿县 Wensu County; 32: 乌恰县 Wuqia County; 33: 乌什县 Uqturpan County; 34: 新和县 Xinhe County; 35: 焉耆回族自治县 Yanqi Hui Autonomous County; 36: 叶城县 Yecheng County; 37: 英吉沙县 Yingjisha County; 38: 于田县 Yutian County; 39: 岳普湖县 Yopurga County; 40: 泽普县 Zepu County; 41: 墨玉县 Moyu County; 42: 喀什市 Kashgar City; 43: 疏勒县 Shule County; 44: 和田县 Hotan County. 下同 The same below. 基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2023)2762 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2023) 2762 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

1.2 数据来源

经查阅《中国荒漠植物图鉴》^[27]、《中国饲用植物》^[28]、《中国草地饲用植物资源》^[29]等书籍专著以及通过野外实地采集调查,通过植物智(iPlant 植物智——植物物种信息系统)等在线平台筛选出分布于塔里木河流域且具有饲用价值的植物资源并根据 APG IV 分类系统将植物科、属、生活型、生境、分布、海拔范围、牧草等级等基本信息整理汇总为《塔里木河流域牧草植物名录》并按照其县域分布整理出《塔里木河流域牧草类群及生活型物种数》数据集。

环境因子共计 13 个,分为人为因子(人口、地方生产总值)、气候因子(年均温、年降水、日照)、土壤因子(土壤有机质、pH、全钾、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾),其中人为因子来自中国统计数据库中 2001—2022 年中国统计年鉴^[30]下载获取,2003—2022 年年均温、年降水以及土壤因子均通过国家青藏高原数据中心(<https://data.>

tpdc. ac. cn/) 下载获取,日照数据是通过国家气象信息中心(国家气象信息中心—中国气象数据网)的 2001—2020 年中国地面气候资料日值数据集下载获取,所获取的近 20 年因子数据都进一步做均值处理整合为《塔里木河流域各县近 20 年环境因子数据》数据集。

塔里木河流域牧草养分(粗蛋白、无氮浸出物、粗纤维、粗脂肪、粗灰分)及牧草等级(优、良、中、低、劣)主要通过 CNKI[中国知网(cnki. net)]及 Web of science [Document Search-All Databases (clarivate. cn)]检索相关文献获取以及通过智汇“三农”[智汇“三农”(pwsannong. com)]、植物通(植物通—植物数据库—zhiwutong)等在线网站查找获取并整理《塔里木河流域牧草养分》数据集。

1.3 数据处理

1.3.1 塔里木河流域牧草植物组成分析 按照各科所含物种数按单种科(1种)、小型科(2~4种)、中型科(5~9种)、大型科(≥ 10 种)^[31],各属按单种属(1种)、小型属(2~4种)、中型属(5~9种)、大型属(≥ 10 种)统计名录中牧草植物的科、属、种数以及乔木、灌木、草本及藤本植物的物种数并计算其所占比例,整理并分析该流域牧草植物科属组成以及物种数占比情况。

1.3.2 塔里木河流域牧草植物分布格局及驱动因素 塔里木河流域总共覆盖 10 个市及 36 个县,由于昆玉市与铁门关市涉及兵团划分等特殊问题,本研究仅针对其余 44 个市、县域。由于该流域生态环境的特殊性,灌木植物也占据重要地位,故对牧草类群分布格局的分析中,也将灌木植物考虑在内。运用 ArcMap 10.8 软件将塔里木河流域行政区划矢量图与《塔里木河流域牧草类群及生活型物种数》数据集的分布地—列链接同步在属性中,通过添加指北针、比例尺、图例并美化后得到塔里木河流域牧草植物不同牧草类群及生活型分布图,进一步分析牧草类群及不同生活型牧草植物的分布格局。

将《塔里木河流域牧草类群及生活型物种数》数据集及《塔里木河流域各县近 20 年环境因子数据》整理合并后运用 Rstudio 中的“Hmisc”和“corrplot”包绘制生活型及牧草类群物种数与 13 个影响因子的相关性热图。因土壤有机质与全氮(total nitrogen, TN)之间存在较强的相关性($r=0.98$),可能导致多重共线性问题,为避免这一问题,本研究通过比较土壤有机质($P<0.05$)与全氮($P<0.05$)的显著性水平值选择土壤有机质作为代表性因子进行分析,进而使用 Rstudio 中“Vegan”包计算物种得分后采用“ggplot2”“ggpubr”“ggrepel”等包绘制并美化冗余分析(redundancy analysis, RDA)图,此外运用“rdacca. hp”包计算关键因子贡献百分比,同时采用“ggplot2”包呈现关键因子对塔里木河流域牧草类群及生活型物种分布的贡献百分比柱状图。

1.3.3 塔里木河流域牧草植物饲用价值划分 采用基于主成分分析(principal component analysis, PCA)^[31-33]的聚类方法,先运用 Rstudio 中的“prcomp”包对《塔里木河流域牧草养分》数据集中的粗蛋白、粗灰分、粗脂肪、粗纤维及无氮浸出物^[34-35]进行主成分分析,进而运用“cluster”包绘制牧草养分聚类树状图并使用“ggplot2”包绘制按科分类的养分主成分分析散点图以及根据《塔里木河流域牧草植物名录》数据集中牧草等级按照优、良、中、低、劣 5 个等级绘制牧草等级柱状图。

2 结果与分析

2.1 塔里木河流域牧草植物科属组成

塔里木河流域的牧草植物总计 41 科 153 属 269 种,主要由草本植物与灌木组成,其中草本植物与灌木物种数共计 258 种(96%),乔木与藤本仅 7 和 4 种,所占比例较小。该流域禾本科(62)、苋科(46)、菊科(32)、豆科(28)、蓼科(16)、蔷薇科(12)以及蒿属(11)、沙拐枣属(8)、羊茅属(8)等所含牧草植物物种数较多(表 1),在科的组成上,单种科(1种)、小型科(2~4种)占牧草植物总科数的 75%,但所包含的属仅占总属数的 15%,所包含种占总种数的 22%(表 2)。中型科(5~9种)、大型科(≥ 10 种)只有 10 科,占牧草植物总科数的 25%,但所包含的属却占总属数的 85%,所包含物种占总物种数的 78%,这表明塔里木河流域牧草植物的种类集中于少数科内。在属的组成上,单种属(1种)与小型属(2~4种)数量占总属数的 94%,所含种类占总物种数的 78%,因此单种属与小型属在塔里木河流域牧草植物组成中占有重要地位。

