

DOI: 10.5846/stxb201404160738

潘影, 余成群, 土艳丽, 孙维, 罗黎鸣, 苗彦军, 武俊喜. 西藏草地植物功能性状与多项生态系统服务关系探讨. 生态学报, 2015, 35(20): - .
Pan Y, Yu C Q, Tu Y L, Sun W, Luo L M, Miao Y J, Wu J X. Study on the relationship between plant functional traits and multiple ecosystem services in a Tibetan grassland ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

西藏草地植物功能性状与多项生态系统服务关系探讨

潘影¹, 余成群^{1,2}, 土艳丽³, 孙维^{1,2}, 罗黎鸣^{2,4}, 苗彦军⁴, 武俊喜^{1,2,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 西藏自治区高原生物研究所, 拉萨 850001

4 西藏大学农牧学院, 林芝 860000

摘要: 针对植被功能性状与生态系统服务功能之间的相互关系, 本文构建了西藏草地株高和可食性两种功能性状的 9 项指标, 并基于土壤和植物采样, 分析了 9 项植物功能性状指标和 5 项生态系统服务指标间的相关性, 初步探讨了 4 种机制 (Mass ratio, Selection, Niche complementarity 及 Insurance) 在西藏草地的适用性。结果表明, 9 项功能性状指标中, 株高 *Rao* 和可食种与所有种株高 *CWM* 比分别分别与土壤有机碳、土壤全氮和土壤含水率三项生态系统服务指标呈显著负相关及显著正相关。说明群落植被对光能竞争的互补性及可食性状植株在群落中的光能资源相对竞争力, 与土壤固碳、肥力供给及水源涵养有显著相关关系。而群落可食种、优势种、优势种与次优势种对光能资源竞争力水平, 可食植株多样性、可食植株在群落中的优势度及其光能资源竞争力均值, 对草地生态系统服务无显著影响。西藏草地植物功能性状对多项生态系统服务的影响机制从光能资源竞争角度更符合 Niche complementarity 和 Insurance 理论, 而从可食功能性状角度更符合 Mass ratio 和 Selection 理论。

关键词: 西藏; 植物功能性状; 生态系统服务; 机理

Study on the relationship between plant functional traits and multiple ecosystem services in a Tibetan grassland ecosystem

PAN Ying¹, YU Chengqun^{1,2}, TU Yanli³, SUN Wei^{1,2}, LUO Lilong^{2,4}, MIAO Yanjun⁴, WU Junxi^{1,2,*}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Tibet Plateau Institute of Biology, Lhasa 850001, China

4 Agricultural and Animal Husbandry College of Tibet University, Linzhi 860000, China

Abstract: We studied the relationships among plant functional traits and multiple ecosystem services. Nine indicators of plant functional traits of plant heights and palatability were established, which were *Rao* index of plant heights, the community weighted mean value (*CWM*) of plant heights of all species, the *CWM* of plant heights of dominant species, the *CWM* of plant heights of dominant and subdominant species, the richness of palatable plants, the richness ratio of palatable species to all species, the ratio of palatable biomass to total biomass, the *CWM* of plant heights of palatable species, and the *CWM* of the ratio of heights of palatable plants to all plant species. The ecosystem services we analyzed included forage supply, soil carbon stocks, soil fertilization supply, water regulation, and soil retention. Further, we attempted to test four candidate mechanisms by which plant functional traits influence ecosystem services. These were: 1) mass ratio, 2)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (31200364); 国家科技支撑计划项目 (2011BAD17B05); “西部之光”人才培养计划项目 (20100309); 西藏生态专项 (Z2012C07G03)

