

新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征及其与环境因子的关系

白悦莹^{a,b}, 许仲林^{a,b,①}, 徐昕亿^{a,b}

(新疆大学: a. 地理与遥感科学学院, b. 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 按照固氮能力和形态特征, 将新疆伊犁天山北坡草本植物群落划分为禾草、杂草和豆科 3 个功能群, 对各功能群植物叶片的 N、P 含量及 N/P 比进行比较, 并采用相关性分析和冗余分析 (RDA) 对各指标与环境因子 (包括气候、海拔和土壤因子) 的关系进行分析。结果表明: 新疆伊犁天山北坡草本植物群落总体叶片 N、P 含量分别为 29.02 和 3.21 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, N/P 比为 10.02。3 个功能群间叶片 N 含量差异显著 ($P < 0.05$), 以豆科功能群叶片 N 含量最高, 禾草功能群叶片 N 含量最低; 豆科功能群和杂草功能群叶片 P 含量显著高于禾草功能群; 豆科功能群叶片 N/P 比显著大于其他 2 个功能群。总体上看, 豆科功能群叶片 N 含量和 N/P 比均最高, 且 P 含量也较高, 各指标的变异系数均最小; 而禾草功能群叶片 N、P 含量均最低, N/P 比也较低, 各指标的变异系数均最大。相关性分析结果显示: 禾草功能群叶片 N 含量随年均降水量 (MAP) 的升高而升高, 呈显著正相关; 杂草功能群叶片 N 含量随年均温 (MAT) 的升高而升高, 呈显著正相关, P 含量则随 MAP 的升高而降低, 呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关; 群落总体叶片 P 含量也随 MAP 的升高而降低, 呈显著负相关。冗余分析结果表明: 禾草功能群叶片 N、P 含量及 N/P 比受 MAP 的影响最大; 杂草功能群、豆科功能群和群落总体叶片 N、P 含量及 N/P 比受土壤全氮含量的影响最大。综合分析结果表明: 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群植物的生长均受 N 限制; 不同功能群植物叶片 N、P 化学计量特征对环境因子的响应程度存在明显差异, 表明各功能群的养分利用方式不同。总体上看, 年均降水量、海拔和土壤全氮含量是影响新疆伊犁天山北坡 3 个功能群和群落总体化学计量特征的主要环境因子。

关键词: 新疆伊犁天山北坡; 草本植物群落; 功能群; N、P 化学计量特征; 环境因子

中图分类号: Q948.11; Q948.15 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2022)04-0037-13

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.04.05

Leaf N and P stoichiometry characteristics and their relationships with environmental factors of different functional groups in herb community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang BAI Yueying^{a,b}, XU Zhonglin^{a,b,①}, XU Xinyi^{a,b} (Xinjiang University: a. College of Geography and Remote Sensing Sciences, b. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Urumqi 830017, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2022, 31(4): 37-49

Abstract: The herb community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang was divided into three functional groups namely grass, forb, and legume according to nitrogen fixation capacity and morphological characteristics, the contents of N and P and N/P ratio of leaves of each functional group were compared, and correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were used to analyze the relationships between each index and environmental factors (containing climate, altitude, and soil factors). The results show that the contents of N and P in leaves of total herb community at northern slope

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划 (XJEDU2020Y008)

作者简介: 白悦莹 (1995—), 女, 河北武安人, 硕士研究生, 主要从事植物生态化学计量研究。

①通信作者 E-mail: zlxu@xju.edu.cn

引用格式: 白悦莹, 许仲林, 徐昕亿. 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征及其与环境因子的关系 [J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(4): 37-49.

of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang are 29.02 and 3.21 g · kg⁻¹ respectively, and the N/P ratio is 10.02. There are significant ($P < 0.05$) differences in leaf N content among three functional groups, the legume functional group has the highest leaf N content, while the grass functional group has the lowest leaf N content; the leaf P contents of legume and forb functional groups are significantly higher than that of grass functional group; the leaf N/P ratio of legume functional group is significantly higher than those of the other two functional groups. In general, the leaf N content and N/P ratio of legume functional group are the highest, its P content is also relatively high, and the variation coefficient of each index is the smallest; while the contents of N and P in leaves of grass functional group are the lowest, the N/P ratio is also relatively low, and the variation coefficient of each index is the largest. The correlation analysis result shows that the leaf N content of grass functional group increases with the increase of annual mean precipitation (MAP), which shows a significant positive correlation; the leaf N content of forb functional group increases with the increase of annual mean temperature (MAT), which shows a significant positive correlation, and the P content decreases with the increase of MAP, which shows an extremely significant ($P < 0.01$) negative correlation; the leaf P content of total community also decreases with the increase of MAP, which shows a significant negative correlation. The result of redundancy analysis shows that the contents of N and P and N/P ratio of leaves of grass functional group are mostly affected by MAP, those of forb functional group, legume functional group, and total community are mostly affected by soil total nitrogen content. The comprehensive analysis result shows that the plant growth of different functional groups in herb community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang is restricted by N; the responses of leaf N and P stoichiometry characteristics of different functional groups to environmental factors are evidently different, indicating that the nutrient utilization pattern of each functional group is different. In general, annual mean precipitation, altitude, and soil total nitrogen content are the important environmental factors affecting the stoichiometry characteristics of three functional groups and total community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang.

Key words: northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang; herb community; functional group; N and P stoichiometry characteristics; environmental factor

生态化学计量学常用于研究各类生态系统养分循环及限制性特征^[1-11]。功能群作为连接植被结构与生态系统功能的桥梁,其空间分布格局势必对陆地生态系统的结构和功能产生影响^[12]。目前,国内外学者已从不同角度对植物叶片养分含量及其影响因子展开研究。He 等^[13]研究表明:草本植物叶片 N、P 含量与水热条件无明显相关性;Reich 等^[14]认为,随气温降低,草本植物叶片 N、P 含量增加;刘旻霞等^[7]和于海玲等^[15]通过研究植物不同功能群对养分利用效率的差异性,发现这类差异性常体现在植物叶片 N、P 化学计量特征上;相关研究结果^[10,16-19]还表明:植物叶片的 N、P 含量受诸多土壤因子影响。

目前,关于草本植物生态化学计量特征的研究主要集中在生活型^[5]、群落特征^[6]、与土壤养分的关系^[8]以及放牧强度^[11]等方面,且研究对象局限于草本植物群落的整体特性。探讨不同功能群植物叶片化学计量特征有利于掌握各功能群植物的养分限制特征及其对环境因子的响应,可为研究气候变化对草本植物群落养分吸收和利用效率的影响奠定基础。

为此,作者以新疆伊犁天山北坡草本植物群落为

研究对象,依据固氮能力和形态特征对草本植物群落进行功能群划分,对比不同功能群植物叶片的 N 和 P 化学计量特征及其对环境因子的响应规律和差异性,并探讨 N 和 P 化学计量指标与环境因子的关系,从而为新疆伊犁天山北坡草本植物群落的保护以及该区域生物多样性的维持提供基础研究资料。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁天山北坡,地理坐标为东经 80°45'46"~84°49'32"、北纬 42°43'10"~44°41'13",海拔 900~3 500 m。该区属温带大陆性气候和高山气候,年降水量 100~600 mm,且随季节变化,降水集中在 5 月至 6 月。土壤类型为山地棕钙土、山地栗钙土、灰褐色森林土、亚高山草甸土和高山草甸土等。

研究区植被类型多样,包括山地荒漠草原、山地草原、山前灌木、山地针叶林、亚高山灌丛草甸、高山草甸等。植物种类丰富,按照恩格勒分类系统,根据植物的形态特征及固氮能力可将研究区内的草本植

物群落划分为禾草、杂草和豆科3个功能群。其中,禾草功能群主要包含狗尾草[*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.]、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes* Trin.)和白颖薹草[*Carex duriuscula* subsp. *rigescens* (Franch.) S. Y. Liang et Y. C. Tang]等21种(含亚种和变种)植物;杂草功能群主要包含猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、高乌头(*Aconitum sinomontanum* Nakai)和野罂粟(*Papaver nudicaule* Linn.)等91种(含亚种和变种)植物;豆科功能群主要包含野苜蓿(*Medicago falcata* Linn.)和野豌豆(*Vicia sepium* Linn.)等8种豆科(Fabaceae)植物。3个功能群的植物种类组成见附录I。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和样品采集 于2018年7月至8月,根据草本植物生长分布区和地形状况,在研究区内随机选取草本植物生长良好的样地60块,样地面积均为20 m×20 m,供试样地的基本情况见表1。用手持GPS(GPSMAP62sc,上海佳明航电企业管理有限公司)记录每块样地的经度、纬度和海拔。在每块样地内按“S”形设置5个面积1 m×1 m的样方,记录每个样方内草本植物的多度、高度和盖度,确定4或5个优势种;根据根、茎、叶、花和果等形态特征,对照《新疆植物志》对优势种进行分类鉴定,并拍照和记录。