表 1 塔里木河流域牧草植物科属物种数

Table 1 List of the number of species in each family and genus

科名(科内物种数) Family name (Number of species in the family)	属名(属内物种数) Genus name (Number of species in the genus)
柏科 Cupressaceae (1)	刺柏属 <i>Juniperus</i> (1)
麻黄科 Ephedraceae (1)	麻黄属 <i>Ephedra</i> (1)
杨柳科 Salicaceae (3)	杨属 <i>Populus</i> (3)
榆科 Ulmaceae (1)	榆属 <i>Ulmus</i> (1)
荨麻科 Urticaceae (1)	荨麻属 <i>Urtica</i> (1)
蓼科 Polygonaceae (16)	木蓼属 <i>Atraphaxis</i> (3); 沙拐枣属 <i>Calligonum</i> (8); 蓼属 <i>Persicaria</i> (3); 拳参属 <i>Bistorta</i> (1); 酸模属 <i>Rumex</i> (1)
石竹科 Caryophyllaceae (1)	裸果木属 <i>Gymnocarpus</i> (1)
苋科 Amaranthaceae (46)	沙蓬属 <i>Agriophyllum</i> (1); 假木贼属 <i>Anabasis</i> (2); 滨藜属 <i>Atriplex</i> (4); 樟味藜属 <i>Camphorosma</i> (1); 角果藜属 <i>Ceratocarpus</i> (1); 藜属 <i>Chenopodium</i> (2); 红叶藜属 <i>Oxybasis</i> (1); 虫实属 <i>Corispermum</i> (1); 盐节木属 <i>Halocnemum</i> (1); 盐生草属 <i>Halogeton</i> (2); 盐穗木属 <i>Halostachys</i> (1); 梭梭属 <i>Haloxyylon</i> (2); 戈壁藜属 <i>Iliamna</i> (1); 盐爪爪属 <i>Kalidium</i> (5); 驼绒藜属 <i>Krascheninnikovia</i> (3); 盐角草属 <i>Salicornia</i> (2); 山猪毛菜属 <i>Oreosalsola</i> (2); 碱猪毛菜属 <i>Soda</i> (4); 猪毛菜属 <i>Salsola</i> (2); 合头藜属 <i>Sympegma</i> (1); 苋属 <i>Amaranthus</i> (1); 腺毛藜属 <i>Dysphania</i> (1); 麻叶藜属 <i>Chenopodium</i> (1); 沙冰藜属 <i>Bassia</i> (1); 雾冰藜属 <i>Grubovia</i> (1)
毛茛科 Ranunculaceae (4)	铁线莲属 <i>Clematis</i> (4)
山柑科 Capparaceae (1)	山柑属 <i>Capparis</i> (1)
十字花科 Brassicaceae (5)	独行菜属 <i>Lepidium</i> (2); 涩芥属 <i>Strigosella</i> (1); 念珠芥属 <i>Neotorularia</i> (1); 四齿芥属 <i>Tetracme</i> (1)
蔷薇科 Rosaceae (12)	委陵菜属 <i>Potentilla</i> (4); 毛莓草属 <i>Sibbaldia</i> (2); 金露梅属 <i>Dasiphora</i> (1); 蕨麻属 <i>Argentina</i> (1); 蔷薇属 <i>Rosa</i> (1); 悬钩子属 <i>Rubus</i> (1); 地榆属 <i>Sanguisorba</i> (1); 羽衣草属 <i>Alchemilla</i> (1)
豆科 Fabaceae (28)	骆驼刺属 <i>Alhagi</i> (1); 紫穗槐属 <i>Amorpha</i> (1); 黄芪属 <i>Astragalus</i> (3); 锦鸡儿属 <i>Caragana</i> (5); 甘草属 <i>Glycyrrhiza</i> (4); 百脉根属 <i>Lotus</i> (1); 苜蓿属 <i>Medicago</i> (3); 草木樨属 <i>Melilotus</i> (2); 棘豆属 <i>Oxytropis</i> (1); 车轴草属 <i>Trifolium</i> (4); 刺槐属 <i>Robinia</i> (1); 野豌豆属 <i>Vicia</i> (2)
牻牛儿苗科 Geraniaceae (2)	牻牛儿苗属 <i>Erodium</i> (1); 老鹳草属 <i>Geranium</i> (1)
蒺藜科 Zygophyllaceae (9)	白刺属 <i>Nitraria</i> (4); 骆驼蓬属 <i>Peganum</i> (3); 驼蹄瓣属 <i>Zygophyllum</i> (2)
远志科 Polygalaceae (1)	远志属 <i>Polygala</i> (1)
锦葵科 Malvaceae (2)	木槿属 <i>Hibiscus</i> (1); 锦葵属 <i>Malva</i> (1)
胡颓子科 Elaeagnaceae (2)	胡颓子属 <i>Elaeagnus</i> (1); 沙棘属 <i>Hippophae</i> (1)
怪柳科 Tamaricaceae (8)	红砂属 <i>Reaumuria</i> (2); 怪柳属 <i>Tamarix</i> (5); 水柏枝属 <i>Myricaria</i> (1)
柳叶菜科 Onagraceae (1)	柳兰属 <i>Chamerion</i> (1)
锁阳科 Cynomoriaceae (1)	锁阳属 <i>Cynomorium</i> (1)
报春花科 Primulaceae (1)	珍珠菜属 <i>Lysimachia</i> (1)
白花丹科 Plumbaginaceae (1)	补血草属 <i>Limonium</i> (1)
旋花科 Convolvulaceae (2)	旋花属 <i>Convolvulus</i> (2)
唇形科 Lamiaceae (1)	青兰属 <i>Dracocephalum</i> (1)
车前科 Plantaginaceae (1)	车前属 <i>Plantago</i> (1)
菊科 Asteraceae (32)	亚菊属 <i>Ajania</i> (1); 蒿属 <i>Artemisia</i> (11); 紫菀木属 <i>Asterothamnus</i> (1); 蓝刺头属 <i>Echinops</i> (1); 旋覆花属 <i>Inula</i> (1); 花花柴属 <i>Karelinia</i> (1); 栉叶蒿属 <i>Neopallasia</i> (1); 鸦葱属 <i>Takhtajaniantha</i> (2); 苦苣菜属 <i>Sonchus</i> (2); 苦荚菜属 <i>Ixeris</i> (1); 绢蒿属 <i>Seriphidium</i> (2); 莴苣属 <i>Lactuca</i> (2); 薊属 <i>Cirsium</i> (1); 紫菀属 <i>Aster</i> (2); 紫菀木属 <i>Asterothamnus</i> (1); 火绒草属 <i>Leontopodium</i> (1); 漏芦属 <i>Rhaponticum</i> (1); 飞蓬属 <i>Erigeron</i> (1)
小麦冬科 Juncaginaceae (1)	小麦冬属 <i>Triglochin</i> (1)

续表 Continued Table

科名(科内物种数) Family name (Number of species in the family)	属名(属内物种数) Genus name (Number of species in the genus)
禾本科 Poaceae (62)	芨芨草属 <i>Neotrinia</i> (2); 箨毛属 <i>Aeluropus</i> (2); 冰草属 <i>Agropyron</i> (1); 三芒草属 <i>Aristida</i> (1); 雀麦属 <i>Bromus</i> (1); 拂子茅属 <i>Calamagrostis</i> (3); 隐子草属 <i>Cleistogenes</i> (1); 披碱草属 <i>Elymus</i> (6); 九顶草属 <i>Enneapogon</i> (1); 旱麦草属 <i>Eremopyrum</i> (1); 洽草属 <i>Koeleria</i> (1); 狼尾草属 <i>Pennisetum</i> (1); 芦苇属 <i>Phragmites</i> (1); 狗尾草属 <i>Setaria</i> (1); 针茅属 <i>Stipa</i> (7); 稗属 <i>Echinochloa</i> (1); 甘蔗属 <i>Saccharum</i> (1); 狗牙根属 <i>Cynodon</i> (1); 虎尾草属 <i>Chloris</i> (1); 黄花茅属 <i>Anthoxanthum</i> (1); 剪股颖属 <i>Agrostis</i> (1); 碱茅属 <i>Puccinellia</i> (1); 孔颖草属 <i>Bothriochloa</i> (1); 赖草属 <i>Leymus</i> (2); 马唐属 <i>Digitaria</i> (1); 新麦草属 <i>Psathyrostachys</i> (1); 鸭茅属 <i>Dactylis</i> (1); 偃麦草属 <i>Elytrigia</i> (1); 燕麦属 <i>Avena</i> (1); 藜草属 <i>Phalaris</i> (1); 早熟禾属 <i>Poa</i> (2); 大麦属 <i>Hordeum</i> (1); 羊茅属 <i>Festuca</i> (8); 棒头草属 <i>Polygogon</i> (1); 画眉草属 <i>Eragrostis</i> (1); 荩草属 <i>Arthraxon</i> (1); 细柄茅属 <i>Ptilagrostis</i> (1); 异燕麦属 <i>Helictotrichon</i> (1)
桑科 Moraceae (1)	榕属 <i>Ficus</i> (1)
莎草科 Cyperaceae (9)	扁穗草属 <i>Blysmus</i> (2); 薹草属 <i>Carex</i> (7)
泽泻科 Alismataceae (1)	泽泻属 <i>Alisma</i> (1)
石蒜科 Amaryllidaceae (2)	葱属 <i>Allium</i> (2)
卫矛科 Celastraceae (1)	卫矛属 <i>Euonymus</i> (1)
香蒲科 Typhaceae (2)	香蒲属 <i>Typha</i> (2)
茜草科 Rubiaceae (1)	拉拉藤属 <i>Galium</i> (1)
紫草科 Boraginaceae (1)	牛舌草属 <i>Anchusa</i> (1)
灯芯草科 Juncaceae (2)	灯芯草属 <i>Juncus</i> (2)
马齿苋科 Portulacaceae (1)	马齿苋属 <i>Portulaca</i> (1)

表 2 塔里木河流域牧草植物科属分析

Table 2 Analysis of family and genus of forage plants in Tarim River Basin

科类别 Categories of families	科 Family		属 Genus		种 Species		属类别 Categories of genera	属 Genus		种 Species	
	数量 Number (No.)	占比 Percent- age (%)	数量 Number (No.)	占比 Percent- age (%)	数量 Number (No.)	占比 Percent- age (%)		数量 Number (No.)	占比 Percent- age (%)	数量 Number (No.)	占比 Percent- age (%)
大型科 Large fami- ly (≥10)	6	15	196	73	107	70	大型属 Large ge- nus (≥10)	1	1	11	4
中型科 Medium- sized family (5~9)	4	10	31	12	13	8	中型属 Medium- sized genus (5~9)	8	5	51	18
小型科 Small fami- ly (2~4)	8	20	19	7	10	7	小型属 Small ge- nus (2~4)	42	27	105	39
单种科 Monotypic family (1)	23	55	23	8	23	15	单种属 Monotypic genus (1)	102	67	102	39

2.2 塔里木河流域不同牧草类群与生活型分布格局及驱动因素

2.2.1 塔里木河流域典型牧草植物类群分布格局 塔里木河流域牧草植物类群呈现边缘分布的特点,禾本科、其他科及灌木植物占据该流域牧草资源主导位置,莎草科植物资源最少。其中禾本科牧草植物在塔里木河流域北部巴音郭楞蒙古自治州的和静县(39种)所含最多(图 2a),其次是该流域北部巴音郭楞蒙古自治州的和硕县(25种)及中部阿克苏地区的阿克苏市(21种)所含牧草植物较多,该流域西部克孜勒苏柯尔克孜自治州的乌恰县(16种)、西南部喀什地区的叶城县(19种)及和田地区的和田县(15种)等边缘各县分布物种数相近;豆科牧草植物主要分布在该流域北部巴音郭楞蒙古自治州的和静县(11种)、中部阿克苏地区的阿克苏市(9种)以及西南部

