

高寒草甸植被-土壤养分含量与气象因子相关关系研究

林伟山¹, 德科加^{1,2*}, 钱诗祎¹, 向雪梅¹, 冯廷旭¹, 魏希杰^{1,2}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016)

摘要:【目的】为揭示高寒草甸植被、土壤养分含量对气象因子变化的响应。【方法】通过单因素(one-way ANOVA)、Duncan法进行方差分析及Pearson相关分析,研究高寒嵩草草甸植被和土壤中全氮、全磷、全钾、有机碳、铵态氮、硝态氮,速效氮含量与年均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度和日照时数等6个气象因子的相关性。【结果】植被养分与7~9月的最低气温、平均气温和日照时数存在显著正相关($P < 0.05$),其他指标与气候因子无显著相关关系;土壤0~15 cm土层中硝态氮、速效氮和全钾分别与7~9月平均气温、降水量和相对湿度呈显著正相关($P < 0.05$);铵态氮和有机碳分别与日照时数、相对湿度呈显著负相关($P < 0.05$);土壤15~30 cm土层中铵态氮和全钾与平均气温呈显著正相关($P < 0.05$);硝态氮和全磷与相对湿度呈显著负相关($P < 0.05$)。【结论】植被养分、土壤0~15 cm和15~30 cm土层的全钾与平均气温呈显著正相关($P < 0.05$)。

关键词:气象因子;三江源区;高寒草甸;养分;土壤

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)06-0109-12

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.06.015



青藏高原平均海拔在4 000 m以上,面积约为250万 km^2 ,被誉为“世界屋脊”^[1],拥有世界上最大的高寒草地生态系统,草地面积约16.54 $\times 10^5$ km^2 ^[2],约占中国和世界草地面积的41.88%和6%^[3]。由于复杂的地形和独特的气候,形成了多样的植被类型,其中高寒草甸是青藏高原最主要的植被类型,是我国面积最大、分布最广的典型高寒生态系统^[2],对全球生态安全、涵养水源、防止水土流失等具有重要意义,是青藏高原最重要的生态功能区^[4-5]。然而,高寒生态系统对环境的变化极为敏感,在气候变化及人类不合理使用等因素的影响下,草甸退化面积不断扩大,严重地区已形成黑土型次生裸地“黑土滩”^[6]。高寒草甸的退

化导致群落结构和物种组成发生改变^[7],降低了生态系统的服务功能、物质循环及能量流动。养分作为植被生长发育不可缺少的营养元素,是限制生产力、影响牧草品质的重要因素。在草原持续发展的管理措施中,合理利用养分资源、制定合理的放牧制度和载畜量是保证草地持续发展的关键^[8]。目前高寒草甸草地严重退化,养分流失已成为三江源区面临的最主要生态问题之一,这也引起了科学界和我国政府的高度重视^[9]。

气候变化已经并将继续对青藏高原甚至全球生态系统产生广泛而深远的影响,由于温室效应导致温度、降水等气候特征的改变,植被物候期随之变化,生物地带性重新分布,改变养分分配及动态变化^[10]。气象因子的微小变化会直接或间接的影响高寒草甸生态系统的稳定性。国内关于高寒草甸的研究多集中在混播^[11]、施肥^[12]、植被功能^[13]、群落结构^[14]、牧草营养品质^[15]、土壤肥力^[16-17]等方面,但这些研究因海拔、地形地貌及试验方法的差异而没有形成统一的结论。也有学者就气象因子对高寒草甸植被的影响展开研

收稿日期:2022-09-28; **修回日期:**2023-02-03

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFD1602302);青海省科技厅项目(K9922050)

作者简介:林伟山(1996-),男,藏族,甘肃天祝人,博士研究生。E-mail:linws1314@163.com

*通信作者。E-mail:1162157948@qq.com

究,主要关注物种多样性^[18],降水对生物量^[19],碳库^[20],温度^[21]等单一的气象因子(温度或降水)对高寒草甸植被或土壤理化性质的影响。上述研究多为单一气象因子对高寒草甸的影响,针对气象因子对高寒草甸植被和土壤养分的影响鲜有报道。