收稿日期: 2014-04-16; **网络出版日期:** 2014-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wujx@igsrr.ac.cn

selection, 3) niche complementarity, and 4) insurance. In 2012, we collected soil and vegetation samples from Xincang village, Lhasa, Tibet. Ecosystem services and plant functional traits were quantified based on these samplings. Pearson correlations were calculated among the nine functional traits, as well as between the functional traits and ecosystem services. The results showed that among the functional traits, the *Rao* index of plant heights was significant negatively correlated with soil organic carbon, soil total nitrogen, and soil water content. The ratio of the *CWM* of the heights of palatable plants to all plant species was significant positively correlated with soil organic carbon, soil total nitrogen, and soil water content. However, the *CWM* of the plant heights of all species, palatable species, dominant species, dominant and subdominant species, as well as the richness of palatable species, the ratio of the palatable specie richness to all species, and the ratio of palatable biomass to all species, were not significantly correlated with any of the ecosystem services. Our results demonstrated that the niche complementarity of the light captures of the plant community has negative impacts on ecosystem soil carbon stock, fertilization provisioning, and water regulating services. However, the relative niche competitiveness of light captures of palatable plants in the community has positive impacts on ecosystem soil carbon stock, fertilization provisioning, and water regulating services. The results imply, from the perspective of resource competitiveness, the concepts of niche complementarity and insurance best characterize the mechanisms by which plant functional traits determine ecosystem services in grassland. However, from the perspective of palatability, the concepts of mass ratio and selection are more reasonable.

Key Words: Tibet; plant functional traits; ecosystem services; mechanisms

植物与环境相互作用的漫长进化过程,形成了植物多样性;这些多样性改变了生态系统的过程与功能,影响着生态系统服务^[1-4]。研究表明,生物多样性对生态系统功能与服务的影响多由植物性状(Plant traits)的变化引起;这些植物性状也被称为植物功能性状(Plant functional traits)^[5,6]。植物功能性状对生态系统功能与服务影响的基础研究在土地利用、气候变化对生态系统功能与服务影响的模拟^[7-9]以及生态规划及区域评价中都有所应用^[10-13]。

国际上针对植物功能性状对生态系统功能与服务的影响提出了几种理论,包括 Mass ratio, Selection, Niche complementarity 及 Insurance^[6]。Mass ratio 理论最早针对功能性状及多样性对生态系统初级生产力影响的研究^[14],后扩展到生态系统功能^[6]。Mass ratio 理论认为在某个特定时间断面,生态系统功能主要由其优势种功能性状决定,而与次优势种和一些生物量较小物种无关^[6,14]。Selection 理论与 Mass ratio 大体一致,表示生态系统功能主要由群落中生物量最大的优势种的功能性状决定,与其他生物量较小物种无关^[15]。

而 Niche complementarity 理论是指群落中不同生态位植物能够增强群落的资源利用率,从而提高群落生物量,影响生态系统功能^[15]。而 Insurance 理论表示,在群落中,一些非优势种,甚至稀有种,能够在群落的生态系统功能供给方面提供“缓冲”作用,缓冲降雨、温度、病原体等生物、环境因子变化对群落生态功能的影响^[16]。

四种理论在不同区域、不同生态系统有不同适用性,对这种适用性的研究有助于理解当地气候环境因子-植物群落-生态系统功能服务的相互联系和影响,指导当地生态系统恢复及生态系统功能与服务提升^[17-19]。本文拟利用西藏草地土壤、植被采样数据,研究西藏草地植物典型功能性状对草地多功能的影响及四种理论的适用性。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

新仓村(29°29'—30°02'N, 91°15'—91°41'E)隶属于西藏自治区拉萨市达孜县,位于拉萨河流域的藏南谷地下游南岸。研究区域平均海拔 4500 m,年均温 7.5 °C,年均日照时数 3065 h,年均降水 450 mm,降水多集中