和田地区的和田县(8种)(图2b);其他科牧草植物在西南部喀什地区的叶城县(40种)分布最多(图2d),其次是巴音郭楞蒙古自治州的和静县(39种)以及西部克孜勒苏柯尔克孜自治州的乌恰县(32种),同时该流域中部阿克苏地区的阿克苏市(28种)、西南部喀什地区的塔什库尔干县(28种)、和田地区的和田县(21种)、巴音郭楞蒙古自治州的若羌县(23种)也有较多其他科牧草分布(图2d);灌木植物在该流域中部的阿克苏市(37种)分布最多,其次是东部的若羌县(32种)分布较多(图2e),西部的乌恰县(24种)和西南部的叶城县(24种)及该流域边缘各县所含其他科牧草植物物种数相近(图2e);牧草类群中莎草科植物物种数最少,巴音郭楞蒙古自治州的和静县(6种)分布莎草科牧草植物最多(图2c),其次是阿克陶县(5种)、克孜勒苏柯尔克孜自治州的乌恰县(4种)。综上所述,该流域北部的和静县、中部的阿克苏市、西部的乌恰县、西南部的和田县、叶城县以及东部的若羌县植物资源较为丰富,西北部的克孜勒苏柯尔克孜自治州牧草类群资源较匮乏。

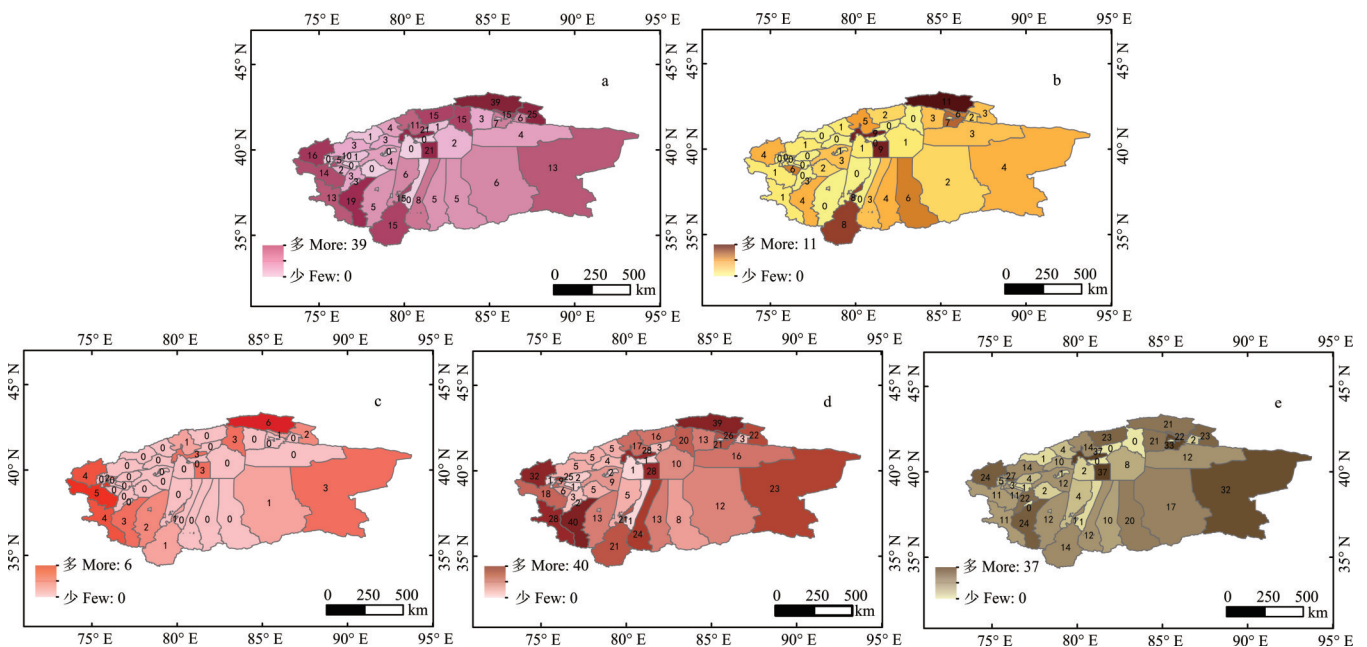


图2 塔里木河流域牧草植物类群分布

Fig. 2 Distribution of forage plant communities in the Tarim River Basin

a, b, c, d, e分别为禾本科、豆科、莎草科、其他科及灌木植物分布。a, b, c, d, e were the distribution of Poaceae forage plants, Leguminous forage plants, Cyperaceae forage plants, forage plants from other families and shrub plants. 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2023)2762号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2023)2762 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

2.2.2 塔里木河流域牧草植物生活型分布格局 塔里木河流域牧草植物生活型主要由多年生草本构成,其次是一年生草本,数量最少的为两年生草本。由图3a可知,一年生牧草主要分布在西南部喀什地区的叶城县(17种)、北部巴音郭楞蒙古自治州的和静县(17种),其次是西部克孜勒苏柯尔克孜自治州的乌恰县(12种)、东部巴音郭楞蒙古自治州的若羌县(11种)、西南部和和田地区的和田县(11种)及中部的阿克苏市(11种);由图3b可知,两年生牧草植物物种数最少,分布县域与一年生和多年生牧草相近。由图3c可知,多年生牧草主要分布在塔里木盆地北部隶属巴音郭楞蒙古自治州的和静县(87种)以及阿克苏地区的阿克苏市(80种),其次是西南部喀什地区的叶城县(64种)、西部克孜勒苏柯尔克孜自治州的乌恰县(63种)以及东部巴音郭楞蒙古自治州的若羌县(60种),另外西南部的和田地区的和田县(46种)、喀什地区的塔什库尔干县(44种)也有较多分布;结果表明,塔里木河流域牧草植物不同生活型分布均呈现沿塔里木盆地边缘分布的特点,主要集中于北部和静县、西部乌恰县、西南部叶城县、和田县、东部若羌县以及中部阿克苏市。

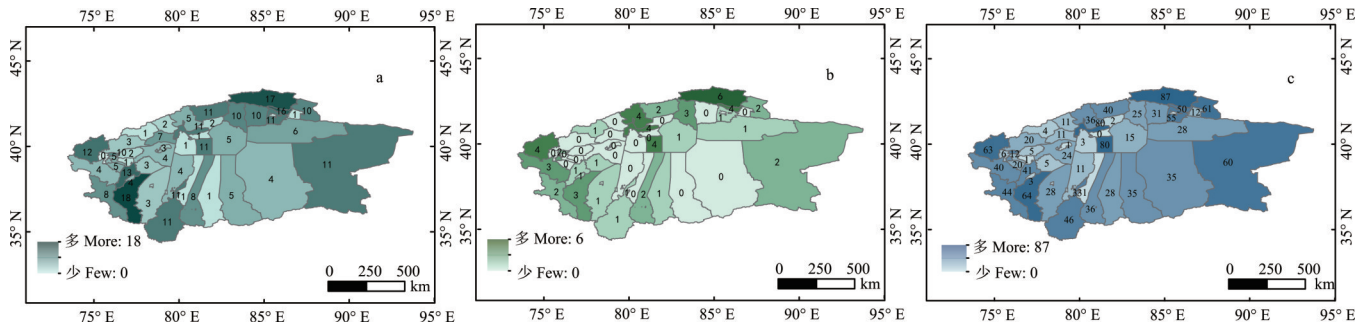


图 3 塔里木河流域牧草植物生活型分布

Fig. 3 Life-form distribution of forage plants in the Tarim River Basin

a, b, c 分别代表一年生、两年生及多年生牧草植物分布。a, b, c were the distribution of annual forage plants, biennial forage plants and perennial forage plants. 基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2023)2762 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2023) 2762 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

2.2.3 影响塔里木河流域牧草植物分布的驱动因素 将图 4 中对两类功能群分布有显著影响的因子整理成表格(表 3 和表 4), 由表 3 可知, 对不同生活型植物分布有影响的因子包括年均温(mean annual temperature, MAT)、年均降水(annual precipitation, AP)、pH、全磷(total phosphorus, TP)、碱解氮(alkali-hydrolyzable nitrogen, AN)、速效钾(available potassium, AK), 由表 4 可知, 对植物牧草类群分布有影响的因子包括年均温、年均降水、地方生产总值(gross domestic product, GDP)、土壤有机质(soil organic matter, SOM)、pH、全磷、碱解氮、速效钾, 将环境因子与牧草类群及生活型两类功能群的物种分布进行冗余分析与层次分割的分析后, 结果表明: 1) 由图 5a 发现, 两种功能群中豆科植物与灌木的物种分布受环境因子影响相对较小, 仅有人为因子中的地方生产总值(GDP)对其存在部分影响; 2) 根据图 5a 和 b 发现, 年均温、pH、速效钾(AK)对两类功能群的分布都起近似同等的制约作用; 碱解氮(AN)、全磷(TP)、年降水对两类功能群植物的分布起促进作用, 此外, 土壤有机质(SOM)仅对牧草类群的分布存在贡献。

通过对比图 5c 和 d 发现, 环境因子对两种功能群物种分布的贡献趋势近乎同等, 年均温与地方生产总值是影响牧草类群区域分布的主要因子, 贡献率达 66.8%, 年均温是影响牧草植物不同生活型区域分布差异的主要因子, 其贡献率达 62.2%, pH、速效钾为次要因子, 贡献率分别为 13.1% 和 10.8%, 碱解氮、全磷、年均降水贡献率不大, 分别为 5.9%、6.9% 和 1.0%, 土壤有机质仅对牧草类群的分布存在贡献, 贡献率为 -2.2%。

2.3 塔里木河流域牧草植物饲用价值划分

2.3.1 塔里木河流域牧草等级划分 塔里木河流域牧草植物中有 180 种可按饲用等级将其划分为优、良、中、低、劣等牧草 5 类, 89 种待确认, 由图 6 可以看出在已分类的牧草中, 良等牧草数量最多, 含 85 种, 其次是中等牧草, 含 43 种, 劣等牧草数量最少, 含 2 种, 优、良、中等牧草共 151 种, 占 84%, 差等牧草与低等牧草共 29 种, 占 16%, 表明塔里木河流域牧草质量普遍较高。