近年来,高寒草甸植被主要以人工补播、施肥等措施来增加天然草地生产力。其中,人工施肥已成为提高生产力的关键点,外源氮素的添加已成为目前的研究热点。有文献研究表明,高寒草甸牧草生产力及养分含量的多少在时空上存在很大的差异^[22-23],为了增加植被初级生产力盲目地进行养分添加却不考虑环境因子的变化,会导致生态系统的原有的植被—土壤之间的平衡被破坏^[12],甚至会影响全球生态系统。因此,研究青藏高原环境因子的变化对高寒草甸植被和土壤养分的变化规律显得极为重要。本研究以青藏高原三江源区嵩草高寒草甸为研究对象,分析植被生长季气象因子的变化对植被、土壤养分的影响及其相关性,为青藏高寒退化草地的后续工作与重建提供数据支撑和科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2020年在青海大学三江源野外生态观测站周边牧户冬春草场进行,该草场属称多县北部高寒草甸沼泽纯牧业草场区,草地类型为高山嵩草杂类草甸,草地为中度退化草地^[12],地理坐标为N 33°24'30", E 97°18'00",海拔高度为4 270 m,气候为典型的高原大陆性气候,年平均气温为-5.6~3.8℃,年均降水量为562.2 mm,年度降水主要分布在6—9月,约占全年降水的75%。

草场主要优势牧草是高山嵩草(*Kobresia pygmaea*),次重要者有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、异针茅(*Stipa aliena*)、波伐早熟禾(*Poa poophagorum*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)等。伴生植物有羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等,不食杂类草、毒草有甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)、华丽龙胆(*Gentiana sino-ornata*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、

甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、独一味(*Lamio-phlomis rotata*)等。

1.2 样品采集

在称多县珍秦镇选择地势平坦、植被均匀分布且具有代表性的围栏(2019年10月至2020年4月期间放牧,在2020年5—9月未放牧)草地462 m²作为试验样地,于2020年7—9月,每月用五点取样法采集高寒草甸草场牧草地上植株,样方面积为0.5 m×0.5 m,用剪刀齐地面剪下装入牛皮纸袋;用根钻法^[12]在样方内取0~20 cm土层土壤,每个样方5个重复,装入尼龙网袋将土洗去,得到根样,将根装入牛皮纸袋。地上、地下样品均在105℃下杀青30 min,80℃烘干至恒重,粉碎研磨。地上(下)植被特征测定同期,每月在同样方内用直径0.03 m的根钻取0~15 cm,15~30 cm土层土壤,5钻混合为一个土样。带回实验室,置于背光干燥处自然风干后过筛,用于土壤成分的测定。

1.3 指标测定

参照文献^[24],土壤理化性质的测定方法如下:土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾容量—外加加热法测定;全氮(TN)含量采用CuSO₄-K₂SO₄-Se(100:1:1)消化半微量凯氏定氮法(半自动凯氏定氮仪KDN-08C)测定;全磷(FP)含量采用HClO₄-H₂SO₄消化—钼锑抗比色法(紫外可见分光光度计UV-1600)测定;硝态氮(NN)含量用双波长紫外比色法测定;铵态氮(AN)含量测定用靛酚蓝比色法;速效氮(QN)含量用碱解扩散法测定;全钾(AP)含量用火焰光度法。

植被养分测定7个指标:粗蛋白(CP)、有机碳(OC)、铵态氮(AN)、硝态氮(NN)、速效氮(QN)、全磷(FP)与全钾(AP),测定方法参照文献^[24]。

2020年7—9月的气象因子包括气温、降水、相对湿度、日照时数等,数据由青海省三江源国家公园气象站提供(图1)。

1.4 数据统计

使用Excel 2016软件对数据进行整理,用SPSS 24.0软件进行气象因子与养分之间的相关分析,对植被与土壤养分采用单因素(one-way ANOVA)和Duncan法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$)。用Ori-