在植物生长季 6—9 月。采样区域土壤类型包括亚高山草甸草原土、亚高山灌丛草甸土、高山草甸土,植被类型包括亚高山草甸草原、亚高山灌丛草甸、高山草甸。

1.2 研究方法

本文选取株高及可食性两种功能性状,分析其功能性状差异性(Functional divergence, FDvg) 和功能性状均值(A community weighted mean value, CWM)^[6]。在此基础上构建了 9 项指标(表 1),其中群落株高功能性状差异性、可食性功能性状差异性参数反映植株功能性状在群落生态位的多样性,用以验证 niche complementarity 及 insurance 理论在西藏草地的适用性。所有种、优势及次优势种株高功能性状均值及可食性功能性状优势度用于分析优势种、次优势种等与多功能的相关性,用以验证 mass ratio 和 selection 理论在西藏草地的适用性。本文选取了地上可食生物量、土壤有机碳、土壤全氮、土壤含水率、植被覆盖度 5 项指标定量生态系统服务,研究不同功能性状指标与生态系统服务之间的关系。具体参数见表 1。

表 1 植物功能性状对多项生态系统服务影响机制分析参数

Table 1 The tested ecological parameters of the impacting mechanisms of plant functional traits on ecosystem services

指标类型 Types	生态参数 Ecological parameters	指标 Indicators	生态学意义 Ecological explanations
植物功能性状	群落株高功能性状差异性	株高 Rao *	群落植株对光能资源竞争的互补性
Plant functional traits	所有种株高功能性状均值	所有种株高 CWM * *	群落植株对光能资源竞争力水平
	优势种株高功能性状均值	优势种株高 CWM	群落优势种植株对光能资源竞争力水平
	优势与次优势种株高功能性状均值	优势与次优势种株高 CWM	群落优势种与次优势种植株对光能资源竞争力水平
	可食性功能性状差异性	可食性种丰富度	具有可食性状植株的多样性
	可食性功能性状优势度	可食种丰富度占总种丰富度比例	具有可食性状植株在群落中的优势度
		可食种生物量比例	具有可食性状植株在群落中的优势度
		可食种株高 CWM	具有可食性状植株的光能资源竞争力水平
		可食种与所有种株高 CWM 比	具有可食性状植株在群落中的光能资源相对竞争力
生态系统服务	载畜支持服务	可食性种地上生物量	牦牛、羊等可食牧草量的潜力
Ecosystem services	碳固定服务	土壤有机碳	土壤固碳能力
	土壤肥力供给服务	土壤全氮	支持植株生长
	水源涵养服务	土壤含水率	降水调节
	土壤保持服务	总盖度	减少风蚀和水蚀

* Rao 为功能性状差异性指数,** CWM(A community weighted mean value) 为功能性状均值指数。

功能性状差异性由 Rao 指数定量,计算公式如下:

$$Rao = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s d_{ij} p_i p_j \tag{1}$$

式中, s 为群落中物种数, p_i 、 p_j 为第 i 、 j 个物种在群落种的相对盖度, d_{ij} 为物种 i 和 j 之间某种性状的差额。

功能性状均值由 CWM 指数定量,计算公式如下:

$$CWM = \sum_{i=1}^s d_i p_i \tag{2}$$

式中, s 为群落中物种数, p_i 为第 i 个物种在群落种的相对盖度, d_i 为物种 i 功能性状值。

1.3 数据来源

本文数据样品于 2012 年 7 月采集于西藏拉萨市达孜县新仓村山坡草地,海拔梯度从 3949 m 至 4940 m,沿坡底到坡顶共设 15 个 5 m× 5m 样地,每个样地中随机选取 3 个面积为 0.5 m×0.5 m 的样方重复。物种的

株高、盖度和多度现场记录,地上生物量齐地面分种刈割,于实验室 65 ℃ 烘干 48 h 称重^[20,21]。并在刈割后的样方挖剖面环刀取土,测定含水量,土钻取土测定有机碳、全氮。本文的植株可食性是针对牦牛、山羊、绵羊及马,假设一种或一种以上牲畜采食该种草,则该草可食。为了减少牲畜啃食对植株高度的影响,在测量植株高度时,仅选取叶片完整的植株进行测量。

2 研究结果

2.1 西藏草地植物功能性状的相互联系

在株高与可食性两个功能性状的 9 项指标中,有 6 项指数相互呈显著相关(图 1)。其中所有种、优势种、优势种与次优势种株高 CWM 指标两两之间呈显著正相关;说明某群落优势种和次优势种对光能资源竞争力越强,整个群落光能资源竞争水平越高。