2.3.2 塔里木河流域牧草植物营养成分划分 本研究采用基于主成分分析(PCA)的聚类方法, 对 8 科 46 种牧草的营养指标(粗蛋白、无氮浸出物、粗纤维、粗脂肪、粗灰分)进行了综合分析, 通过图 7 发现, 物种之间的营养价值相似性并不显著依赖于其所属的系统发育科别。根据图 8 营养价值相似距离将所有野生牧草聚类成 5 个类群, 使其在相似条件下彼此间营养价值可相互作为参考依据: 1) 芨芨草(*Achnatherum splendens*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*); 2) 短芒披碱草(*Elymus breviaristatus*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*); 3) 芦苇、狗尾草(*Setaria viridis*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、西北针茅(*Stipa sareptana* var. *krylovii*)、戈壁针茅(*Stipa tianschanica* var. *gobica*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、碱茅(*Puccinellia distans*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、止血马唐(*Digitaria ischaemum*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)、偃麦草(*Elytrigia repens*); 4) 藨草(*Phalaris arundinacea*)、细叶早熟禾(*Poa angustifolia*)、

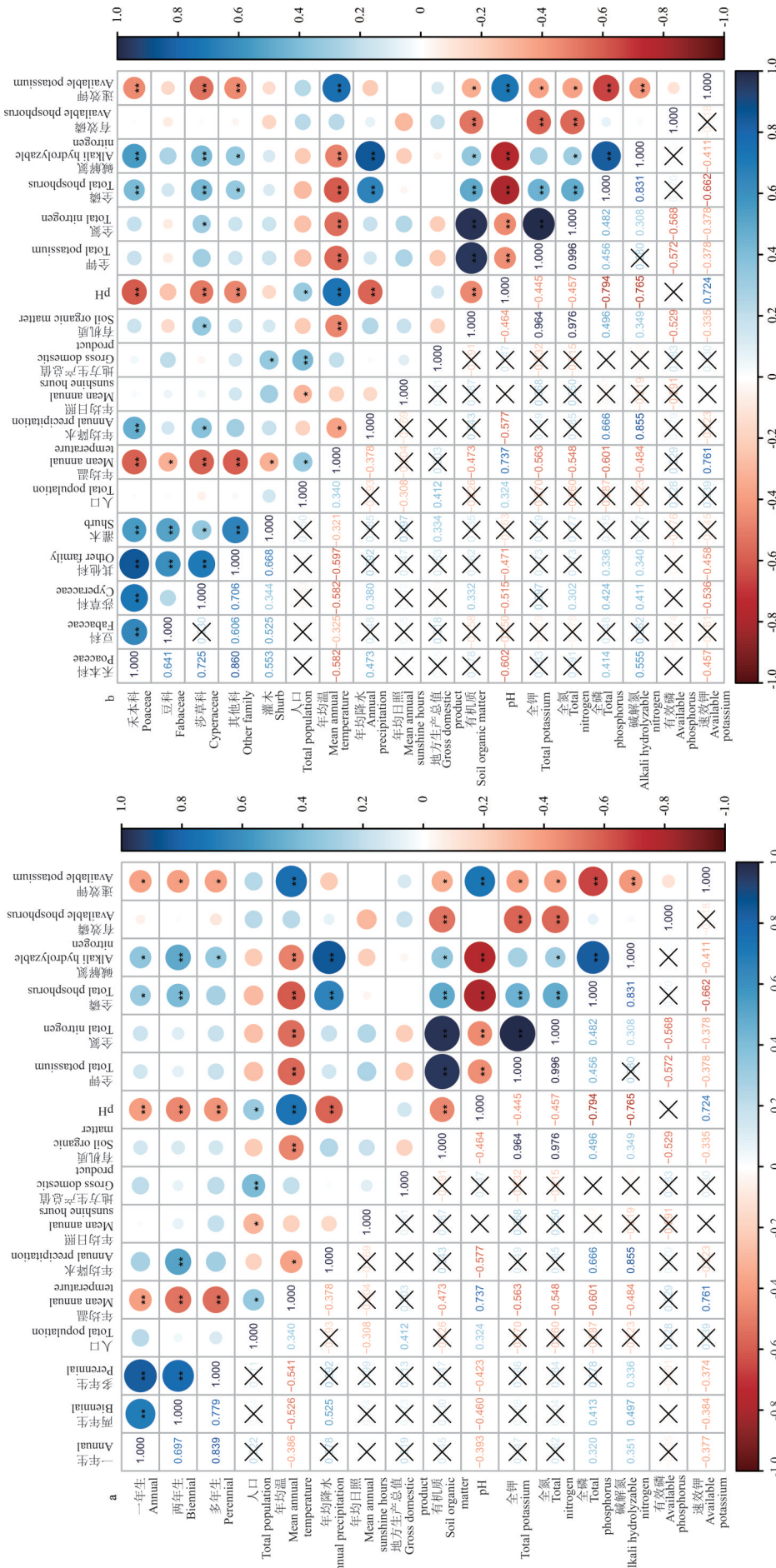


图 4 不同生活型物种数 (a) 和牧草类群物种数 (b) 与 13 个影响因子的相关性热图
 Fig. 4 Heatmap of correlation between 13 influencing factors and the number of species of forage taxa (b)

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

表 3 对塔里木河流域不同生活型牧草植物分布具有显著影响的因子

Table 3 Factors that have significant impacts on the distribution of forage plants with different life forms in the Tarim River Basin

生活型 Life forms	年均温 Mean annual tem- perature (MAT)	年均降水 Annual pre- cipitation (AP)	pH	全磷 Total phos- phorus (TP)	碱解氮 Alkali-hydrolyz- able nitrogen (AN)	速效钾 Available potassium (AK)
一年生 Annual	-0.386*	/	-0.393**	0.320*	0.351*	-0.377*
两年生 Biennial	-0.526**	0.525**	-0.460**	0.413**	0.497**	-0.384*
多年生 Perennial	-0.541***	/	-0.423**	/	0.336*	-0.374*

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$. 下同 The same below.

表 4 对塔里木河流域不同牧草类群牧草植物分布具有显著影响的因子

Table 4 Factors significantly influencing the distribution of pasture plants of different forage taxa in the Tarim River Basin

牧草类群 Forage plant groups	年均温 Mean annual tempera- ture (MAT)	年均降水 An- nual precipita- tion (AP)	地方生产总值 Gross domestic product (GDP)	pH	土壤有机质 Soil organic matter	全磷 Total phosphorus (TP)	碱解氮 Alkali- hydrolyzable ni- trogen (AN)	速效钾 Avail- able potassi- um (AK)
禾本科 Poaceae	-0.582**	0.473**	/	-0.602**	/	0.414**	0.555**	-0.457**
豆科 Fabaceae	-0.325*	/	/	/	/	/	/	/
莎草科 Cyperaceae	-0.582**	0.380*	/	-0.515**	0.332*	0.424**	0.411**	-0.536**
其他科 Other family	-0.597**	/	/	-0.471**	/	0.340*	0.340*	-0.458**
灌木 Shrub	-0.321*	/	0.334*	/	/	/	/	/

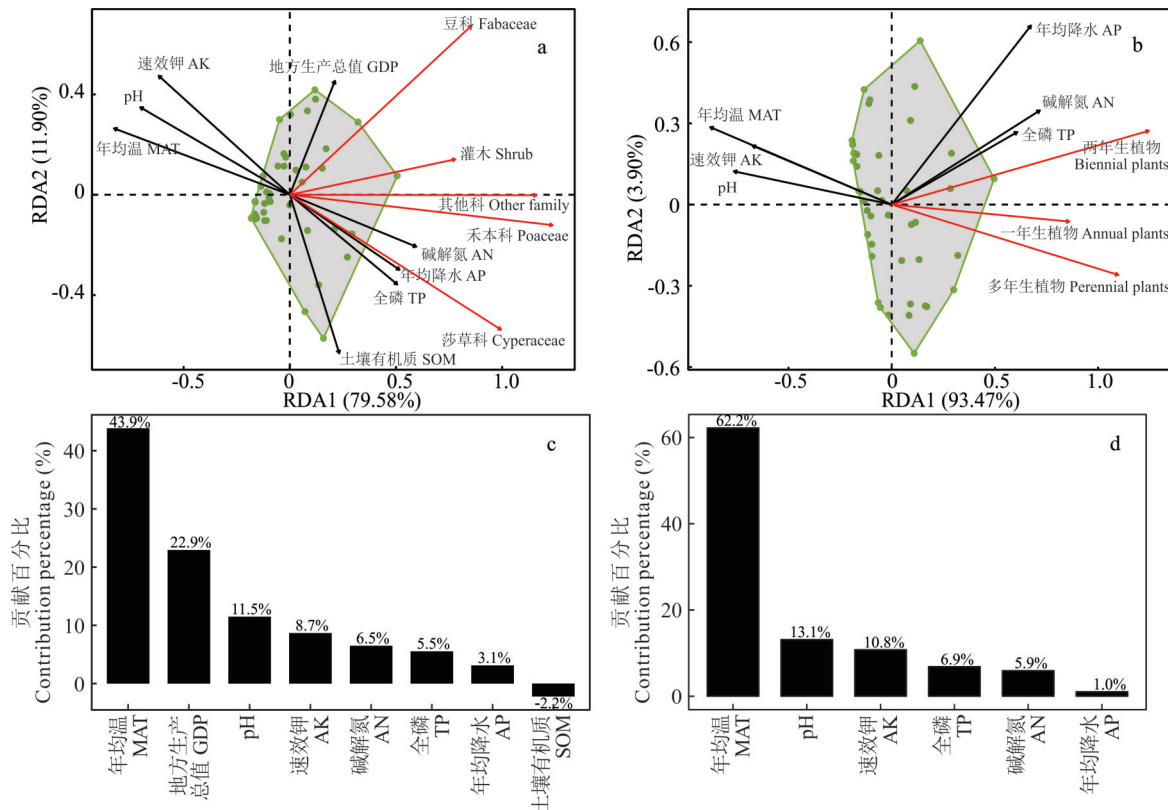


图 5 牧草类群、生活型与环境因子冗余分析及影响其分布的环境因子贡献百分比

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of forage groups, life forms, and environmental factors, along with the percentage contribution of environmental factors influencing

a, b 分别为牧草类群及生活型对环境因子的冗余分析, c, d 分别为影响草本类群与生活型物种数的环境因子贡献百分比。a, b were redundancy analysis (RDA) showing the relationship between life forms and environmental factors; c, d were the percentage contribution of environmental factors with affecting the distribution of forage taxa and influencing the distribution of life forms.