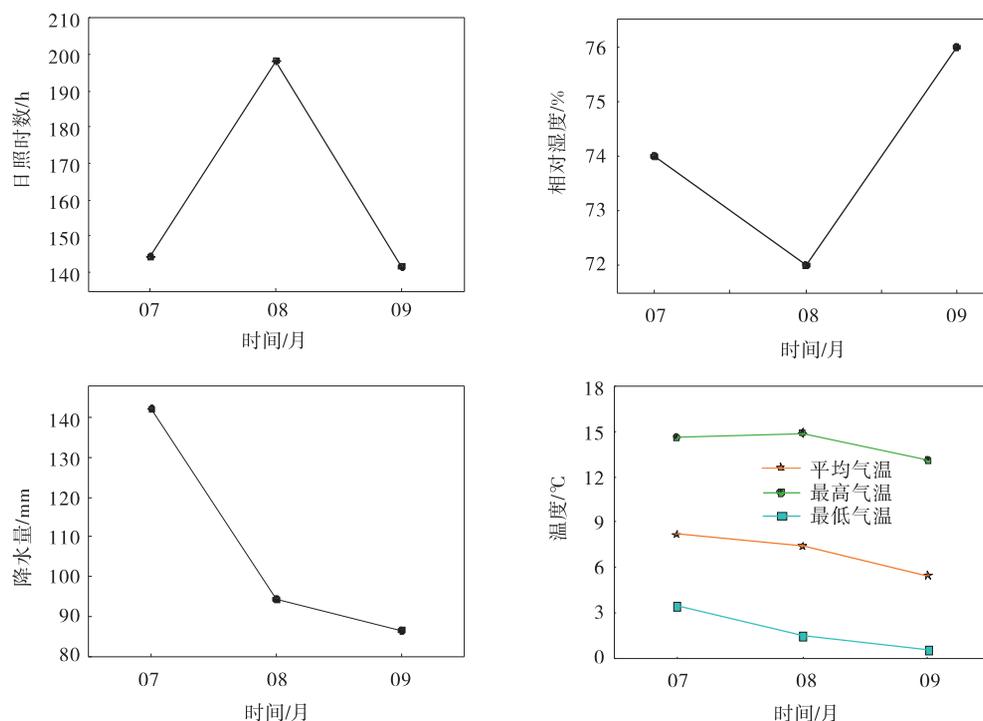


图 1 试验地气象因子

Fig. 1 Variation of meteorological factors in the test site

gin Pro 2021 软件对数据进行统计分析并作图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸植被养分特征

高寒草甸植被地上部(植被体内)、根系养分含量在不同月份无统一的变化规律。其中,全氮含量在天上部与根系之间变化不一,其含量在天上部表现出逐渐降低的趋势,与7月相比8月和9月的含量分别降低了20.08%和37.21%;根系的全氮含量则表现为先增加后降低的变化,差异显著($P < 0.05$)(图2-A)。铵态氮含量的变化趋势均呈现“V”字型,地上部含量分别为1 875.2、1 552.38和2 134.6 mg/kg,差异显著($P < 0.05$)(图2-B)。硝态氮和速效氮含量均呈现出先上升后降低的“倒V”型变化趋势,均在8月有最大值;地上部硝态氮和速效氮含量分别为503.22 mg/kg(图2-C),885.69 mg/kg(图2-D),差异显著($P < 0.05$)。有机碳含量在植被地上部变化为一直上升,其含量分别为36.62、38.52和40.03 mg/kg;根系变化与此相反,表现为有机碳含量随月份推移而逐渐下降的趋势,均存在显著差异($P < 0.05$)(图2-E)。全磷和全钾含量在植被地上部分和根系均呈现出上升的变