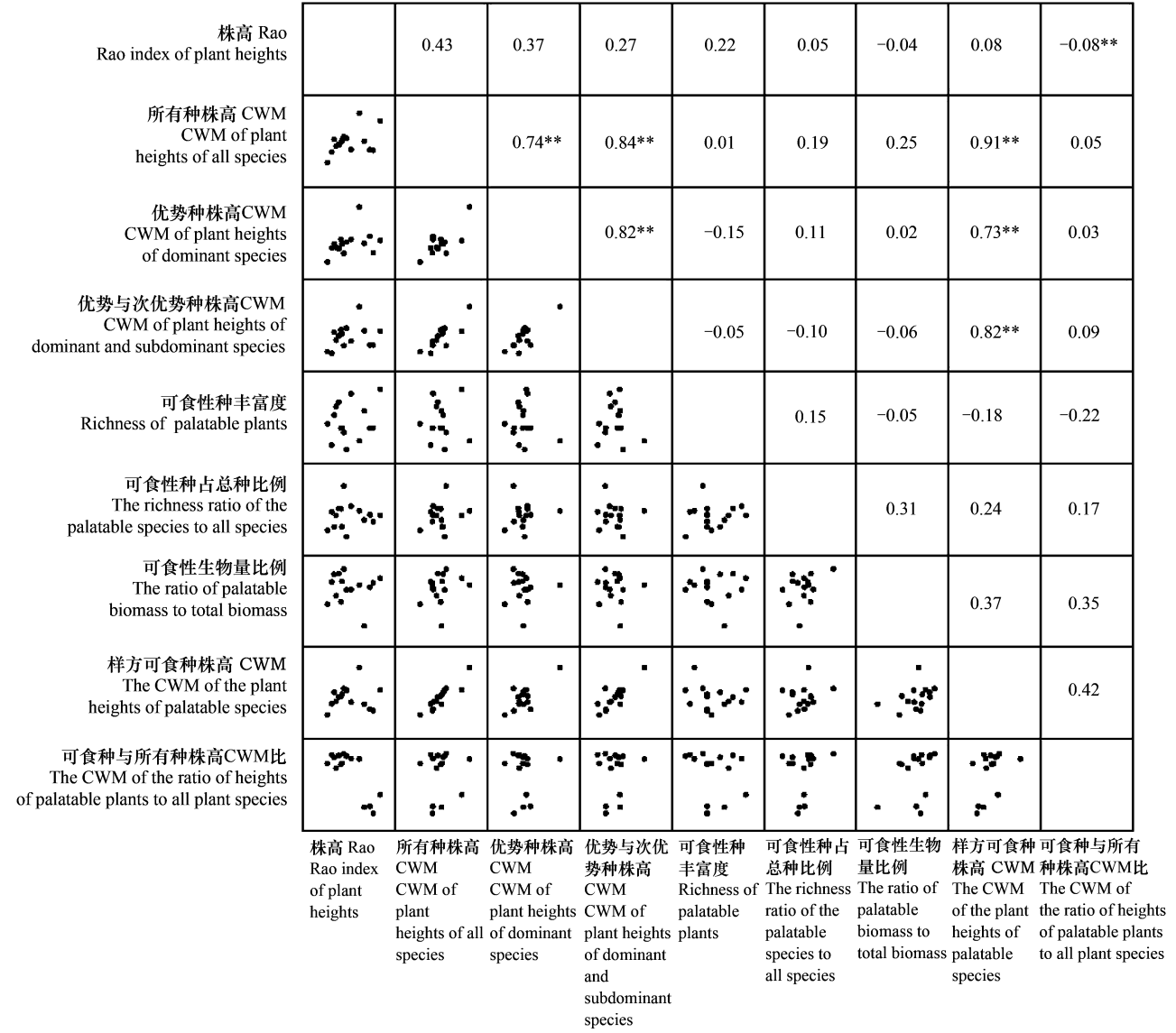


图 1 草地植物功能性状指数皮尔逊相关性

Fig.1 Pearson correlation of the pairs of indicators of the plant functional traits