表1 新疆伊犁天山北坡供试样地的基本情况¹⁾

Table 1 Basic situation of test plots at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang¹⁾

编号 No.	经度 Longitude	纬度 Latitude	Alt/m	MAP/mm	MAT/°C	WC _s /%	BD _s	OC _s	pH _s	CEC _s	TN _s
1	E84°47'57"	N44°04'40"	1 845	265.30	2.04	16.07	1 374.29	20.6	7.03	41.17	5.26
2	E84°47'54"	N44°04'41"	1 886	265.30	2.04	16.07	1 374.29	20.6	7.03	41.17	5.26
3	E84°48'20"	N44°06'17"	1 803	256.27	2.59	16.53	1 350.57	25.8	7.44	36.17	4.34
4	E84°48'23"	N44°06'18"	1 762	256.27	2.59	16.53	1 357.57	29.0	7.49	34.67	4.34
5	E84°48'24"	N44°06'18"	1 752	256.27	2.59	16.53	1 357.57	29.0	7.49	34.67	4.35
6	E84°49'31"	N44°07'03"	1 640	236.65	3.78	15.87	1 415.43	15.0	7.61	36.67	3.23
7	E84°49'32"	N44°07'05"	1 622	236.65	3.78	16.27	1 411.29	14.6	7.69	37.17	3.23
8	E84°49'30"	N44°07'09"	1 586	236.65	3.78	16.47	1 402.86	14.6	7.66	37.67	3.23
9	E84°49'30"	N44°07'10"	1 574	236.65	3.78	16.47	1 402.86	14.6	7.66	37.67	3.23
10	E84°26'37"	N43°46'03"	2 920	372.83	3.54	19.33	1 240.14	59.4	7.27	50.33	5.30
11	E84°27'10"	N43°46'41"	2 701	336.65	1.89	19.47	1 205.71	64.0	7.34	47.00	5.28
12	E84°28'06"	N43°48'03"	2 525	334.33	1.77	18.87	1 254.43	50.8	7.43	47.17	5.23
13	E84°42'52"	N44°04'10"	1 745	205.60	5.67	16.13	1 389.43	29.4	7.59	40.50	3.69
14	E84°23'02"	N43°39'09"	2 403	295.58	0.03	18.93	1 195.29	39.2	7.23	40.67	5.40
15	E84°26'45"	N43°42'32"	3 061	390.97	4.40	17.80	1 077.86	114.8	6.33	48.50	4.64
16	E84°26'40"	N43°42'56"	3 209	405.63	5.01	17.93	1 102.86	105.0	6.46	50.33	4.43
17	E84°03'43"	N43°43'26"	2 080	284.48	0.85	16.93	1 240.00	73.6	6.84	36.00	7.99
18	E84°25'09"	N43°43'44"	3 456	436.61	6.26	17.07	1 151.00	104.8	6.46	53.50	4.18
19	E84°42'52"	N44°04'10"	1 745	205.60	5.67	16.13	1 389.43	29.4	7.59	40.50	3.69
20	E84°24'03"	N44°41'13"	2 838	142.52	9.97	16.47	1 478.29	12.8	8.34	46.67	2.39
21	E84°02'07"	N43°43'12"	2 034	267.80	1.73	16.93	1 228.71	82.4	6.79	34.83	6.54
22	E84°21'53"	N43°21'54"	2 115	247.07	2.10	18.00	1 268.71	56.8	7.33	38.83	7.19
23	E84°23'00"	N43°22'19"	2 275	268.14	0.94	17.67	1 281.00	51.8	7.11	42.33	5.22
24	E84°23'08"	N43°24'53"	2 566	337.48	2.37	17.20	1 175.14	102.6	6.67	41.00	4.66
25	E84°26'26"	N43°27'16"	3 200	383.07	4.36	16.00	1 110.14	101.8	5.56	45.17	4.46
26	E84°38'31"	N44°14'47"	2 070	183.18	7.33	16.87	1 469.29	9.4	8.21	34.00	1.95
27	E84°40'51"	N43°13'48"	2 127	250.04	1.62	16.87	1 289.14	78.2	6.73	38.50	7.69
28	E84°14'51"	N43°17'26"	1 613	203.78	4.52	17.73	1 317.71	47.8	7.43	39.33	5.12
29	E84°09'14"	N43°18'32"	1 528	196.43	5.05	17.33	1 353.86	41.4	7.41	34.00	3.86
30	N83°11'33"	N43°18'47"	1 495	228.18	4.29	15.93	1 353.14	46.2	7.30	26.67	5.11
31	N83°10'59"	N43°18'50"	1 283	246.58	3.36	16.27	1 345.00	38.0	7.50	28.00	8.03
32	E82°43'31"	N43°04'19"	1 768	252.80	3.64	16.87	1 299.57	56.2	6.73	38.17	6.18
33	E82°40'27"	N43°05'22"	1 671	237.55	4.55	14.47	1 396.57	53.6	7.23	28.50	5.78

续表1 Table 1 (Continued)

编号 No.	经度 Longitude	纬度 Latitude	Alt/m	MAP/mm	MAT/°C	WC _s /%	BD _s	OC _s	pH _s	CEC _s	TN _s
34	E83°10'59"	N43°18'50"	1 283	246.58	3.36	16.27	1 345.00	38.0	7.50	28.00	8.03
35	E82°32'36"	N43°05'05"	2 456	350.24	0.46	14.20	1 410.00	37.4	6.96	34.00	7.10
36	E82°31'09"	N43°05'31"	1 564	239.58	4.82	16.13	1 311.57	65.0	6.89	31.83	7.49
37	E82°31'11"	N43°05'44"	1 501	224.34	5.59	15.87	1 322.71	62.8	7.06	32.33	8.55
38	E82°01'29"	N43°03'01"	1 998	302.16	3.21	15.60	1 385.14	28.4	7.47	31.17	3.14
39	E82°08'58"	N43°03'05"	2 456	350.24	0.46	14.20	1 410.00	37.4	6.96	34.00	4.37
40	E82°08'35"	N43°04'26"	2 385	320.30	2.01	16.13	1 272.14	59.6	6.56	33.67	7.55
41	E80°45'46"	N42°53'57"	1 936	307.50	5.08	15.27	1 367.43	42.0	7.56	36.83	2.84
42	E81°16'16"	N43°08'31"	1 775	340.55	4.20	15.87	1 362.43	39.0	7.59	26.17	3.40
43	E81°11'43"	N43°13'21"	2 353	386.81	2.01	17.60	1 282.57	47.8	6.89	42.83	5.65
44	E81°48'37"	N43°16'31"	1 415	268.40	5.71	15.53	1 442.43	12.4	7.90	31.17	2.33
45	E81°03'57"	N42°43'10"	1 960	339.13	2.98	17.20	1 302.29	41.6	7.17	35.83	3.70
46	E81°02'55"	N42°44'32"	1 985	333.95	3.36	16.53	1 352.29	32.0	7.44	30.67	4.02
47	E81°07'35"	N43°12'49"	2 030	386.25	2.20	17.13	1 328.57	35.2	7.29	41.17	3.96
48	E81°07'06"	N43°13'40"	2 120	381.70	2.56	15.80	1 301.29	47.2	6.96	35.67	5.57
49	E81°01'37"	N43°23'05"	3 178	479.69	3.09	17.73	1 209.86	79.6	6.00	41.17	5.38
50	E81°02'40"	N43°23'31"	3 042	480.05	3.13	18.27	1 136.86	94.0	5.83	43.17	3.98
51	E81°02'47"	N43°24'26"	2 838	142.52	9.97	16.47	1 478.29	12.8	8.34	46.67	2.39
52	E81°03'30"	N43°25'33"	2 573	436.44	0.65	17.07	1 223.71	73.2	6.24	43.33	4.18
53	E81°04'56"	N43°26'33"	2 120	406.56	1.17	15.47	1 327.71	38.2	6.70	33.83	5.67
54	E81°05'46"	N43°27'29"	2 233	412.30	0.81	15.80	1 334.57	41.2	7.13	27.50	3.97
55	E81°07'04"	N43°28'51"	2 015	378.04	2.76	15.73	1 346.71	30.8	7.36	34.00	5.73
56	E81°06'56"	N43°29'27"	1 763	373.04	3.01	15.80	1 365.43	30.6	7.36	30.50	4.18
57	E81°10'31"	N44°27'03"	1 924	394.89	0.80	16.40	1 301.14	50.4	6.77	40.00	5.15
58	E81°09'56"	N44°27'31"	1 845	265.30	2.04	16.07	1 374.29	20.6	7.03	41.17	5.26
59	E84°33'11"	N44°07'24"	1 953	265.43	2.11	15.93	1 313.43	52.4	6.51	35.50	7.57
60	E84°40'57"	N44°08'57"	1 376	220.26	4.80	16.40	1 429.71	21.6	8.19	36.50	3.62