化趋势;地上部全磷含量分别为3.92、5.82和6.61 g/kg(图2-F),地上部全钾含量分别为4.71、53.39和58.26 g/kg,差异显著($P < 0.05$)(图2-G)。

2.2 青藏高寒草甸土壤理化性质特征

高寒草甸土壤养分含量在不同土层之间变化不一,且存在显著差异($P < 0.05$)。全氮含量在0~15 cm土层无明显变化,差异不显著;15~30 cm土层表现为逐渐下降的趋势,其含量分别为3.23%、2.69%和2.38%,差异显著($P < 0.05$)(图3-A)。铵态氮含量在0~15 cm、15~30 cm土层均表现出随着月份增加而下降的趋势,与7月相比,在8月和9月0~15 cm土层其含量分别降低了29.54%和27.78%,15~30 cm土层其含量分别降低了23.14%和22.88%,差异显著($P < 0.05$)(图3-B)。硝态氮含量在0~15 cm土层随着月份的增加呈现出先下降后上升的“V”型变化趋势,其含量分别为20.55、4.01和14.5 mg/kg(图3-C);速效氮含量在0~15 cm土层的变化趋势与此相反,其变化趋势为先增加后降低的动态,其含量分别为312.82、578.74和550.81 mg/kg,差异显著($P < 0.05$)(图3-D)。土壤有机碳(图3-E)、全磷(图3-F)和全钾(图3-G)含量在0~15和15~30 cm土层上整体表现出逐渐增加的上升趋势,均在9月有