点图为散点图,数字为皮尔逊相关系数,其中 * * 代表在 0.01 水平显著相关

株高 Rao 指数和可食种与所有种株高 CWM 比指标呈显著负相关;说明可食性物种在群落中对光能资源

竞争力越高,群落植物对光能资源竞争互补性越低,或者说群落株高功能性状趋同。

可食性种 *CWM* 分别与所有种、优势种、优势种与次优势种株高 *CWM* 呈显著正相关关系;主要由于新仓村草地群落大部分由可食性种建群。

可食性种的丰富度与株高相关指标无显著相关关系,说明群落可食性功能性状的差异性与群落植株对光能资源竞争力无明显关系。

2.2 西藏草地植物功能性状与多项生态系统服务的相互影响关系

9 项植物功能性状指标中,株高 *Rao*、可食种与所有种株高 *CWM* 比两项指标与土壤有机碳、土壤全氮和土壤含水率三项生态系统服务指标显著相关(图 2、表 2)。其中株高 *Rao* 与土壤有机碳、土壤全氮、土壤含水率呈显著负相关,说明群落植被对光能竞争互补性越强,则对土壤中养分、水分等资源有更多利用,导致土壤有机碳、全氮和含水率的降低。

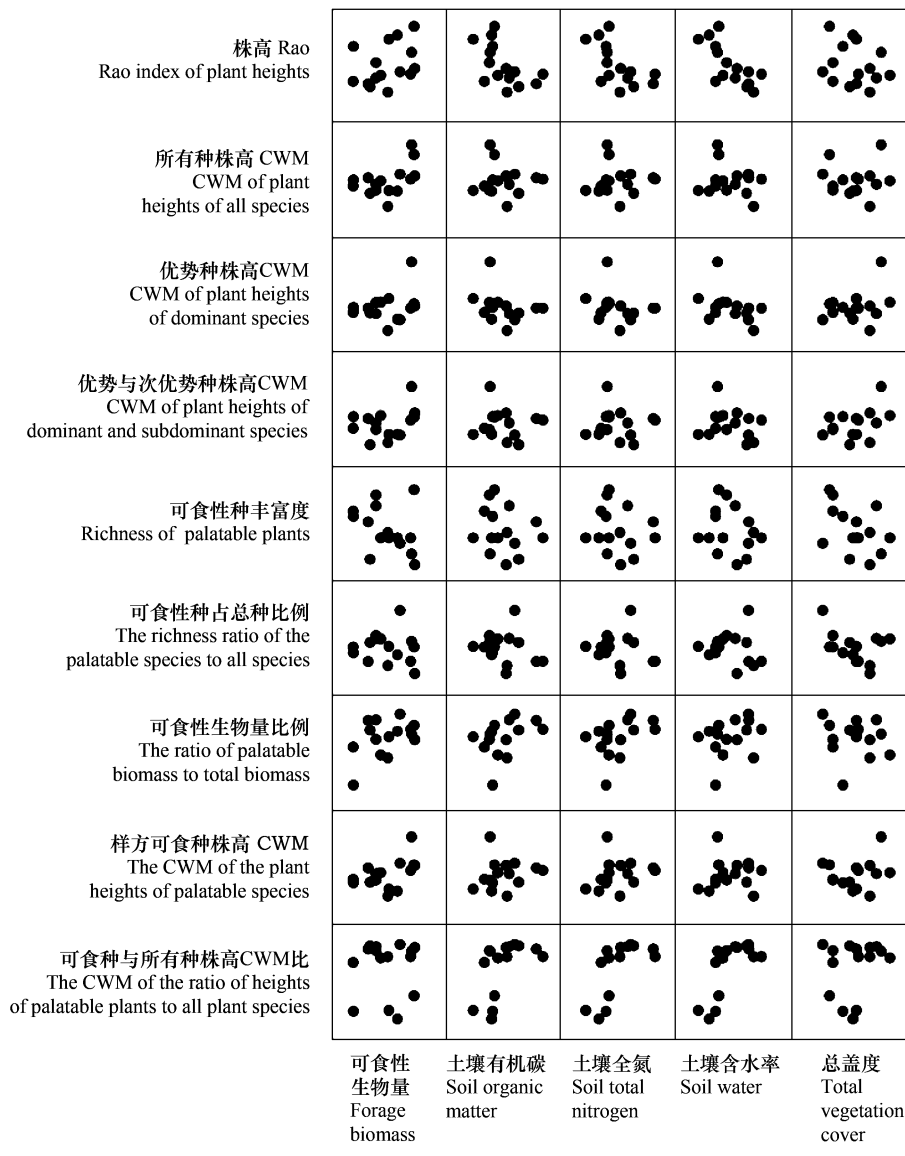


图 2 植物功能性状指标与生态系统服务指标散点图

Fig.2 Scatter diagrams of the plant functional traits and ecosystem services

可食种与所有种株高 *CWM* 比和土壤有机碳、土壤全氮、土壤含水率呈显著正相关,说明具有可食性状植株在群落中的光能资源相对竞争力,与土壤有机碳、全氮和含水量的保持有显著正相关关系。

所有种、优势种、优势种与次优势种、可食种株高 *CWM*,可食种丰富度、可食种占总种比例、可食生物量比

例 7 项指标与生态系统服务的 5 项指标皆无显著相关关系。说明群落植株包括可食种、优势种、优势种与次优势种对光能资源竞争力水平,具有可食性状植株的多样性、具有可食性状植株在群落中的优势度和其光能资源竞争力均值,对草地生态系统服务无显著影响。

表 2 植物功能性状指标与生态系统服务指标皮尔逊相关性
Table 2 Pearson coefficients of the plant functional traits and ecosystem services