布顿大麦草(*Hordeum bogdanii*)、骆驼刺、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、百脉根(*Lotus corniculatus*)、天蓝苜蓿(*Medicago lupulina*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、白花草木樨(*Melilotus albus*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、野火球(*Trifolium lupinaster*)、红车轴草(*Trifolium pratense*)、刺沙蓬(*Salsola tragus*)、短叶假木贼(*Anabasis brevifolia*)；5) 灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、盐穗木、盐爪爪、猪毛菜(*Salsola collina*)、细果薹草(*Carex stenocarpa*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)、蒙古鸦葱(*Scorzonera mongolica*)、刺山柑(*Capparis spinosa*)、蒺藜(*Polygonum aviculare*)。这一发现表明,牧草养分性状独立于系统发育关系。此外,本研究还发现营养价值相似类群中的植物分属于不同牧草等级,表明养分性状发育也独立于牧草等级的划分。

3 讨论

3.1 塔里木河流域牧草植物多样性组成

本研究在综合历史资料、书籍、文献及名录的基础上,并结合野外实地调查,对塔里木河流域的野生牧草植物资源进行了整理与更新。本名录共收录了269种牧草植物,分属于41科和153属。相比之下,安沙舟^[36]整理出新疆野生优良牧草7科60属289种,并统计出分布于新疆的盐生牧草^[37]达到303种,分属32科和115属,其中野生优良牧草的科属数量与本名录相比较少,可能是由于名录更新不及时造成的,张荟荟等^[38]在对新疆东部、南部、北部28个县市的考察过程中共采集到23科85属142种野生牧草种质资源,马玉宝等^[39]通过对北疆17个县市中不同生境、海拔及草地类型的考察中,收集到9科、43属、69种野生牧草种质资源,与本名录统计数相比较少,这可能是由于野外考察的覆盖面积、采集时间和路线选择等外部条件的差异而造成;而祖日古丽·友力瓦斯等^[40]的调查则表明,新疆拥有高达4081种野生和引种栽培的高等植物,分属161科和877属,显著高于本名录所统计的科属数,可能是因为将牧草种质资源变种开发等物种均统计在内所导致的。

本研究发现新疆牧草植物在科的分布上已集中于少数科内,其中占比较大的有禾本科、豆科、苋科、菊科等,与本名录相比,孜比拉^[41]将新疆牧草主要分为禾本科、菊科、藜科3大类,李珊珊^[42]通过对新疆北塔山地区饲用植物资源的调查同样发现该区植物资源主要集中于禾本科、菊科、藜科,豆科植物物种数较少,仅有5种,沙吾列·阿拜汗等^[43]则将新疆主要天然牧草科属资源分为禾本科、豆科、菊科、藜科、莎草科5大类,由表3可知,其中禾本科(62种)、苋科(46种)、菊科(32种)的物种数均占据了较大的比例,与前人调查结果一致,但豆科植物物种数(28种)较之前研究有增大的趋势,张云玲等^[44]自2009—2015年对新疆78个县市豆科优良野生牧草的考察中共收集豆科牧草35种,这一数据与本名录中的结果相互印证,莎草科(9种)则相反,可能是由于莎草科植物喜湿热环境^[45]并不适于塔里木河流域的特殊环境所导致。

在属的组成上,与科组成相反,单种属与小型属占据主要地位,段小兵^[46]在对新疆艾比湖饲用植物资源调查中表明禾本科的羊茅属、针茅属,豆科的苜蓿属、草木樨属以及菊科的蒿属、绢蒿属都作为优势物种有较大的分布,此外莎草科的薹草属、藜科的地肤属(*Kochia*)也是饲用资源的重要组成成分,对比表1发现本名录中塔里木

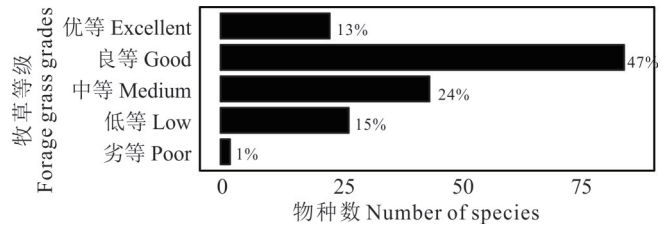


图6 塔里木河流域牧草等级

Fig. 6 Forage grade in Tarim River Basin

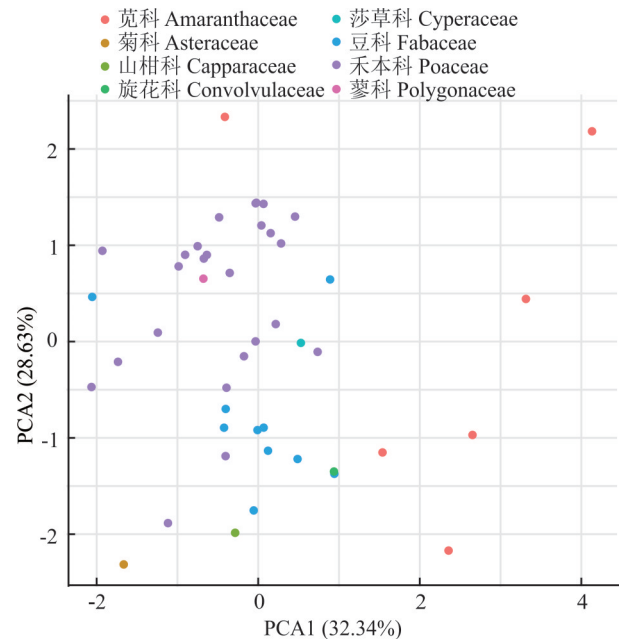


图7 塔里木河流域牧草养分散点图

Fig. 7 Scatter plot of forage nutrients in Tarim River Basin

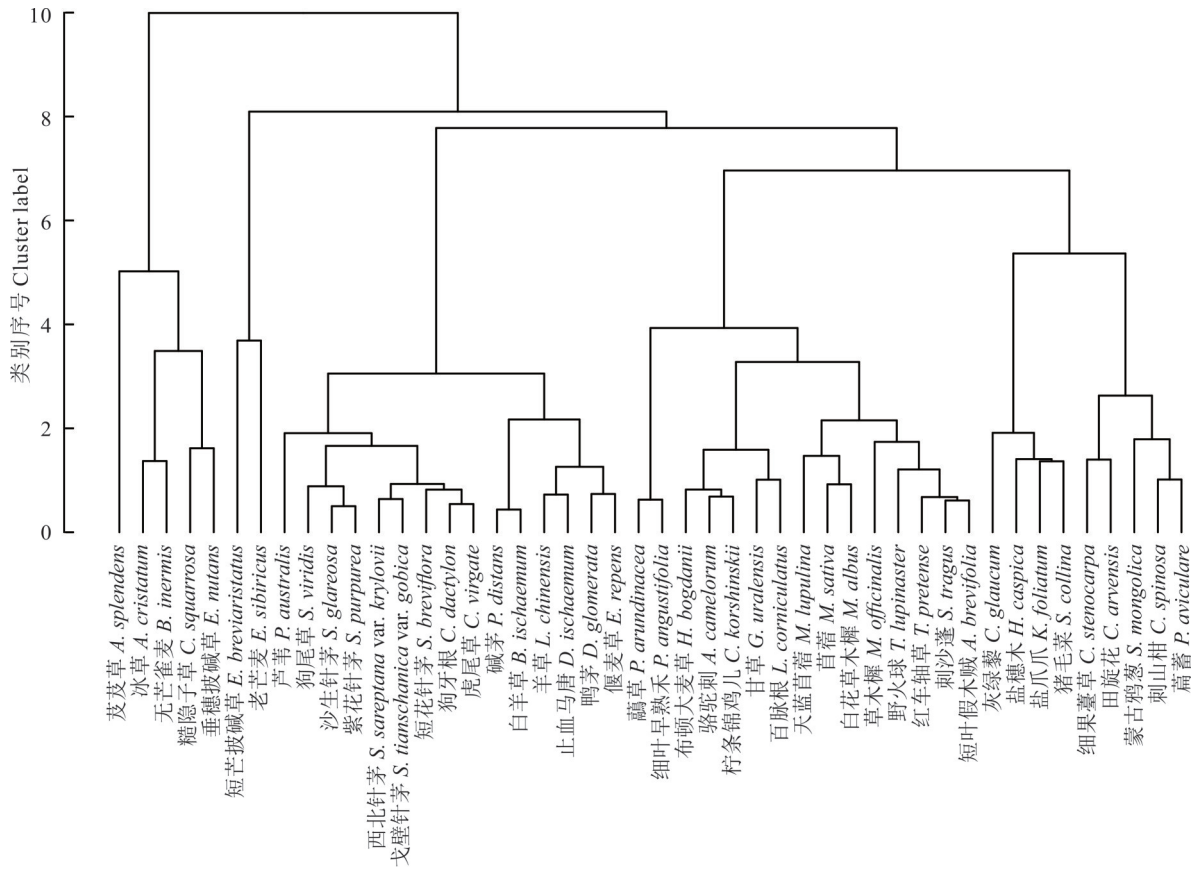


图 8 塔里木河流域牧草养分聚类树状图
 Fig. 8 Cluster tree of forage nutrients in Tarim River Basin