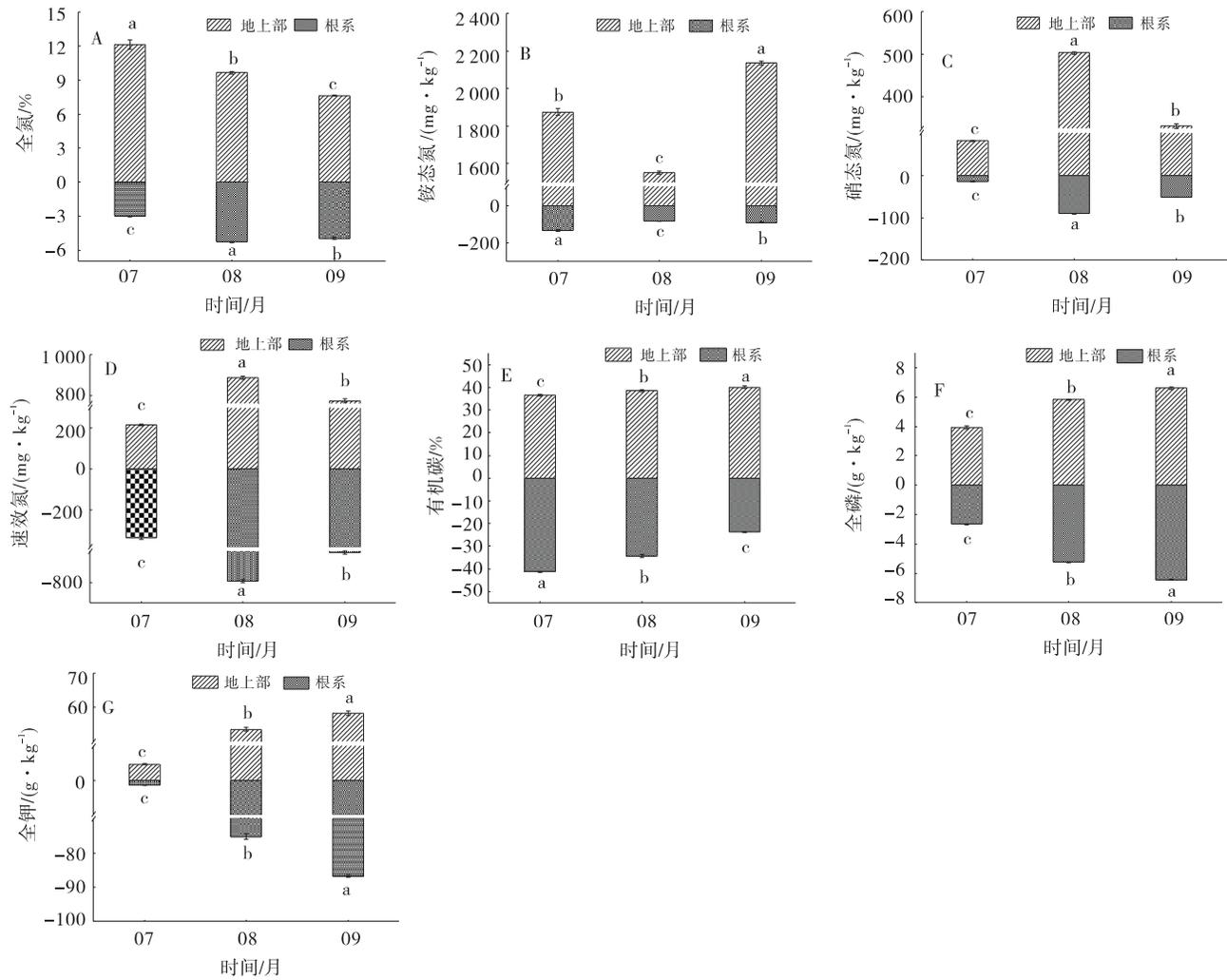


图2 高寒草甸植被地上部、根系养分变化

Fig. 2 Aboveground and root nutrient changes in alpine meadow vegetation

注:图中小写字母表示土壤0~15 cm土层在不同月之间的差异

最大值,8月次之,7月最小;土壤有机碳、全磷和全钾含量在0~15 cm土层的最大值分别为108.36%、1.93 g/kg和32.62 g/kg,差异显著($P < 0.05$)。

整体而言,土壤全氮、铵态氮、硝态氮、速效氮、有机碳和全钾含量在0~15 cm土层远大于15~30 cm土层;全磷含量则刚好相反,差异显著($P < 0.05$)。其他显著不差异(图3)。

2.3 气象因子对养分的影响

2.3.1 气象因子对高寒草甸植被养分的影响 最高气温、平均气温和日照时数在7-9月的变化趋势一致,呈倒“V”型;而最低气温、相对湿度和降水量的变化趋势与之相反,呈“V”型(图1),与植被地上部、根系的硝态氮和速效氮含量变化趋势一致。

采用 Pearson 相关对高寒草甸植被地上部、根系的养分与气象因子之间的相关性进行分析(表1),发

现高寒草甸植被地上部粗蛋白含量与最低气温呈显著正相关($P < 0.05$),其他指标与气象因子存在相关性,但差异不显著。高寒草甸植被根系粗蛋白含量与最低气温呈显著正相关($P < 0.05$),速效氮含量与最低气温呈极显著正相关($P < 0.01$)。有机碳含量与平均气温呈现显著正相关($P < 0.05$),硝态氮含量与日照时数呈显著正相关($P < 0.05$),其他存在相关性,但差异不显著(表2)。

2.3.2 气象因子对青藏高寒草甸土壤养分的影响 高寒草甸土壤0~15、15~30 cm土层养分指标与气象因子之间采用 Pearson 相关进行相关性分析(图1,表3),0~15 cm土层硝态氮含量与平均气温呈极显著正相关($P < 0.01$),速效氮含量与降水量呈极显著正相关($P < 0.01$),铵态氮与日照时数呈显著负相关($P < 0.05$),相对湿度与全钾呈极显著正相关($P < 0.01$),与有机碳呈极显著负相关($P < 0.01$)。