植物功能性状指标 Plant functional traits	可食性生物量 Forage biomass	土壤有机碳 Soil organic matter	土壤全氮 Soil total nitrogen	土壤含水率 Soil water	总盖度 Total vegetation cover
株高 <i>Rao</i> <i>Rao</i> index of plant heights	0.36	-0.57 *	-0.61 *	-0.73 **	-0.24
所有种株高 <i>CWM</i> <i>CWM</i> of Plant heights of all species	0.49	-0.03	0.02	-0.17	0.02
优势种株高 <i>CWM</i> <i>CWM</i> of Plant heights of dominant species	0.28	-0.29	-0.24	-0.40	0.30
优势与次优势种株高 <i>CWM</i> <i>CWM</i> of Plant heights of dominant and subdominant species	0.32	-0.06	-0.02	-0.21	0.40
可食性种丰富度 Richness of palatable plants	-0.34	-0.21	-0.16	-0.22	-0.43
可食性种占总种比例 The richness ratio of the palatable species to all species	-0.10	-0.20	-0.14	-0.12	-0.35
可食生物量比例 The ratio of palatable biomass to total biomass	0.44	0.39	0.42	0.29	-0.14
样方可食种株高 <i>CWM</i> The <i>CWM</i> of the plant heights of palatable species	0.46	0.16	0.23	0.08	0.17
可食种与所有种株高 <i>CWM</i> 比 The <i>CWM</i> of the ratio of heights of palatable plants to all plant species	0.03	0.54 *	0.62 *	0.71 **	0.22