河流域分布较多的仅包括蒿属(11种)、沙拐枣属(8种)、羊茅属(8种),造成该差异可能是由于莎草科、菊科、禾本科植物在属以及种的鉴定上存在困难或因其生长周期较短以致采集不全也有可能引起统计不全出现差异,也可能是由于该流域生态环境的脆弱性导致部分科属的植物不好存活。通过对已有资源现状的初步整理分析,本名录可视为塔里木河流域牧草植物资源的阶段性总结,但新疆作为我国牧草资源的重要储存库,这一名录还需随着野外工作的深入推进和研究工作的拓展而不断完善,为今后选育出更多适宜新疆种植的优质牧草品种提供坚实基础。

3.2 塔里木河流域牧草植物分布特征及其对环境因子的响应

本研究通过细化新疆塔里木河流域牧草植物的功能群并发现两类功能群均呈现沿塔里木河流域边缘分布的特点。同时在探究牧草植物不同功能群之间的分布规律及影响因子是否存在差异时发现豆科植物与灌木的分布受环境因子影响相对较小,可能是由于豆科植物的固氮作用使其对土壤养分的依赖性小于非豆科植物^[47],或者是由于豆科及灌木的经济价值较其他类群更高,导致人为干涉活动较多。为了验证环境因子对植物分布的影响,许多学者从不同区域和角度开展了研究。娄安如^[48]对新疆天山中段南北坡的研究揭示了大气温度和降水量在决定植物群落宏观分布格局中的关键作用,冯纓等^[49]研究也表明温度梯度和湿度梯度对天山北坡中段草地类型的地理分布具有决定性影响,以上研究均表明气温和降水是影响植被分布的主要因素且本研究结果与其均相吻合。此外,有研究指出土壤养分是影响植物分布的重要因素^[47]之一,李凯辉等^[50]研究揭示了天山南坡高寒草地的土壤有机质(SOM)和速效钾(AK)对物种组成具有显著影响。尽管本研究中土壤有机质对牧草类群分布贡献比为负值(图 5c),这可能是由于层次分割时受变量之间的相关性影响,且图 5a 显示土壤有机质对该类群物种分布存在积极影响,但与前人结论不同的是本研究中土壤有机质较其他环境因子对牧草类群物种数的分布影响并不显著。

此外,王旭东^[51]通过对不同学者及研究区域对比发现在荒漠地区,全磷(TP)和碱解氮(AN)对植物分布具有显著作用,本研究结果与其相契合。刘星宏等^[52]对于塔里木河下游植物群落的研究则表明空间分布主要受pH的影响,而全氮(TN)和全磷对其影响并不显著,徐娜等^[53]研究则揭示了在新疆巴音布鲁克高寒沼泽湿地中,全氮是影响植物群落物种多样性的关键因子,而全磷并未对植物生长构成限制,本研究结果则显示全磷对两类功能群物种分布均存在影响,全氮则较全磷影响并不显著。齐丹卉^[54]的研究发现全磷与浑善达克沙地植物群落的多样性呈负相关,本研究结果则表明全磷对物种分布起促进作用,结论相反。

通过总结对比发现土壤因子中全磷对植被分布的呈现促进或限制影响存在争议,此外,土壤有机质与全氮对植物分布是否有显著影响也存在差异性,造成这种差异的原因可能是由于土壤有机质与全氮两个因子具有强相关关系所导致,也可能是由于功能群划分差异所导致,此外,研究区域或环境因子数据来源不同也会导致结论出现差异。本研究不仅筛选出影响塔里木河流域牧草植物区域分布差异的主要因子并将关键因子所做贡献百分比进行可视化分析,揭示了环境因子响应的差异性和相似性,同时验证了群落单元下不同功能群的分布所受环境因子的影响可能不同的猜想,未来研究可通过细化其他功能群、选取多种环境以及包含更多因子进行更深入的研究,为掌握植物分布特性提供更全面的数据支撑与理论依据。

3.3 塔里木河流域牧草植物饲用等级与养分性状

通过参考书籍《中国饲用植物》^[28]及《中国草地饲用植物资源》^[29]的综合等级评价方法,将塔里木河流域内的149种牧草植物划分为优、良、中、差、劣5个等级。敖古干牧其尔等^[55]在浑德伦夏营盘区域的野生饲用植物资源的研究中表明,中等以上等级的饲用植物占据了总种数的58.9%,段代祥等^[56]在对黄河三角洲地区野生饲用植物的统计结果中证实了良等植物数量占据显著优势,孟岩等^[57]通过调研发现新疆卡拉苏口岸公路沿线区域的野生饲用植物物种中以优、良、中等为主且占比达85.82%,刘佳等^[58]通过对新疆玛纳斯河中上游低山荒漠区的野生饲用植物进行饲用价值分析发现优等和良等植物的比例占到了49.25%。以上研究结论均表明优良牧草在植物资源中有显著优势,本研究结论与其一致,尽管占比存在部分差异,这可能是由于研究区域生长环境的多样性以及牧草等级划分依据不统一导致。

郑凯等^[59]和李艳琴等^[60]学者强调,营养价值的高低是衡量牧草品质优劣的关键标准,故本研究在划分牧草等级的同时对牧草植物养分也进行了整理,通过与王德凤等^[61]对西南喀斯特山区46科120种牧草的养分聚类研究以及邢虎成等^[62]对全国范围内10种禾本科种质资源的养分聚类分析结果对比发现植物间的养分相似性并不依赖于它们的系统发育关系。乌云高娃等^[63]通过对内蒙古呼伦贝尔地区种植的6种禾本科牧草的营养成分进行聚类分析,发现偃麦草与老芒麦、垂穗披碱草虽同属禾本科但营养成分却分属不同的类别,再次验证了养分发育与系统发育之间的独立性。

4 结论

1)塔里木河流域的牧草植物总计41科153属269种,呈沿塔里木盆地边缘分布的特点,主要集中于北部和静县、西部乌恰县、西南部叶城县、和田县、东部若羌县以及中部阿克苏市。

2)通过细化群落单元下不同功能群发现牧草植物分布格局对环境因子的响应程度出现差异,年均温(MAT)与地方生产总值(GDP)是影响牧草植物牧草类群区域分布的主要因子,年均温是影响牧草植物不同生活型区域分布差异的主要因子,pH、速效钾(AK)是影响牧草植物分布的次要因子,全磷(TP)对植被分布的呈现促进或限制影响存在争议。

3)基于养分聚类结果的进一步分析发现植物间的养分相似性并不依赖于它们的系统发育同时也独立于牧草等级的划分。

参考文献 References:

- [1] Ma F J, Feng L S, Yang S, *et al.* Current status and development and utilization countermeasures of grazing germplasm resources in Liaoning Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 50–54.
马凤江, 冯良山, 杨姝, 等. 辽宁省牧草种质资源现状及开发利用对策. *安徽农业科学*, 2023, 51(1): 50–54.
- [2] Yan Q, Ma Y S, Shi J J. Study on cold resistance of typical suitable cultivated forage grass in Sanjiangyuan region. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary*, 2007(12): 64–66.
严青, 马玉寿, 施建军. 三江源区典型适宜栽培牧草的抗寒性研究. *黑龙江畜牧兽医*, 2007(12): 64–66.
- [3] Zeng B, Zhang X Q, Peng Y, *et al.* Analysis on the drought tolerance of *Dactylis glomerata* in greenhouse. *Hubei Agricultural Sciences*, 2006(1): 103–106.
曾兵, 张新全, 彭燕, 等. 优良牧草鸭茅的温室抗旱性研究. *湖北农业科学*, 2006(1): 103–106.
- [4] Zhang S Y, Wang S Z, Yang S L, *et al.* Study on salt endurance of turf-type *Poa pratensis* varieties. *Journal of Zhelimu Animal Husbandry College*, 1999(4): 2–6.
张淑艳, 王世珍, 杨双连, 等. 坪用草地早熟禾品种耐盐性的比较研究. *哲里木畜牧学院学报*, 1999(4): 2–6.
- [5] Jing H C, Wang T, Lin R C, *et al.* Strengthen the research of forage basic biology to ensure forage seed industry and national food security. *Chinese Bulletin of Botany*, 2022, 57(6): 719–724.
景海春, 王台, 林荣呈, 等. 加强饲草基础生物学研究, 保障饲草种业与国家大粮食安全. *植物学报*, 2022, 57(6): 719–724.
- [6] Fang Y. Research on forage germplasm resources and breeding. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(20): 26–27.
方媛. 牧草种质资源与育种研究概况. *安徽农学通报*, 2021, 27(20): 26–27.
- [7] Baoyin H X G, Wang Z W, Alata. Research progress of forage breeding in China. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, 31(Z1): 331–334.
宝音贺希格, 王忠武, 阿拉塔. 我国牧草育种研究进展. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(Z1): 331–334.
- [8] Guo C Y, Fang Y Y, Yi F Y, *et al.* Current status of protection and utilization of pasture germplasm resources in China. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2024, 45(6): 81–86.
郭呈宇, 房永雨, 伊风艳, 等. 我国牧草种质资源保护与利用现状. *畜牧与饲料科学*, 2024, 45(6): 81–86.
- [9] Wang Y H. The current situation and protection countermeasures of forage germplasm resources in Gansu Province. *China Animal Industry*, 2023(22): 28–29.
王银花. 甘肃地区牧草种质资源现状及保护对策. *中国畜牧业*, 2023(22): 28–29.
- [10] Ma L X, Xin X Y, Sun Z Y, *et al.* Effect of phosphate fertilizer on forage yield in alpine meadow grassland. *Grassland and Turf*, 2018, 38(3): 17–22.
马隆喜, 辛小云, 孙志英, 等. 施磷肥对高寒草甸草原牧草的增产效应研究. *草原与草坪*, 2018, 38(3): 17–22.
- [11] Wang Y F. Mechanism of increasing yield of intercropping and mixed cropping patterns of (*Medicago sativa* L). and gramineous crops. Beijing: China Agricultural University, 2005.
王玉芬. 苜蓿与不同禾本科牧草间混作增产效应. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [12] Wang Y F, Zhuo X L, Wang L, *et al.* Effect of harvest period and processing method on the quality and *in vitro* digestibility of native grass products. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 145–154.
王一凡, 卓兴良, 王磊, 等. 收割时间与加工方式对天然牧草产品品质和体外消化率的影响. *草业学报*, 2024, 33(6): 145–154.
- [13] Han Y, Feng W Q, Zhang T T, *et al.* Influence of ecological factors on the distribution of medicinal plants resources. *China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2023, 38(4): 1450–1453.
韩颖, 冯婉庆, 张婷婷, 等. 生态因子对药用植物资源分布的影响. *中华中医药杂志*, 2023, 38(4): 1450–1453.
- [14] Hu Z Z, Zhao J, Zhang Y L. Distribution patterns of rare and endangered plants in hot spots in Jiangxi under the influence of climate and terrain factors. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2018, 24(22): 112–115.
胡忠俊, 赵娟, 张一林. 气候地形因子影响下江西热点地区珍稀濒危植物分布格局研究. *安徽农学通报*, 2018, 24(22): 112–115.
- [15] Huang J X, Zheng M X, Huang Y Y, *et al.* Composition and distribution of semi-mangrove communities in coastal areas in western Guangdong and their influence factors. *Wetland Science*, 2020, 18(1): 91–100.
黄嘉欣, 郑明轩, 黄颖彦, 等. 粤西沿海地区半红树植物群落组成和分布及其影响因子研究. *湿地科学*, 2020, 18(1): 91–100.
- [16] Lu J. The main forage resources of Qilian Mountains in Gansu and analysis on the soil. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008.

- 芦娟. 甘肃祁连山区草地主要牧草资源及其土壤生境分析. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [17] Lu X X, Chen T C, Wei J F, *et al.* Nutritional value of forages and their impact factors across different grassland types in Yili, Xinjiang. *Pratacultural Science*, (2024-12-19)[2025-06-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20241219.1437.013.html>.
鲁星鑫, 陈天赐, 尉剑飞, 等. 新疆伊犁不同草地类型牧草营养价值及其影响因素. *草业科学*, (2024-12-19)[2025-06-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20241219.1437.013.html>.
- [18] Liu J P, Zhang N N, Zhao X S, *et al.* Comparative analysis of yield and nutritional value of six perennial Gramineae forage grasses in Alpine region of Qinghai. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2024, 51(9): 3794–3806.
刘金平, 张楠楠, 赵鑫盛, 等. 青海高寒地区6种多年生禾本科牧草产量及营养价值比较分析. *中国畜牧兽医*, 2024, 51(9): 3794–3806.
- [19] Liu D X, Peng W D, Wu Y F, *et al.* Evaluation on the production performance and feed value of seven grasses in arid areas. *Grassland and Turf*, 2024, 44(3): 108–115.
刘定鑫, 彭文栋, 武育芳, 等. 干旱区7个禾本科牧草品种生产性能与饲用价值评价. *草原与草坪*, 2024, 44(3): 108–115.
- [20] Zhang J, Li Z G, Li J W, *et al.* Comprehensive evaluation and correspondence analysis of nutritional value of common grass species in Ewenki grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(5): 33–39.
张军, 李治国, 李江文, 等. 鄂温克草原常见禾本科牧草营养价值的综合评价与对应分析. *中国草地学报*, 2019, 41(5): 33–39.
- [21] Hou W F, Qi G Q, He L Z, *et al.* Comparative study on nutritional composition of eight native leguminous forage in Xing'an League. *Feed Research*, 2023, 46(12): 135–138.
侯伟峰, 其格其, 何刘柱, 等. 兴安盟8种乡土豆科牧草营养成分比较研究. *饲料研究*, 2023, 46(12): 135–138.
- [22] Peng Y, Ma S J, Sun J Y, *et al.* Comprehensive character evaluation of 12 wild legume forage germplasm in Tibet. *Pratacultural Science*, 2021, 38(12): 2429–2439.
彭艳, 马素洁, 孙晶远, 等. 西藏12份野生豆科牧草种质资源综合性状评价. *草业科学*, 2021, 38(12): 2429–2439.
- [23] Zhang F F, Yu L, Zhang Q B, *et al.* Comprehensive assessment of the main legume forages' nutritional value of natural mowing steppe in Shaertao Mountain, Zhaosu, Xinjiang. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(10): 1907–1915.
张凡凡, 于磊, 张前兵, 等. 沙尔套山天然割草场主要豆科牧草营养价值综合评价研究. *新疆农业科学*, 2014, 51(10): 1907–1915.
- [24] Yang R Q, Mu Z X, Huang M T, *et al.* Construction of ecological security pattern of Tarim River Basin based on ecosystem sustainability. *Environmental Science*, (2025-02-07)[2025-06-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202410268>.
杨荣钦, 穆振侠, 黄婉婷, 等. 基于生态系统可持续的塔里木河流域生态安全格局构建. *环境科学*, (2025-02-07)[2025-06-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202410268>.
- [25] Xiong M Q, Liu X H, Zhang X H, *et al.* Spatio-temporal variation of soil conservation in the upper reaches of the Tarim River Basin based on the RUSLE model. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 641–650.
熊茂秋, 刘晓煌, 张雪辉, 等. 基于RUSLE模型的塔里木河流域上游土壤保持时空变化研究. *地质通报*, 2024, 43(4): 641–650.
- [26] Li L, Zhou Z L, Lv R H, *et al.* Soil physical and chemical properties of desert riparian forest in different areas of the Tarim River. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(11): 75–78, 87.
李荔, 周正立, 吕瑞恒, 等. 塔里木河流域荒漠河岸林土壤理化性质. *东北林业大学学报*, 2015, 43(11): 75–78, 87.
- [27] Lu Q, Wang J H, Chu J M. *China desert plant map*. Beijing: China Forestry Publishing, 2012.
卢琦, 王建和, 褚建民. *中国荒漠植物图鉴*. 北京: 中国林业出版, 2012.
- [28] Chen M J, Jia S X. *Chinese forage plants*. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
陈默君, 贾慎修. *中国饲用植物*. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [29] Chen S. *Grassland forage plant resources in China*. Shenyang: Liaoning Ethnic Publishing House, 1994.
陈山. *中国草地饲用植物资源*. 沈阳: 辽宁民族出版社, 1994.
- [30] National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook 2001–2022*. Beijing: China Statistics Press, 2001–2022.
国家统计局. *2001–2022年中国统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2001–2022.
- [31] Li J X, Liu Y Z, Ge G, *et al.* Study on the flora of seed plants in Jimpenshan Nature Reserve, Jiangxi Province. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(11): 2322–2331.
李健星, 刘以珍, 葛刚, 等. 江西金盆山自然保护区种子植物区系研究. *西北植物学报*, 2016, 36(11): 2322–2331.
- [32] Zhang D J. Evaluation on types and quality of natural grassland in Hainan Prefecture of Qinghai Province using forage nutrients by PCA method. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2011(9): 11–14.