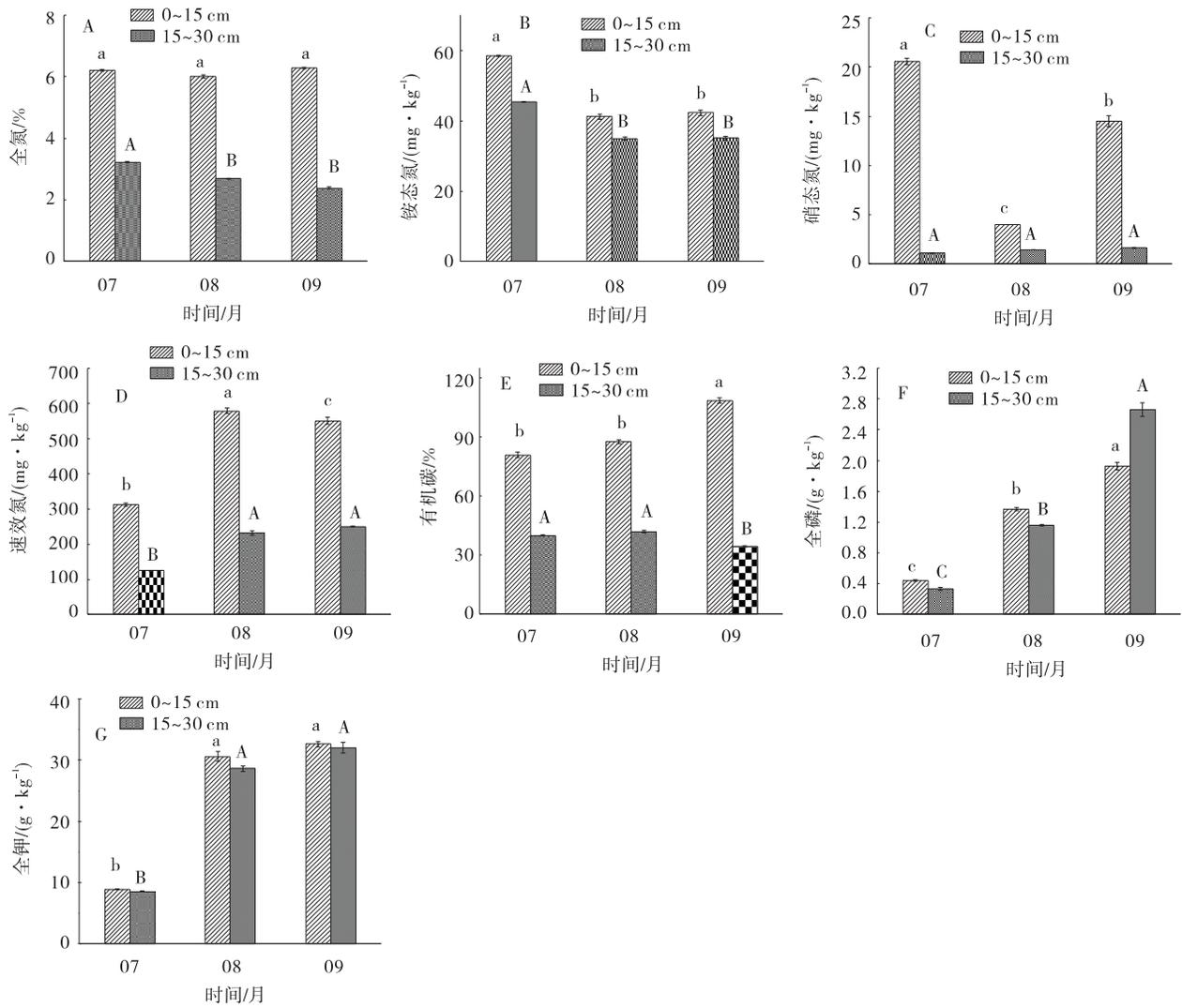


图 3 高寒草甸 0~15、15~30 cm 土层养分变化

Fig. 3 Nutrient changes in 0~15 cm and 15~30 cm soil layers of alpine meadow soils