* 在 0.05 水平显著相关, * * 在 0.01 水平显著相关

3 讨论

3.1 植物功能性状指标和生态系统服务指标选取

本文选取了株高和可食性两项植物功能性状,株高是反映植株对光能资源的竞争力较成熟的指标^[6,7,12,13],同样比叶面积(Specific leaf area)和叶片氮含量(Leaf nitrogen content)也能反映植株光能资源竞争力^[5,7]。由于研究区域和问题的不同,可食性性状在很多国际研究中被忽视^[5,22,23],但由于西藏当地牧民的生产生活和其生态安全屏障功能同样重要^[24],可食性功能性状在西藏草地研究中尤为值得关注。除了株高和可食性两种功能性状外,还有很多功能性状,如叶片磷含量、叶片光合速率、植株生殖高度、根密度、凋落物碳氮含量等,可以反映群落的健康水平、繁殖能力、碳氮等营养物质循环^[5,25,26]。这些功能性状都与生态系统服务相关^[27]。生态系统水源涵养功能与水循环过程有关,其中地表植被、枯落物层及土壤的最大持水力、土壤的降雨入渗率、地表蒸散率等都是重要参数。草地土壤持水占草地生态系统持水的大部分,而小尺度上,本研究选取的土壤含水率可以反映一定时间断面水循环的状态,从一定程度上区别不同生态系统水源涵养功能。

3.2 西藏草地植物功能性状对多项生态系统服务的影响机制理论

Mass ratio, Selection 理论和 Niche complementarity 及 Insurance 理论的较大分歧点是在群落中的一些非优势种和稀有种对生态系统功能是否有影响。

本研究结果表明,株高功能性状差异性对多项生态系统服务有显著影响,而无论是优势种、次优势种或全部种的株高性状均值对生态系统服务皆无显著影响。这意味着,西藏草地生态系统服务与植株株高差异程度

有关,而与优势种或次优势种等的株高功能性状相对水平无关。本研究结果表明,西藏草地从光能资源竞争角度,其植物功能性状对多项生态系统服务的影响更加符合 Niche complementarity 和 Insurance 理论。

而西藏草地可食性功能性状对多项生态系统服务的影响机制与株高性状不同。可食性功能性状的指标更多程度上反映的是群落中可食种与不可食种的种间竞争和对环境的适应性。本研究结果表明,在反映可食性功能性状优势度与生态系统服务联系方面,可食种与所有种株高 *CWM* 较丰富度比例、生物量比例更加适合本研究。可食性种的优势度,或更进一步描述,是可食性种在群落中对光能的竞争力与草地生态系统服务显著相关。而可食性种间的多样性或株高差异性对生态系统服务并无显著影响。西藏草地可食性功能性状对多项生态系统服务的影响更加符合 Mass ratio 和 Selection 理论。

4 结论

本文利用株高、可食性两个植物功能性状的 9 项指标与 5 项生态系统服务指标的统计分析,能够较好反映西藏草地植物功能性状与多项生态系统服务的相关性;同时也初步印证了 Mass ratio, Selection, Niche complementarity 及 Insurance 理论在西藏草地生态系统的适用性。对于可食性功能性状,前两种理论更加适用,而对于株高功能性状后两种理论更加适用。结果表明,西藏植株光能竞争的生态位差异及可食性种优势度与草地生态系统服务供给显著相关,而群落优势种、次优势种等的光能竞争水平及可食性种多样性与草地生态系统服务供给无关。

参考文献 (References):

- [1] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543):804-808.
- [2] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10):1146-1156.
- [3] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2007, 448(7150):188-190.
- [4] Mace G M, Norris K, Fitter A H. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology and Evolution*, 2012, 27(1):19-26.
- [5] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets U, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428(6985):821-827.
- [6] Diaz S, Lavorel S, de Bello F, Quetier F, Grigulis K, Robson T M. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52):20684-20689.
- [7] Quetier F, Thebault A, Lavorel S. Plant traits in a state and transition framework as markers of ecosystem response to land-use change. *Ecological Monographs*, 2007, 77(1):33-52.
- [8] Soudzilovskaia N A, Elumeeva T G, Onipchenko V G, Shidakov I I, Salpagarova F S, Khubiev A B, Tekeev D K, Cornelissen J H C. Functional traits predict relationship between plant abundance dynamic and long-term climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(45):18180-18184.
- [9] Geijzendorffer I R, Roche P K. Can biodiversity monitoring schemes provide indicators for ecosystem services? *Ecological Indicators*, 2013, 33:148-157.
- [10] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28):9495-9500.
- [11] Anderson B J, Armsworth P R, Eigenbrod F, Thomas C D, Gillings S, Heinemeyer A, Roy D B, Gaston K J. Spatial covariance between biodiversity and other ecosystem service priorities. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(4):888-896.
- [12] Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, Colace M P, Garden D, Girel J, Pellet G, Douzet R. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2010, 99(1):135-147.
- [13] Lavorel S, Grigulis K. How fundamental plant functional trait relationships scale-up to trade-offs and synergies in ecosystem services. *Journal of*