¹⁾ Alt: 海拔 Altitude; MAP: 年均降水量 Annual mean precipitation; MAT: 年均温 Annual mean temperature; WC_s: 土壤含水量 Water content of soil; BD_s: 土壤容重 Bulk density of soil ($\text{cg} \cdot \text{cm}^{-3}$); OC_s: 土壤有机碳含量 Organic carbon content of soil ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); pH_s: 土壤 pH 值 pH value of soil; CEC_s: 土壤阳离子交换量 Cation exchange capacity of soil ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$); TN_s: 土壤全氮含量 Total nitrogen content of soil ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

在每个样方中采集优势草本种类的新鲜叶片不少于 30 g, 共涉及 120 种草本植物的 499 份样品, 每种植物 3 个重复。根据恩格勒分类系统中的科属排序, 并依据固氮能力和形态特征将草本植物划分为禾草、杂草和豆科 3 个功能群, 即禾草功能群 82 份样品、杂草功能群 377 份样品和豆科功能群 40 份样品; 将每块样地同一功能群的植物样品混匀。

1.2.2 样品前处理 将上述叶片样本置于烘箱中, 于 105 °C 杀青 30 min, 然后于 70 °C 烘干至恒质量; 冷却后研磨成粉, 过 100 目筛后用于 N、P 含量测定。

1.2.3 元素含量测定 叶片 N、P 含量测定由兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。用电子天平 (精度 0.1 mg) 分别称取叶片样品粉末 0.05 g, 参照张山泉等^[20]的方法, 用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮样品, 用 Smartchem 200 全自动间断化学分析仪 (法国 ALLIANCE 公司) 测定 N、P 含量, 每个样品重复测定

2 次。根据测量结果计算 N/P 比以及群落总体的 N、P 含量及 N/P 比 (所有样品的均值)。

1.3 数据处理和统计分析

研究区内的年均温与年均降水量数据来自于 WorldClim 数据集 (<https://worldclim.org>)^[21], 土壤理化指标数据来源于土壤网格数据集 (Soil Grids 250 m, <https://soilgrids.org/>), 且均为成品数据; 采用 Arcgis 10.2 软件将样地与土壤理化因子、年均温和年均降水量对应, 经掩膜提取后得到对应数据。

采用 EXCEL 2010 软件进行数据整理; 采用 Origin 2019 软件进行拟合关系制图, 对不同功能群草本植物叶片 N、P 含量及 N/P 比与年均温和年均降水量进行回归分析。

选取气候因子与土壤理化因子作为环境因子, 包括年均温 (MAT)、年均降水量 (MAP)、海拔 (Alt)、土壤含水量 (WC_s)、土壤 pH 值 (pH_s)、土壤容重

(BD_s)、土壤阳离子交换量(CEC_s)、土壤有机碳(OC_s)和土壤全氮含量(TN_s);采用CANOCO 5软件分析草本植物叶片N、P化学计量特征与环境因子的关系;在此基础上,通过蒙特-卡洛检验评价叶片N、P化学计量特征变化的显著性,不同功能群草本植物N、P化学计量特征与上述环境因子的变异膨胀系数均小于20,说明这些环境因子可作为环境因子变量进行分析。此外,对不同功能群N、P化学计量特征与环境因子进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),采用CANOCO 5软件计算环境因子对不同功能群N、P化学计量特征的贡献率等参数^[22]。

2 结果和分析

2.1 不同功能群叶片N、P化学计量特征比较

新疆伊犁天山北坡草本植物群落中禾草、杂草和豆科3个功能群叶片N、P含量及N/P比见表2。结果表明:新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片N含量均远高于P含量;N、P含量的变异系数均在20%以上,N含量的变异系数均小于P含量,表明叶片N、P含量的变异较大,且叶片P含量的波动

幅度大于N含量。从3个功能群的比较看,豆科功能群的N、P含量及N/P比的变异系数均最小,而禾草功能群3个化学计量指标的变异系数均最大,表明豆科功能群的N、P含量及N/P比变异均较小。

由表2还可见:在新疆天山北坡草本植物群落中,N、P含量在不同功能群间存在不同程度的差异。N含量在不同功能群间差异显著($P<0.05$),其中,豆科功能群N含量最高,禾草功能群N含量最低;豆科功能群与杂草功能群的P含量无显著差异,但二者显著高于禾草功能群的P含量;豆科功能群的N/P比最大,显著大于另2个功能群,但另2个功能群的N/P比无显著差异。总体上看,豆科功能群的N含量和N/P比均最高,且P含量也较高;而禾草功能群的N、P含量均最低,N/P比也较低。

从草本植物群落总体的指标看,群落总体叶片N、P含量分别为29.02和3.21 $g \cdot kg^{-1}$,N/P比为10.02。群落总体N含量显著低于豆科功能群,显著高于禾草功能群,但与杂草功能群无显著差异;群落总体P含量显著高于禾草功能群,但与另2个功能群无显著差异;群落总体N/P比显著低于豆科功能群,但与另2个功能群无显著差异。

表2 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片N、P含量及其化学计量比的比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on contents of N and P in leaves and their stoichiometric ratio of different functional groups in herb community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

功能群 Functional group	N含量/($g \cdot kg^{-1}$) N content	P含量/($g \cdot kg^{-1}$) P content	N/P比 N/P ratio
禾草 Grass	21.90 \pm 7.96c * (36.34%)	2.50 \pm 1.23b * (49.28%)	9.79 \pm 3.94b (40.27%)
杂草 Forb	29.49 \pm 9.72b (32.95%)	3.37 \pm 1.42a (42.18%)	9.74 \pm 3.71b (38.08%)
豆科 Legume	39.16 \pm 8.70a * (22.23%)	3.17 \pm 1.06a (33.62%)	13.13 \pm 3.28a * (24.96%)
总体 Total	29.02 \pm 10.21 (35.19%)	3.21 \pm 1.40 (43.63%)	10.02 \pm 3.82 (38.14%)

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一指标在不同功能群间差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference in the same index among different functional groups; *: 不同功能群与群落总体间差异显著($P<0.05$) The difference between different functional groups and total community is significant ($P<0.05$). 括号中百分数为变异系数 Percentages in brackets are the coefficients of variation.