注:图中不同小写字母表示 0~15 cm 土层养分在不同月之间的差异;不同大写字母表示 15~30 cm 土层养分在不同月之间的差异

表 1 高寒草甸植被地上部养分与气象因子的 Pearson 相关分析

Table 1 Pearson correlation analysis of above-ground nutrients of alpine meadow vegetation with meteorological factors

	平均气温/°C	最高气温/°C	最低气温/°C	相对湿度/%	降水量/mm	日照时数/h
全氮(TN)	0.885	0.595	0.999*	-0.267	0.990	-0.209
铵态氮(AN)	0.979	0.971	0.795	-0.819	0.675	0.461
硝态氮(NN)	0.977	0.973	0.788	-0.825	0.667	0.470
速效氮(QN)	-0.227	0.218	-0.625	-0.554	-0.753	0.877
有机碳(OC)	0.781	0.975	0.434	-0.990	0.268	0.812
全磷(FP)	-0.934	-0.996	-0.689	0.900	-0.550	-0.595
全钾(AP)	-0.568	-0.869	-0.157	0.989	0.020	-0.946

注:* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。下同

平均气温与土壤 15~30 cm 土层铵态氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与全钾呈显著正相关($P < 0.05$);

硝态氮、全磷含量与相对湿度均呈现极显著负相关($P < 0.01$)(表 4)。

表2 高寒草甸植被根系养分与气象因子的 Pearson 相关分析

Table 2 Pearson correlation analysis of root nutrients of alpine meadow vegetation with meteorological factors

指标	平均气温/°C	最高气温/°C	最低气温/°C	相对湿度/%	降水量/mm	日照时数/h
全氮(TN)	0.926	0.670	0.998*	-0.359	0.972	-0.114
铵态氮(AN)	-0.987	-0.818	-0.960	0.557	-0.896	-0.109
硝态氮(NN)	0.328	0.706	-0.112	-0.913	-0.286	0.998*
速效氮(QN)	0.900	0.622	1.000**	-0.300	0.985	-0.176
有机碳(OC)	0.999*	0.882	0.919	-0.655	0.835	0.230
全磷(FP)	-0.464	-0.034	-0.801	-0.327	-0.894	0.728
全钾(AP)	-0.973	-0.778	-0.977	0.500	-0.924	-0.042

表3 高寒草甸土壤0~15 cm 土层养分与气象因子的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson correlation analysis of nutrients and meteorological factors in 0~15cm soil layer of alpine meadow

指标	平均气温/°C	最高气温/°C	最低气温/°C	相对湿度/%	降水量/mm	日照时数/h
全氮(TN)	-0.177	0.268	-0.584	-0.596	-0.719	0.900
铵态氮(AN)	-0.229	-0.629	0.214	0.866	0.383	-0.999*
硝态氮(NN)	1.000**	0.901	0.902	-0.685	0.811	0.270
速效氮(QN)	0.813	0.479	0.985	-0.132	1.000**	-0.342
有机碳(OC)	0.685	0.933	0.303	-1.000**	0.130	0.886
全磷(FP)	-0.973	-0.778	-0.977	0.500	-0.924	-0.042
全钾(AP)	-0.685	-0.933	-0.303	1.000**	-0.130	-0.886

表4 高寒草甸土壤15~30 cm 土层养分与气象因子的 Pearson 相关分析

Table 4 Pearson correlation analysis of nutrients and meteorological factors in 15~30 cm soil layer of alpine meadow

指标	平均气温/°C	最高气温/°C	最低气温/°C	相对湿度/%	降水量/mm	日照时数/h
全氮 TN	1.000**	0.899	0.904	-0.682	0.814	0.266
铵态氮 AN	0.685	0.933	0.303	-1.000**	0.130	0.886
硝态氮 NN	-0.628	-0.904	-0.231	.997*	-0.055	-0.919
速效氮 QN	0.412	-0.024	0.765	0.381	0.867	-0.766
有机碳 OC	0.685	0.933	0.303	-1.000**	0.130	0.886
全磷 FP	0.999*	0.922	0.879	-0.721	0.781	0.318