- Ecology, 2012, 100(1):128-140.
- [14] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 1998, 86(6):902-910.
- [15] Cardinale B J, Wright J P, Cadotte M W, Carroll I T, Hector A, Srivastava D S, Loreau M, Weis J J. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(46):18123-18128.
- [16] Diaz S, Fargione J, Chapin F S III, Tilman D. Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biology*, 2006, 4(8):e277.
- [17] 王平, 盛连喜, 燕红, 周道玮, 宋彦涛. 植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能. *生态学报*, 2010, 30(24):6990-7000.
- [18] 龚时慧, 温仲明, 施宇. 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应. *生态学报*, 2011, 31(20):6088-6097.
- [19] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山不同演替阶段森林植物功能性状及其与地形因子间的关系. *生态学报*, 2014, (20). (未出版刊物)
- [20] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Diaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, ter Steege H, Morgan H D, van der Heijden M G A, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4):335-380.
- [21] Perez-Harguindeguy N, Diaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte M S, Cornwell W K, Craine J M, Gurvich D E, Urcelay C, Veneklaas E J, Reich P B, Poorter L, Wright I J, Ray P, Enrico L, Pausas J G, de Vos A C, Buchmann N, Funes G, Quetier F, Hodgson J G, Thompson K, Morgan H D, ter Steege H, van der Heijden M G A, Sack L, Blonder B, Poschlod P, Vaieretti M V, Conti G, Staver A C, Aquino S, Cornelissen J H C. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2013, 61(3):167-234.
- [22] Grigulis K, Lavorel S, Krainer U, Legay N, Baxendale C, Dumont M, Kastl E, Arnoldi C, Bardgett R D, Poly F, Pommier T, Schloter M, Tappeiner U, Bahn M, Clément J C. Relative contributions of plant traits and soil microbial properties to mountain grassland ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1):47-57.
- [23] Maestre F T, Quero J L, Gotelli N J, Escudero A, Ochoa V, Delgado-Baquerizo M, García-Gómez M, Bowker M A, Soliveres S, Escolar C, García-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Gozalo B, Gallardo A, Aguilera L, Arredondo T, Blones J, Boeken B, Bran D, Conceição A A, Cabrera O, Chaieb M, Derak M, Eldridge D J, Espinosa C I, Florentino A., Gaitón J, Gatica M G, Ghiloufi W, Gómez-González S, Gutiérrez J R, Hernández R M, Huang X, Huber-Sannwald E, Jankju M, Miriti M, Moneris J, Mau R L, Morici E, Naseri K, Ospina A, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramírez-Collantes D A, Romão R, Tighe M, Torres-Díaz C, Val J, Veiga J P, Wang D, Zaady E. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in Global Drylands. *Science*, 2012, 335(6065):214-218.
- [24] Yu C, Zhang Y, Claus H, Zeng R, Zhang X, Wang J. Ecological and environmental issues faced by a developing Tibet. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(4):1979-1980.
- [25] Jiang J, Li Y, Wang M, Zhou C, Cao G, Shi P, Song M. Litter species traits, but not richness, contribute to carbon and nitrogen dynamics in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2):931-941.
- [26] Butterfield B J, Suding K N. Single-trait functional indices outperform multi-trait indices in linking environmental gradients and ecosystem services in a complex landscape. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1):9-17.
- [27] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境和生态系统功能. *植物生态学报*, 2007, 31(1):150-165.