2.2 不同功能群叶片N、P含量与年均温和年均降水量的相关性

新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片N、P含量与年均降水量和年均温的相关方程见表3。结果显示:所有功能群叶片N、P含量与年均温和年均降水量均呈一元线性回归关系。

禾草功能群叶片N含量随年均温的升高而降低,呈不显著负相关;叶片P含量随年均温的升高而升高,呈不显著正相关;叶片N含量随年均降水量的

升高而升高,呈显著($P<0.05$)正相关;叶片P含量则随年均降水量的升高而降低,呈不显著负相关。

杂草功能群叶片N含量随年均温的升高而升高,呈显著正相关;叶片P含量也随年均温的升高而升高,呈不显著正相关;叶片N含量随年均降水量的升高而降低,呈不显著负相关;叶片P含量也随年均降水量的升高而降低,呈极显著($P<0.01$)负相关。

豆科功能群叶片N、P含量随年均温的升高而降低,均呈不显著负相关;其N含量随年均降水量的升

高而升高,呈不显著正相关;叶片 P 含量随年均降水量的升高而降低,呈不显著负相关。

新疆伊犁天山北坡草本植物群落总体叶片 N、P

含量均随年均温的升高而升高,呈不显著正相关;但 N、P 含量均随年均降水量的升高而降低,分别呈不显著和显著负相关。

表3 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 含量与年均温和年均降水量的相关性¹⁾

Table 3 Correlations between contents of N and P in leaves of different functional groups in herb community with annual mean temperature and annual mean precipitation at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang¹⁾

功能群 Functional group	N 含量与年均温的拟合方程 Fitted equation of N content with annual mean temperature	P 含量与年均温的拟合方程 Fitted equation of P content with annual mean temperature
禾草 Grass	$y_1 = -0.456 1x_1 + 22.832 7 (R = -0.178 3, P = 0.109 0)$	$y_2 = 0.015 8x_1 + 2.471 1 (R = 0.039 8, P = 0.722 9)$
杂草 Forb	$y_1 = 0.452 6x_1 + 28.526 5 (R = 0.123 3, P = 0.016 6)$	$y_2 = 0.039 7x_1 + 3.283 9 (R = 0.073 9, P = 0.152 2)$
豆科 Legume	$y_1 = -1.725 3x_1 + 44.447 3 (R = -0.272 1, P = 0.089 4)$	$y_2 = -0.188 3x_1 + 3.743 8 (R = -0.242 7, P = 0.131 3)$
总体 Total	$y_1 = 0.322 0x_1 + 28.313 0 (R = 0.083 9, P = 0.061 2)$	$y_2 = 0.030 2x_1 + 3.144 0 (R = 0.057 4, P = 0.200 6)$
功能群 Functional group	N 含量与年均降水量的拟合方程 Fitted equation of N content with annual mean precipitation	P 含量与年均降水量的拟合方程 Fitted equation of P content with annual mean precipitation
禾草 Grass	$y_1 = 0.027 9x_2 + 13.332 3 (R = 0.269 5, P = 0.014 3)$	$y_2 = -0.000 2x_2 + 2.557 3 (R = -0.010 9, P = 0.922 3)$
杂草 Forb	$y_1 = -0.008 5x_2 + 32.284 6 (R = -0.066 6, P = 0.197 1)$	$y_2 = -0.003 1x_2 + 4.417 0 (R = -0.171 1, P = 0.000 9)$
豆科 Legume	$y_1 = 0.019 6x_2 + 33.391 3 (R = 0.141 6, P = 0.383 3)$	$y_2 = -0.003 1x_2 + 4.100 6 (R = -0.187 3, P = 0.247 0)$
总体 Total	$y_1 = -0.001 3x_2 + 29.441 0 (R = -0.009 7, P = 0.828 4)$	$y_2 = -0.002 1x_2 + 3.899 7 (R = -0.116 2, P = 0.009 3)$

¹⁾ y_1 : N 含量 N content; y_2 : P 含量 P content; x_1 : 年均温 Annual mean temperature; x_2 : 年均降水量 Annual mean precipitation.

2.3 环境因子对草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征的影响

2.3.1 N、P 化学计量特征与各环境因子的冗余分析

由于新疆伊犁天山北坡草本植物叶片 N、P 化学计量特征与年均温和年均降水量的相关性分析结果不足以说明草本植物叶片对环境因子的响应,故对 N、P 化学计量特征与各环境因子进行冗余分析,前 4 个排序轴的累计方差贡献率见表 4。

结果显示:新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征与环境因子关系的累计方差贡献率在轴 II 均达到 99% 以上,说明利用轴 I 和轴 II 能较为全面地解释环境因子对化学计量特征的影响。

表4 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征与环境因子关系的累计方差贡献率

Table 4 Cumulative percentage variance of leaf N and P stoichiometry characteristics of different functional groups with environmental factors in herb community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang

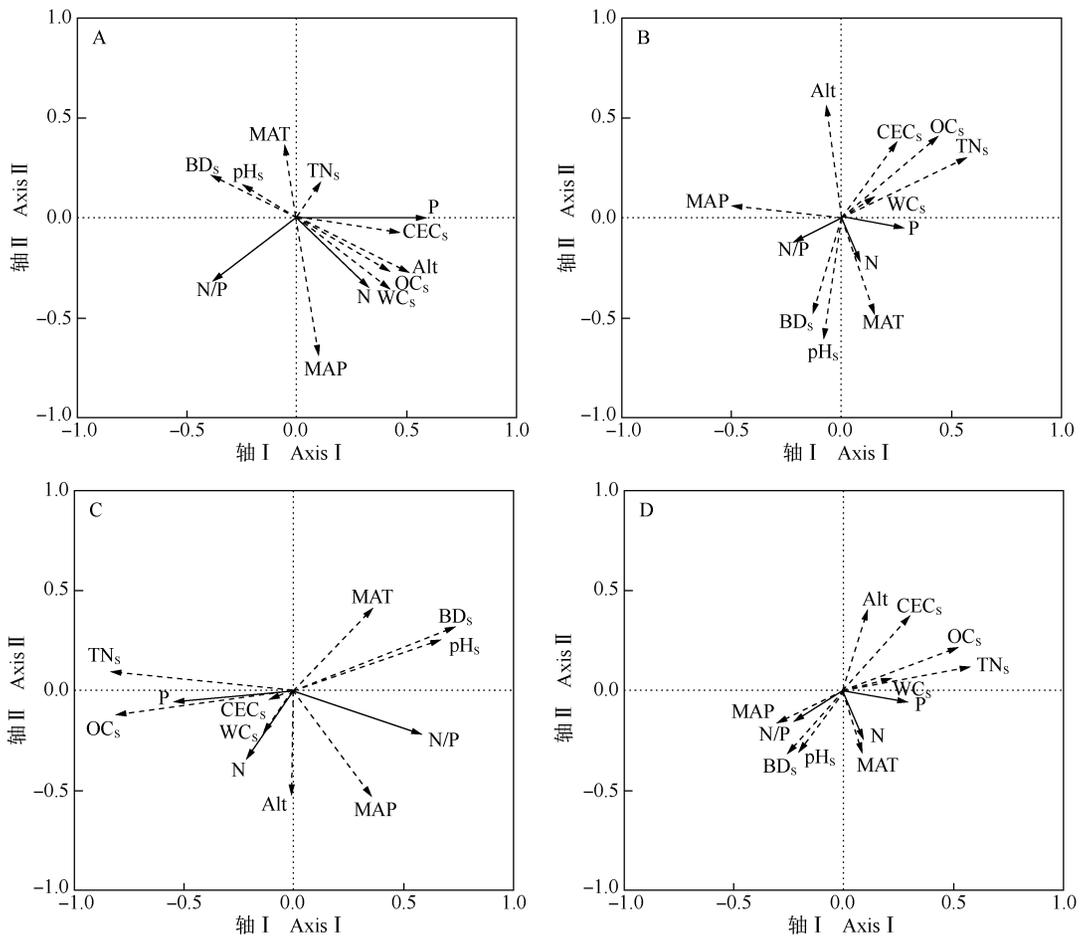
功能群 Functional group	各排序轴的累计方差贡献率/% Cumulative percentage variance of each axis			
	轴 I Axis I	轴 II Axis II	轴 III Axis III	轴 IV Axis IV
	禾草 Grass	71.45	99.95	100.00
杂草 Forb	65.57	99.97	100.00	100.00
豆科 Legume	82.58	99.99	100.00	100.00
总体 Total	61.00	99.96	100.00	100.00

2.3.2 N、P 化学计量特征与环境因子的关系

新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征与环境因子的 RDA 排序图见图 1。由图 1 可见:所有环境因子对禾草功能群、杂草功能群和豆科功能群叶片 N、P 化学计量特征有不同程度的影响。

由图 1-A 可见:在禾草功能群中,年均降水量 (MAP) 对叶片 N、P 含量及 N/P 比的影响最大,且均呈正相关;叶片 N 含量与土壤阳离子交换量 (CEC_s)、土壤有机碳含量 (OC_s)、土壤含水量 (WC_s)、海拔 (Alt) 和 MAP 均呈正相关,与土壤全氮含量 (TN_s)、土壤 pH 值 (pH_s)、土壤容重 (BD_s) 和年均温 (MAT) 均呈负相关;叶片 P 含量与 CEC_s、OC_s、WC_s、TN_s、Alt 和 MAP 均呈正相关,与 pH_s、BD_s 和 MAT 呈负相关;叶片 N/P 比与 BD_s、pH_s 和 MAP 均呈正相关,与 TN_s、CEC_s、OC_s、WC_s、Alt 和 MAT 均呈负相关。

由图 1-B 可见:在杂草功能群中,TN_s 是对叶片 N、P 含量及 N/P 比影响最大的环境因子,且与 P 含量呈正相关,与 N 含量和 N/P 比呈负相关;叶片 N 含量与 pH_s、BD_s 和 MAT 均呈正相关,与其他 6 个因子均呈负相关;叶片 P 含量与 pH_s、WC_s、OC_s、TN_s、CEC_s 和 MAT 均呈正相关,与 BD_s、Alt 和 MAP 均呈负相关;叶片 N/P 比与 BD_s、pH_s、MAP 和 MAT 均呈正相关,与其他因子均呈负相关。



A: 禾草功能群 Grass functional group; B: 杂草功能群 Forb functional group; C: 豆科功能群 Legume functional group; D: 总体 Total.