- 张东杰. 基于 PCA 方法以牧草营养成分评判青海省海南州天然草地类型质量初探. 草业与畜牧, 2011(9): 11—14.
- [33] Tian B, Ma C, Geng Y W, *et al.* Evaluation of feeding value of different forage nutrients based on principal component analysis. *Feed Industry*, 2024, 45(7): 15—19.
田斌, 马超, 耿怡雯, 等. 基于主成分分析法评价不同牧草营养成分饲用价值. 饲料工业, 2024, 45(7): 15—19.
- [34] Xin Y C. The analysis of nutrition ingredient of grass in Qinghai natural grassland. *Qinghai Prataculture*, 2011, 20(1): 26—31, 9.
辛玉春. 青海天然草地牧草营养成分分析. 青海草业, 2011, 20(1): 26—31, 9.
- [35] Hou L F, Tang J W. Analysis of pastures' nutrition component in Qinghai Province by principal component. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2018, 39(2): 42—44.
侯留飞, 唐俊伟. 青海省天然草地牧草营养成分的主成分分析. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(2): 42—44.
- [36] An S Z. The content of elite wild herbage on the natural grassland in Xinjiang. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 1992(3): 15—20.
安沙舟. 新疆天然草地优良野生牧草名录. 八一农学院学报, 1992(3): 15—20.
- [37] An S Z. The saline forage resources on natural grassland in Xinjiang. *Chinese Journal of Grassland*, 1995(5): 73—77.
安沙舟. 新疆天然草地盐生牧草资源. 中国草地, 1995(5): 73—77.
- [38] Zhang H H, Jiang W L, Zhang X Z, *et al.* Investigation and collection of wild forage germplasm resources in Xinjiang. *Grass-Feeding Livestock*, 2015(4): 61—70.
张荟荟, 姜万利, 张学洲, 等. 新疆野生牧草种质资源的调查与搜集. 草食家畜, 2015(4): 61—70.
- [39] Ma Y B, Xu Z, Zhao L X, *et al.* Investigation and collection of wild forage germplasm resources in northern Xinjiang. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2007(11): 29—34.
马玉宝, 徐柱, 赵来喜, 等. 新疆北疆地区野生牧草种质资源的考察与搜集. 草业与畜牧, 2007(11): 29—34.
- [40] Zuriguli·Youliwas, Dong Z G, Zhang B. Utilization and development of wild forage germplasm resources in Xinjiang. *Agricultural Development & Equipments*, 2016(4): 44.
祖日古丽·友力瓦斯, 董志国, 张博. 新疆野生牧草种质资源的利用与开发. 农业开发与装备, 2016(4): 44.
- [41] Jazibira. Research overview of natural forage resources in Xinjiang. *Contemporary Animal Husbandry*, 2016(14): 35.
孜比拉. 新疆天然牧草资源研究概况. 当代畜牧, 2016(14): 35.
- [42] Li S S. Study on floristics of vascular plants and plant resources in Beita Mountain of Xinjiang. Shihezi: Shihezi University, 2017.
李珊珊. 新疆北塔山地区植物区系与植物资源研究. 石河子: 石河子大学, 2017.
- [43] Saul·Abai Khan, Yimamu·Aishan. A brief study on natural forage resources in Xinjiang. *Grass-Feeding Livestock*, 2007(3): 51—52.
沙吾列·阿拜汗, 衣马木·艾山. 新疆天然牧草资源研究概况. 草食家畜, 2007(3): 51—52.
- [44] Zhang Y L, Yifu Layin·Yusufu, Marzia, *et al.* Collection and screening of wild forage germplasm resources in Xinjiang. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2017(2): 63—66, 83.
张云玲, 依甫拉音·玉素甫, 玛尔孜亚, 等. 新疆豆科野生优良牧草种质资源搜集及筛选. 草学, 2017(2): 63—66, 83.
- [45] Sui Y, Cui Q G, Dong M, *et al.* Contrasting responses of legume versus non-legume shrubs to soil water and nutrient shortages in the Mu Us Sandland. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(4): 268—274.
- [46] Duan X B. Research and protection on the wild plant resources of Ebinur Lake watershed in Xinjiang. Wulumuqi: Xinjiang University, 2011.
段小兵. 新疆艾比湖流域植物资源研究及其保护. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011.
- [47] Maestre F T, Cortina J, Bautista S, *et al.* Small scale environmental heterogeneity and spatiotemporal dynamics of seedling survival in a degraded semiarid ecosystem. *Ecosystems*, 2003(6): 630—643.
- [48] Lou A R. Ecological gradient analysis and environmental interpretation of mountain vegetation in the middle section of Tianshan Mountains. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1998(4): 77—85.
娄安如. 天山中段山地植被的生态梯度分析及环境解释. 植物生态学报, 1998(4): 77—85.
- [49] Feng Y, Zhang Y M, Pan B R. Grassland types with environmental relations in middle zone of northern slope of Tianshan Mountains. *Arid Land Geography*, 2006(2): 237—242.
冯纛, 张元明, 潘伯荣. 天山北坡中段草地类型的生态梯度组合格局与环境分析研究. 干旱区地理, 2006(2): 237—242.
- [50] Li K H, Hu Y K, Fan Y G, *et al.* Influence of environmental factors on distribution of plant communities and composition of species in alpine grassland. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007(4): 378—382.
李凯辉, 胡玉昆, 范永刚, 等. 环境因子对高寒草地植物群落分布和物种组成的影响. 中国农业气象, 2007(4): 378—382.

- [51] Wang X D. Distribution characteristics of plant communities and response to soil environmental factors in Shangduhe National Wetland Park, Zhenglanqi. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
王旭东. 正蓝旗上都河国家湿地公园植物群落分布特征对土壤环境因子的响应. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [52] Liu X H, Zhang Q Q, Zhang G P, *et al.* Analysis of spatial distribution and influencing factors of plant communities in the lower reaches of the Tarim River. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(10): 131–144.
刘星宏, 张青青, 张广鹏, 等. 塔里木河下游植物群落空间分布及影响因素分析. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 131–144.
- [53] Xu N, Yao Y L, Wang M, *et al.* Spatial distribution of plant communities and environmental interpretation in Xinjiang Bayanbulak marsh. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(2): 409–419.
徐娜, 姚艳玲, 王铭, 等. 新疆巴音布鲁克高寒沼泽湿地植物群落空间分布与环境解释. 湖泊科学, 2017, 29(2): 409–419.
- [54] Qi D H. Types and characteristics of plant communities in the Otingdag Sandy Land. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2023.
齐丹卉. 浑善达克沙地植被特征和分布格局. 北京: 中国林业科学研究院, 2023.
- [55] Aoguganmuqier, Tergeresayhan, Suyalatu, *et al.* Investigation and analysis of wild forage plant resource in nomadic grazing system of Arhorqin pastures—a case study of Hundleng summer base. *Chinese Wild Plant Resources*, 2017, 36(2): 66–69, 84.
敖古干牧其尔, 特日格勒赛罕, 苏亚拉图, 等. 阿鲁科尔沁草原游牧系统野生饲用植物资源调查分析——以浑德伦夏营盘为例. 中国野生植物资源, 2017, 36(2): 66–69, 84.
- [56] Duan D X, Gao C M, Wu T. Analysis on the composition of wild forage plant resources in Yellow River Delta. *Chinese Wild Plant Resources*, 2022, 41(4): 80–82, 89.
段代祥, 高春明, 吴涛. 黄河三角洲地区野生饲用植物资源构成分析. 中国野生植物资源, 2022, 41(4): 80–82, 89.
- [57] Meng Y, Dong J J, Ma Z C, *et al.* Research on wild forage resources in the area along the highway of Kalasu port in Xinjiang. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(19): 108–111, 124.
孟岩, 董俊俊, 马占仓, 等. 新疆卡拉苏口岸公路沿线区域野生饲用植物资源研究. 黑龙江畜牧兽医, 2022(19): 108–111, 124.
- [58] Liu J, Liu Y, Yan P, *et al.* Analysis of the composition of wild forage plant resources in low-mountain deserts of the upper and middle reaches of the Manas River in Xinjiang. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019(5): 98–103.
刘佳, 刘鸯, 阎平, 等. 新疆玛纳斯河中上游低山荒漠区野生饲用植物资源构成分析. 黑龙江畜牧兽医, 2019(5): 98–103.
- [59] Zheng K, Gu H R, Shen Y X, *et al.* Evaluation system of forage quality and research advances in forage quality breeding. *Pratacultural Science*, 2006(5): 57–61.
郑凯, 顾洪如, 沈益新, 等. 牧草品质评价体系及品质育种的研究进展. 草业科学, 2006(5): 57–61.
- [60] Li Y Q, Xu M Y, Wang Z H, *et al.* Research advances in evaluation of forage quality. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008(11): 4485–4486, 4546.
李艳琴, 徐敏云, 王振海, 等. 牧草品质评价研究进展. 安徽农业科学, 2008(11): 4485–4486, 4546.
- [61] Wang D F, Han Y, Yuan C, *et al.* Conventional nutrient contents of 120 wild forages from southwest karst mountainous areas and their clustering analysis. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(8): 5255–5269.
王德凤, 韩勇, 袁超, 等. 西南喀斯特山区120种野生牧草的常规营养成分含量及其聚类分析. 动物营养学报, 2022, 34(8): 5255–5269.
- [62] Xing H C, Jie Y C, Kang W L, *et al.* Botanical traits and nutrient composition analysis of 97 forage germplasm resources in Gramineae//Grassland Supervision Center, Ministry of Agriculture, China Grassland Society. 2009 China Grassland Development Forum Proceedings. Hefei: Ramie Research Institute, Hunan Agricultural University, College of Life Science and Technology, Hunan Agricultural University, 2009: 487–496.
邢虎成, 揭雨成, 康万利, 等. 禾本科97份牧草种质资源植物学性状观察及营养成分分析//农业部草原监理中心, 中国草学会. 2009中国草原发展论坛论文集. 合肥: 湖南农业大学苧麻研究所, 湖南农业大学生命科学技术学院, 2009: 487–496.
- [63] Wuyungaowa, Wu Y L, Yu H M, *et al.* Analysis of nutritional components of six gramineous forages in Hulun Buir, Inner Mongolia. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2017, 38(2): 50–52.
乌云高娃, 吴艳玲, 余红梅, 等. 内蒙古呼伦贝尔地区6种禾本科牧草营养成分分析. 畜牧与饲料科学, 2017, 38(2): 50–52.