N: 叶片 N 含量 N content of leaf; P: 叶片 P 含量 P content of leaf; N/P: 叶片氮磷比 N/P ratio of leaf; OC_s: 土壤有机碳含量 Organic carbon content of soil; TN_s: 土壤全氮含量 Total nitrogen content of soil; pH_s: 土壤 pH 值 pH value of soil; WC_s: 土壤含水量 Water content of soil; BD_s: 土壤容重 Bulk density of soil; CEC_s: 土壤阳离子交换量 Cation exchange capacity of soil; Alt: 海拔 Altitude; MAT: 年均温 Annual mean temperature; MAP: 年均降水量 Annual mean precipitation.

图 1 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 1 RDA ordination diagram of leaf N and P stoichiometry characteristics of different functional groups with environmental factors in herb community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang

由图 1-C 可见: 在豆科功能群中, TN_s 是对叶片 N、P 含量以及 N/P 比影响最大的环境因子, 且与 N、P 含量均呈正相关, 与 N/P 比呈负相关; 叶片 N 含量与 CEC_s、WC_s、OC_s、TN_s、Alt 和 MAP 6 个因子均呈正相关, 与另 3 个因子呈负相关; 叶片 P 含量与 TN_s、OC_s、CEC_s、WC_s 和 Alt 5 个因子均呈正相关, 与另 4 个因子呈负相关; 叶片 N/P 比与 BD_s、pH_s、MAP、MAT 和 Alt 5 个因子均呈正相关, 与另 4 个因子呈负相关。

由图 1-D 可见: 对草本植物群落总体而言, TN_s 是对叶片 N、P 含量以及 N/P 比影响最大的环境因子, 且与 N、P 含量呈正相关, 与 N/P 比呈负相关, 这

一现象与豆科功能群一致; 叶片 N 含量与 pH_s、BD_s、TN_s、MAT 和 MAP 呈正相关, 与 CEC_s、OC_s 和 Alt 呈负相关, 而与 WC_s 不相关; 叶片 P 含量与 CEC_s、TN_s、WC_s、OC_s、Alt 和 MAT 呈正相关, 与 pH_s、BD_s 和 MAP 均呈负相关; 叶片 N/P 比则与 pH_s、BD_s、MAT 和 MAP 呈正相关, 与另 5 个因子呈负相关。

2.3.3 环境因子的重要性排序 依据贡献率就环境因子对不同功能群叶片 N、P 化学计量特征的重要性进行排序, 结果见表 5。

对禾草功能群叶片 N、P 化学计量特征而言, BD_s 和 MAP 2 个环境因子贡献率较高 (27.3% 和 20.0%) 且相关性极显著 ($P < 0.01$); Alt 的贡献率也较高

(20.6%),相关性达到显著($P < 0.05$)水平。对杂草功能群叶片 N、P 化学计量特征而言, TN_s 的贡献率最高(25.3%)且相关性极显著; MAP、Alt 和 OC_s 的贡献率也较高(分别为 16.6%、12.9%和 11.5%),相关性达到显著水平。对豆科功能群 N、P 化学计量特征而言, TN_s 的贡献率最高(63.8%)且相关性极显著;重要性排序前 3 位的是 TN_s 、 BD_s 和 MAP。除以上因

子外,其他环境因子对不同功能群 N、P 化学计量特征均具有不同程度的贡献率,但均无显著相关性。

对草本植物群落总体叶片 N、P 化学计量特征而言, TN_s 、 OC_s 、 CEC_s 和 MAT 均与之具有极显著的相关性,贡献率分别为 20.9%、20.5%、13.7%和 11.7%; BD_s 和 MAP 均与之具有显著相关性,贡献率分别为 10.7%和 10.8%。

表 5 新疆伊犁天山北坡环境因子对草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征的重要性排序及显著性检验结果

Table 5 Results of importance order and significance test of environmental factors to leaf N and P stoichiometry characteristics of different functional groups in herb community at northern slope of Tianshan Mountain in Ili of Xinjiang

重要性排序 Importance order	禾草功能群 Grass functional group				杂草功能群 Forb functional group			
	因子 ¹⁾ Factor ¹⁾	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value	因子 ¹⁾ Factor ¹⁾	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value
1	BD_s	27.3	7.2	0.002	TN_s	25.3	6.9	0.006
2	Alt	20.6	4.7	0.040	MAP	16.6	4.6	0.014
3	MAP	20.0	4.8	0.010	Alt	12.9	3.9	0.032
4	MAT	10.2	2.5	0.094	OC_s	11.5	3.2	0.038
5	WC_s	7.9	2.1	0.130	CEC_s	10.2	2.9	0.054
6	OC_s	7.7	2.1	0.106	pH_s	8.7	2.4	0.080
7	pH_s	4.1	1.1	0.334	MAT	6.4	1.8	0.182
8	TN_s	1.5	0.4	0.680	WC_s	4.6	1.3	0.250
9	CEC_s	0.7	0.2	0.840	BD_s	3.7	1.0	0.370

重要性排序 Importance order	豆科功能群 Legume functional group				总体 Total			
	因子 ¹⁾ Factor ¹⁾	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value	因子 ¹⁾ Factors ¹⁾	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value
1	TN_s	63.8	9.3	0.002	TN_s	20.9	7.8	0.002
2	BD_s	14.5	2.2	0.154	OC_s	20.5	7.9	0.002
3	MAP	4.4	0.6	0.492	CEC_s	13.7	5.2	0.006
4	OC_s	3.8	0.5	0.580	MAT	11.7	4.4	0.010
5	WC_s	3.1	0.4	0.646	BD_s	10.8	4.2	0.020
6	Alt	2.9	0.4	0.654	MAP	10.7	4.1	0.016
7	CEC_s	2.5	0.4	0.674	Alt	6.2	2.4	0.084
8	pH_s	2.5	0.4	0.678	WC_s	5.2	2.0	0.136
9	MAT	2.4	0.3	0.736	pH_s	0.4	0.1	0.892

¹⁾ OC_s : 土壤有机碳含量 Organic carbon content of soil; TN_s : 土壤全氮含量 Total nitrogen content of soil; pH_s : 土壤 pH 值 pH value of soil; WC_s : 土壤含水量 Water content of soil; BD_s : 土壤容重 Bulk density of soil; CEC_s : 土壤阳离子交换量 Cation exchange capacity of soil; Alt: 海拔 Altitude; MAT: 年均温 Annual mean temperature; MAP: 年均降水量 Annual mean precipitation.

3 讨论和结论

3.1 新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群 N、P 化学计量特征的差异

新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群叶片 N 含量远高于 P 含量,但 P 含量的变异系数却大于 N 含量,这一现象也存在于青藏高原^[15,23]、阿拉善荒漠^[24]和东北帽儿山^[25]的植物群落中,表明草本植物 P 含量具有一定的变异性。非豆科功能群植物叶

片的 N/P 比变异较小,而豆科功能群植物叶片的 N/P 比变异较大,表明非豆科功能群植物叶片 N/P 比相近,具有一定的稳定性;豆科功能群植物叶片 N/P 比较高,与豆科功能群植物具有较强的固氮作用有关^[15]。

本研究发现,新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群中,禾草功能群叶片 N、P 含量最低,豆科功能群叶片 N 含量最高,杂草功能群叶片 P 含量最高,表明不同功能群植物叶片对 N、P 的吸收和利用具有一定的差异性^[14,23,26]。在其他地区研究中也发现禾

草功能群植物叶片 N、P 含量较低^[7,15,25,27],从草本植物的生长和生理特性看,禾草功能群的植物根系发达,能快速吸收并利用土壤中的速效 N、P 等养分^[28,29],且相较于其他植物,禾草功能群的植物养分分配和利用效率较高,因此其自身 N、P 含量较低。此外,新疆伊犁天山北坡草本植物群落的优势种多为禾草功能群植物,较低的 N、P 含量有利于禾草功能群植物参与草地资源竞争。豆科功能群叶片 N 含量明显高于其他功能群,这与豆科功能群植物具有较强的根瘤固氮作用密不可分^[30],因此,豆科功能群植物对 N 的获取能力和使用效率较高。禾草功能群和杂草功能群叶片的 N/P 比相近,而豆科功能群叶片的 N/P 比较大,其与 He 等^[31]对中国草地植物叶片 N/P 比的研究结果吻合。从植物营养的限制因子分析,若 N/P 比小于 14,则为 N 限制类型;若 N/P 比大于 14,则为 P 限制类型^[32,33],而本研究涉及的 3 种功能群植物的 N/P 比均小于 14,表明新疆伊犁天山北坡草本植物群落不同功能群的植物生长均受 N 限制。

综上所述,新疆伊犁天山北坡草本植物群落叶片 N、P 化学计量特征与不同功能群的组成种类有关,即这一区域植物叶片 N、P 化学计量特征具有种间差异^[16],且种间差异对维持新疆天山北坡生态环境多样性和稳定性具有一定的意义。

3.2 新疆伊犁天山北坡环境因子对草本植物群落不同功能群叶片 N、P 化学计量特征的影响效应

植物的生长和代谢不仅受自身遗传的影响,同时也受到外界环境因子的影响。草本植物叶片 N、P 含量及 N/P 比均会受到地理(例如海拔)、气候(例如年均温和年均降水量)以及土壤(例如土壤容重、pH 值、阳离子交换量、含水量以及有机碳和全氮含量)等环境因子的影响^[10,16-19]。

相关性分析及冗余分析结果表明:新疆伊犁天山北坡杂草功能群叶片 N 含量随年均温升高呈显著增加趋势,叶片 P 含量则随年均降水量上升呈极显著降低趋势,且该功能群叶片 N、P 化学计量特征受到年均降水量、土壤全氮含量、海拔和土壤有机碳含量等因子的影响较强。综合来看,新疆伊犁天山北坡杂草功能群植物的生长受到温度与降水的共同影响。用“温度-植物生理假说”(“temperature-plant physiological hypothesis”)^[14]也可以解释新疆伊犁天山北坡杂草功能群植物养分含量与温度的关系,即海拔变化引起温度及降水等气象因子的变化,从而导致

杂草功能群植物自身 N、P 含量的变化。不仅如此,土壤有机碳与全氮为植物生长提供了必需的营养物质,因此,新疆伊犁天山北坡杂草功能群植物的生长也受到土壤全氮和有机碳含量的影响。

禾草功能群植物叶片 N 含量随年均降水量的变化显著改变,且海拔和土壤容重等环境因子共同影响禾草功能群植物的化学计量特征。其中,禾草功能群植物叶片 N 含量随年均降水量的增加而提高,而年均降水量随海拔的升高而增加,降水产生的淋溶作用有利于 N 沉降,直接影响土壤营养元素的分布情况^[34,35],且禾草植物根系发达,因此,能快速吸收利用土壤中的速效养分^[28,29]。

豆科功能群植物叶片 N、P 含量随气候因子的变化均无显著性改变,但在环境因子的重要性排序中,土壤全氮含量的贡献率最高,且贡献率超过 60%,这一方面体现了豆科功能群植物的内稳性^[36,37],另一方面也体现出土壤全氮含量对豆科植物具有极显著的影响,以及豆科功能群植物的固氮作用较强^[30]。

对比各功能群的特性,禾草和杂草功能群植物叶片的 N、P 化学计量特征均与海拔有显著关系,表明海拔对新疆伊犁天山北坡草本植物生长具有一定的影响。另外,年均温和年均降水量与海拔均具有相关性,随着海拔的升高,气温和降水量均发生变化,土壤微生物的活动变缓,从而影响植物对土壤养分的吸收,因此,海拔可通过影响气温和降水量间接影响各功能群叶片 N、P 含量。

综上,在研究不同功能群植物叶片的化学计量特征对环境因子的响应时,不仅要考虑叶片化学计量特征对单一环境因子的响应,还应考虑各类环境因子对叶片化学计量特征的综合影响效应。

3.3 新疆伊犁天山北坡草本植物群落叶片 N、P 化学计量特征与环境因子的关系

与新疆伊犁天山北坡各功能群叶片 N、P 化学计量特征对环境因子的响应特征相比,研究区域内群落总体草本植物叶片 N、P 含量对环境因子的响应效应明显不同。群落总体草本植物叶片的 P 含量与年均降水量具有极显著相关性,但与年均温无显著相关性,这一特点与杂草功能群植物相同,推测这一特点与杂草功能群在草本植物群落中占比较大有一定关系。

冗余分析结果显示:研究区域内土壤的全氮含量、有机碳含量和阳离子交换量以及年均温对草本植

物群落总体叶片 N、P 化学计量特征具有极显著的影响效应,土壤容重和年均降水量则有显著的影响,与各功能群植物叶片 N、P 化学计量特征对环境因子的响应效应存在异同。与各功能群相比,海拔对群落整体的 N、P 化学计量特征均无显著影响,但年均温和年均降水量则对 N、P 化学计量特征有显著的影响,表明草本植物群落的整体“混合”效应部分“抵消”了不同功能群植物的特有物种效应^[17,38],也表明海拔通过对气候因子的影响间接影响新疆伊犁天山北坡草本植物的整体生长和代谢。群落总体的 N、P 化学计量特征还受到土壤阳离子交换量的显著影响,这一效应与土壤阳离子交换量能够反映土壤的保肥能力与缓冲性能^[39-42]有关。土壤阳离子交换量主要受到土壤的黏粒含量、酸碱度以及地形和植被等因子^[43-45]的影响,不同功能群植物叶片的化学计量特征总体未受到土壤阳离子交换量的影响,进一步表明不同功能群植物都有各自获取与利用养分的策略^[46]。

本研究结果显示:新疆伊犁天山北坡不同功能群草本植物叶片生长状况均受 N 限制,但各项化学计量特征对环境因子的响应程度存在一定的差异。其中,禾草功能群植物叶片的化学计量特征受土壤容重、海拔和年均降水量的影响较大;杂草功能群植物叶片的化学计量特征受土壤全氮含量、年均降水量、海拔和土壤有机碳含量的影响较大;豆科功能群植物叶片的化学计量特征则受土壤全氮含量的影响较大,表明各功能群均具有各自不同的养分利用方式。

在物种区域尺度内进行植物化学计量特征的研究,不仅需要考虑到环境因子的影响,还应考虑植物种类组成和植物器官的异同。由于本研究涉及的植物叶片样本量有限,导致研究结果存在一定的局限性,在后续研究中应在现有研究数据的基础上增加植物不同器官(根、茎、叶、花和果)与土壤的实测数据,并在取样过程中注重种间数量关系,以期对新疆伊犁天山北坡不同功能群植物的化学计量特征及其对环境因子的响应进行深入分析和探讨。

参考文献:

- [1] 程 滨,赵永军,张文广,等.生态化学计量学研究进展[J].生态学报,2010,30(6):1628-1637.
- [2] 陈 蕾,李超伦.海洋浮游生物的生态化学计量学研究进展[J].应用生态学报,2014,25(10):3047-3055.
- [3] 冯德枫,包维楷.土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(2):400-408.
- [4] SARDANS J, JANSSENS I A, CIAIS P, et al. Recent advances and future research in ecological stoichiometry[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2021, 50(17): 125611.
- [5] 任书杰,于贵瑞,陶 波,等.中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J].环境科学,2007,28(12):2665-2673.
- [6] 何 靖,田 青,宋玲玲.岷山北坡高海拔区草本植物群落特征及主要植物功能群 C、N、P 含量分析[J].生态环境学报,2020,29(3):489-497.
- [7] 刘旻霞,朱柯嘉.青藏高原东缘高寒草甸不同功能群植物氮磷化学计量特征研究[J].中国草地学报,2013,35(2):52-58.
- [8] 吴 慧,王树力,郝玉琢,等.阿什河流域 6 种人工林叶片-凋落物-土壤系统的养分分配与利用格局[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(5):100-108.
- [9] 高雯萱,张 静,周晓兵,等.准喀尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量特征及其影响因子分析[J].植物资源与环境学报,2020,29(5):48-57.
- [10] 杨惠敏,王冬梅.草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J].草业学报,2011,20(2):244-252.
- [11] 张旭冉,张卫青,王海茹,等.克氏针茅草原土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应[J].生态学报,2021,41(13):5309-5316.
- [12] 倪 健.区域尺度的中国植物功能型与生物群区[J].植物学报,2001,43(4):419-425.
- [13] HE J S, FANG J Y, WANG Z H, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China[J]. Oecologia, 2006, 149: 115-122.
- [14] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30):11001-11006.
- [15] 于海玲,樊江文,钟华平,等.青藏高原区域不同功能群植物氮磷生态化学计量学特征[J].生态学报,2017,37(11):3755-3764.
- [16] 陶 冶,张元明.古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征[J].应用生态学报,2015,26(3):659-665.
- [17] 卢同平,张文翔,牛 洁,等.典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究[J].土壤学报,2017,54(3):682-692.
- [18] 韩文轩,吴 漪,汤璐琰,等.北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J].北京大学学报(自然科学版),2009,45(5):855-860.
- [19] YAN F, SCHUBERT S, MENGEL K. Soil pH changes during legume growth and application of plant material[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 23: 236-242.
- [20] 张山泉,陈 川,徐 沐,等.硫酸-过氧化氢消化法测定植株氮磷钾方法的改进[J].土壤,2003,35(2):174-175.
- [21] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: new 1-km spatial

- resolution climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [22] 任玉连,董醇波,邵秋雨,等.冗余分析在微生物生态学中的应用[J].*山地农业生物学报*, 2022, 41(1): 41-48.
- [23] 于海玲,李愈哲,樊江文,等.中国草地样带不同功能群植物叶片氮磷含量随水热因子的变化规律[J].*生态学杂志*, 2016, 35(11): 2867-2874.
- [24] 张珂,陈永乐,高艳红,等.阿拉善荒漠典型植物功能群、磷化学计量特征[J].*中国沙漠*, 2014, 34(5): 1261-1267.
- [25] 平川,王传宽,全奎.环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响[J].*生态学报*, 2014, 34(8): 1965-1974.
- [26] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等.北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J].*环境科学*, 2010, 31(8): 1716-1725.
- [27] 张红光,郑广宇,刘强,等.不同C₄植物叶片N、P质量分数变化及科、种间差异比较[J].*东北林业大学学报*, 2010, 38(8): 52-53, 77.
- [28] SCHERER-LORENZEN M, PALMBORG C, PRINZ A, et al. The role of plant diversity and composition for nitrate leaching in grasslands[J]. *Ecology*, 2003, 84(6): 1539-1552.
- [29] ROSCHER C, THEIN S, SCHMID B, et al. Complementary nitrogen use among potentially dominant species in a biodiversity experiment varies between two years[J]. *Journal of Ecology*, 2008, 96(3): 477-488.
- [30] 陈文新,陈文峰.发挥生物固氮作用减少化学氮肥用量[J].*中国农业科技导报*, 2004, 6(6): 3-6.
- [31] HE J S, WANG L, FLYNN D F B, et al. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes[J]. *Oecologia*, 2008, 155: 301-310.
- [32] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].*植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [33] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].*生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [34] 阿米娜木·艾力,常顺利,张毓涛,等.天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素[J].*生态学报*, 2014, 34(7): 1626-1634.
- [35] 谢锦.天山北坡植物-土壤生态化学计量特征的垂直带谱[D].乌鲁木齐:新疆大学资源与环境科学学院, 2016: 45.
- [36] 张仁懿,史小明,李文金,等.亚高寒草甸物种内稳性与生物量变化模式[J].*草业科学*, 2015, 32(10): 1539-1547.
- [37] YU Q, CHEN Q S, ELSER J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning, and stability[J]. *Ecology Letters*, 2010, 13: 1390-1399.
- [38] 张良侠,樊江文,张文彦,等.内蒙古草地植物叶片氮、磷元素化学计量学特征分析[J].*中国草地学报*, 2014, 36(2): 43-48.
- [39] 王文艳,张丽萍,刘俏.黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及其影响因素[J].*水土保持学报*, 2012, 26(5): 123-127.
- [40] 冯锦,崔东,孙国军,等.新疆土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J].*草业科学*, 2017, 34(4): 692-697.
- [41] 蔡祖聪,马毅杰.土壤有机质与土壤阳离子交换量的关系[J].*土壤学进展*, 1988, 16(3): 10-15.
- [42] 康婷,周春火,魏宗强,等.江西省土壤阳离子交换量区域分布特征及其影响因素[J].*中国农学通报*, 2021, 37(14): 66-71.
- [43] 黄尚书,叶川,钟义军,等.不同土地利用方式对红壤坡地土壤阳离子交换量及交换性盐基离子的影响[J].*土壤与作物*, 2016, 5(2): 72-77.
- [44] 魏孝荣,邵明安.黄土高原小流域土壤pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J].*应用生态学报*, 2009, 20(11): 2710-2715.
- [45] 齐泽民,王开运,张远彬,等.川西亚高山林线过渡带及邻近植被土壤性质[J].*生态学报*, 2009, 29(12): 6325-6332.
- [46] YUAN Z Y, CHEN H Y H, REICH P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus[J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 344.

(责任编辑:吴蕊夷)

附录 I Appendix I

禾草功能群植物 Plants of grass functional group

莎草科 Cyperaceae

薹草属 *Carex*寸草 *C. duriuscula*青绿薹草 *C. breviculmis*涝峪薹草 *C. giraldiana*异穗薹草 *C. heterostachya*白颖薹草 *C. duriuscula* subsp. *rigescens*

禾本科 Poaceae

山羊草属 *Aegilops*节节麦 *A. tauschii*披碱草属 *Elymus*披碱草 *E. dahuricus*旱麦草属 *Eremopyrum*旱麦草 *E. triticeum*芒属 *Miscanthus*荻 *M. sacchariflorus*类芦属 *Neyraudia*类芦 *N. reynaudiana*黍属 *Panicum*糠稷 *P. bisulcatum*芦苇属 *Phragmites*芦苇 *P. australis*早熟禾属 *Poa*硬质早熟禾 *P. sphondyloides*狗尾草属 *Setaria*狗尾草 *S. viridis*针茅属 *Stipa*东方针茅 *S. orientalis*戈壁针茅 *S. tianschanica* var. *gobica*紫花针茅 *S. purpurea*大针茅 *S. grandis*镰芒针茅 *S. caucasica*沙生针茅 *S. caucasica* subsp. *glareosa*结缕草属 *Zoysia*结缕草 *Z. japonica*

杂草功能群植物 Plants of forb functional group

苋科 Amaranthaceae

碱猪毛菜属 *Salsola*猪毛菜 *S. collina*碱蓬属 *Suaeda*碱蓬 *S. glauca*

伞形科 Apiaceae

当归属 *Angelica*白芷 *A. dahurica*柴胡属 *Bupleurum*北柴胡 *B. chinense*积雪草属 *Centella*积雪草 *C. asiatica*蛇床属 *Cnidium*蛇床 *C. monnieri*窃衣属 *Torilis*窃衣 *T. scabra*

菊科 Asteraceae

蓍属 *Achillea*高山蓍 *A. alpina*牛蒡属 *Arctium*牛蒡 *A. lappa*蒿属 *Artemisia*冷蒿 *A. frigida*大籽蒿 *A. sieversiana*猪毛蒿 *A. scoparia*野艾蒿 *A. lavandulifolia*紫菀属 *Aster*紫菀 *A. tataricus*飞廉属 *Carduus*飞廉 *C. nutans*天名精属 *Carpesium*天名精 *C. abrotanoides*菊属 *Chrysanthemum*野菊 *C. indicum*蓟属 *Cirsium*蓟 *C. japonicum*莴苣属 *Lactuca*野莴苣 *L. serriola*火绒草属 *Leontopodium*火绒草 *L. leontopodioides*滨菊属 *Leucanthemum*滨菊 *L. vulgare*漏芦属 *Rhaphonticum*漏芦 *R. uniflorum*千里光属 *Senecio*千里光 *S. scandens*苦苣菜属 *Sonchus*苦苣菜 *S. oleraceus*苣荬菜 *S. wightianus*蒲公英属 *Taraxacum*蒲公英 *T. mongolicum*苍耳属 *Xanthium*苍耳 *X. strumarium*

紫草科 Boraginaceae

鹤虱属 *Lappula*翅鹤虱 *L. lasiocarpa*勿忘草属 *Myosotis*勿忘草 *M. alpestris*翅果草属 *Rindera*翅果草 *R. tetraspis*附地菜属 *Trigonotis*附地菜 *T. peduncularis*

十字花科 Brassicaceae

芸苔属 *Brassica*芸苔 *B. rapa* var. *oleifera*芥属 *Capsella*芥 *C. bursa-pastoris*碎米荠属 *Cardamine*碎米荠 *C. hirsute*花旗杆属 *Dontostemon*花旗杆 *D. dentatus*葶苈属 *Draba*葶苈 *D. nemorosa*糖芥属 *Erysimum*糖芥 *E. amurense*独行菜属 *Lepidium*独行菜 *L. apetalum*香雪球属 *Lobularia*香雪球 *L. maritima*豆瓣菜属 *Nasturtium*豆瓣菜 *N. officinale*蔊菜属 *Thlaspi*蔊菜 *T. arvense*

桔梗科 Campanulaceae

风铃草属 *Campanula*风铃草 *C. medium*党参属 *Codonopsis*党参 *C. pilosula*

大麻科 Cannabaceae

大麻属 *Cannabis*大麻 *C. sativa*

石竹科 Caryophyllaceae

卷耳属 *Cerastium*卷耳 *C. arvense* subsp. *strictum*

旋花科 Convolvulaceae

打碗花属 *Calystegia*打碗花 *C. hederacea*

大戟科 Euphorbiaceae

大戟属 *Euphorbia*乳浆大戟 *E. esula*土大戟 *E. turczaninowii*

牻牛儿苗科 Geraniaceae

老鹳草属 *Geranium*粗根老鹳草 *G. dahuricum*鼠掌老鹳草 *G. sibiricum*毛蕊老鹳草 *G. platyanthum*

唇形科 Lamiaceae

野芝麻属 *Lamium*宝盖草 *L. amplexicaule*薄荷属 *Mentha*薄荷 *M. canadensis*荆芥属 *Nepeta*康藏荆芥 *N. prattii*牛至属 *Origanum*牛至 *O. vulgare*紫苏属 *Perilla*紫苏 *P. frutescens*夏枯草属 *Prunella*夏枯草 *P. vulgaris*鼠尾草属 *Salvia*鼠尾草 *S. japonica*荔枝草 *S. plebeian*丹参 *S. miltiorrhiza*黄芩属 *Scutellaria*韩信草 *S. indica*水苏属 *Stachys*水苏 *S. japonica*

千屈菜科 Lythraceae

千屈菜属 *Lythrum*千屈菜 *L. salicaria*

白刺科 Nitrariaceae

骆驼蓬属 *Peganum*骆驼蓬 *P. harmala*

罂粟科 Papaveraceae

秃疮花属 *Dicranostigma*秃疮花 *D. leptopodium*罂粟属 *Papaver*野罂粟 *P. nudicaule*

蓼科 Polygonaceae

篇蓄属 *Polygonum*珠芽蓼 *P. viviparum*篇蓄 *P. aviculare*习见蓼 *P. plebeium*大黄属 *Rheum*矮大黄 *R. nanum*酸模属 *Rumex*酸模 *R. acetosa*

车前科 Plantaginaceae	地榆属 <i>Sanguisorba</i>	荨麻科 Urticaceae
香彩雀属 <i>Angelonia</i>	地榆 <i>S. officinalis</i>	荨麻属 <i>Urtica</i>
香彩雀 <i>A. angustifolia</i>	山莓草属 <i>Sibbaldia</i>	荨麻 <i>U. fissa</i>
车前属 <i>Plantago</i>	山莓草 <i>S. procumbens</i>	麻叶荨麻 <i>U. cannabina</i>
车前 <i>P. asiatica</i>	茜草科 Rubiaceae	马鞭草科 Verbenaceae
毛茛科 Ranunculaceae	拉拉藤属 <i>Galium</i>	美女樱属 <i>Glandularia</i>
乌头属 <i>Aconitum</i>	蓬子菜 <i>G. verum</i>	美女樱 <i>G. × hybrida</i>
高乌头 <i>A. sinomontanum</i>	车轴草 <i>G. odoratum</i>	堇菜科 Violaceae
翠雀属 <i>Delphinium</i>	茄科 Solanaceae	堇菜属 <i>Viola</i>
翠雀 <i>D. grandiflorum</i>	天仙子属 <i>Hyoscyamus</i>	三色堇 <i>V. tricolor</i>
金莲花属 <i>Trollius</i>	天仙子 <i>H. niger</i>	双花堇菜 <i>V. biflora</i>
金莲花 <i>T. chinensis</i>	茄属 <i>Solanum</i>	葡萄科 Vitaceae
蔷薇科 Rosaceae	龙葵 <i>S. nigrum</i>	地锦属 <i>Parthenocissus</i>
委陵菜属 <i>Potentilla</i>	瑞香科 Thymelaeaceae	地锦 <i>P. tricuspidata</i>
朝天委陵菜 <i>P. supina</i>	狼毒属 <i>Stellera</i>	
委陵菜 <i>P. chinensis</i>	狼毒 <i>S. chamaejasme</i>	
豆科功能群植物 Plants of legume functional group		
豆科 Fabaceae	野苜蓿 <i>M. falcata</i>	披针叶野决明 <i>T. lanceolata</i>
黄芪属 <i>Astragalus</i>	草木樨属 <i>Melilotus</i>	车轴草属 <i>Trifolium</i>
蒙古黄芪 <i>A. mongholicus</i>	草木樨 <i>M. officinalis</i>	白车轴草 <i>T. repens</i>
百脉根属 <i>Lotus</i>	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	野豌豆属 <i>Vicia</i>
百脉根 <i>L. corniculatus</i>	小花棘豆 <i>O. glabra</i>	野豌豆 <i>V. sepium</i>
苜蓿属 <i>Medicago</i>	野决明属 <i>Thermopsis</i>	

《植物遗传资源学报》2023 年征订启事

《植物遗传资源学报》是中国农业科学院作物科学研究所和中国农学会共同主办的学术期刊,为中国科技核心期刊、全国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊,被国内多家数据库收录,被 CA 化学文摘(美)(2014、2021)、JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)(2018、2021)、CABI (2021)收录,荣获 2015 年度中国自然资源学会高影响力十佳期刊,2017 年和 2020 年连续入选中国精品科技期刊,入选《世界期刊影响力指数(WJCI)报告》。据《中国科技期刊引证报告》(核心版)统计,2021 年核心影响因子 1.884;据中国知网统计,2021 年综合影响因子 2.109。

报道内容为有关植物遗传资源基础理论研究、应用研究方面的研究成果、创新性学术论文和高水平综述或评论。如种质资源的考察、收集、保存、评价、利用、创新,信息学、管理

学等;起源、演化、分类等系统学;基因发掘、鉴定、克隆、基因文库建立、遗传多样性研究等。

本刊为双月刊,大 16 开本,每期 320 页,彩色铜版纸印刷。每期定价 68 元,全年 408 元。各地邮局发行,邮发代号 82-643。国内统一连续出版物号 CN 11-4996/S,国际标准连续出版物号 ISSN 1672-1810。本刊编辑部常年办理订阅手续,如需邮挂每期另加 3 元。

地址:北京市中关村南大街 12 号《植物遗传资源学报》编辑部(邮编 100081);电话:010-82105794,010-82105795;网址:https://www.zwyczy.cn;E-mail:zwyczyxb2003@163.com, zwyczyxb2003@sina.com;微信 ID:植物遗传资源学报;作者 QQ 群:372958204,1107885410。