2.4 高寒草甸植被养分与土壤养分之间相关性

高寒草甸植被(地上部、根系)养分与土壤(0~15和15~30 cm 土层)养分之间存在明显的相关性。0~15 cm 土层全氮与植被地上部铵态氮呈显著正相关($P < 0.05$),与硝态氮呈显著负相关($P < 0.05$);0~15 cm 土层铵态氮与植被地上部硝态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾呈极显著负相关($P < 0.01$);0~15 cm 土层硝态氮与植被地上部铵态氮呈显著正相关,与硝态氮、速效氮、全磷和全钾呈显著负相关($P < 0.05$);0~

15 cm 土层速效氮与植被地上部硝态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾极显著正相关($P < 0.01$);0~15 cm 土层有机碳与植被地上部铵态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾显著正相关($P < 0.05$);0~15 cm 土层全磷和全钾与植被地上部的全氮含量呈极显著负相关($P < 0.05$),与植被地上部硝态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾极显著正相关($P < 0.01$)(表5)。

0~15 cm 土层全氮与植被根系硝态氮和速效氮

表 5 高寒草甸植被与土壤养分的相关性
Table 5 Correlation between alpine meadow vegetation and soil nutrients

土层/cm	指标	植被地上部指标							植被根系指标						
		全氮	铵态氮	硝态氮	速效氮	有机碳	全磷	全钾	全氮	铵态氮	硝态氮	速效氮	有机碳	全磷	全钾
	全氮(TN)	-0.240	0.947**	-0.560*	-0.342	0.246	0.075	-0.120	-0.320	0.337	-0.653**	-0.468*	-0.389	0.099	-0.080
	铵态氮(AN)	0.862**	0.110	-0.930**	-0.990**	-0.773**	-0.935**	-0.986**	-0.993**	0.989**	-0.879**	-0.966**	0.769**	-0.930**	-0.980**
	硝态氮(NN)	0.418	0.668**	-0.965**	-0.866**	-0.341	-0.569*	-0.726**	-0.851**	0.856**	-0.989**	-0.927**	0.252	-0.549*	-0.694**
0~15	速效氮(QN)	-0.841**	-0.149	0.947**	0.996**	0.751**	0.925**	0.983**	0.997**	-0.992**	0.900**	0.977**	-0.740**	0.917**	0.975**
	有机碳(OC)	-0.927**	0.682**	0.334	0.564*	0.869**	0.862**	0.741**	0.586*	-0.573*	0.215	0.441	-0.979**	0.874**	0.770**
	全磷(FP)	-0.986**	0.316	0.698**	0.859**	0.895**	0.993**	0.954**	0.869**	-0.861**	0.604**	0.775**	-0.964**	0.996**	0.966**
	全钾(AP)	-0.919**	0.022	0.879**	0.971**	0.820**	0.975**	0.999**	0.976**	-0.970**	0.814**	0.929**	-0.844**	0.971**	0.998**
	全氮(TN)	0.985**	-0.301	-0.707**	-0.865**	-0.893**	-0.990**	-0.956**	-0.878**	0.867**	-0.615**	-0.785**	0.960**	-0.995**	-0.968**
	铵态氮(AN)	0.882**	0.066	-0.914**	-0.986**	-0.781**	-0.949**	-0.993**	-0.989**	0.982**	-0.859**	-0.953**	0.794**	-0.945**	-0.987**
	硝态氮(NN)	-0.977**	0.280	0.725**	0.877**	0.886**	0.994**	0.964**	0.888**	-0.877**	0.635**	0.799**	-0.951**	0.997**	0.975**
15~30	速效氮(QN)	-0.936**	0.078	0.849**	0.955**	0.847**	0.986**	0.996**	0.963**	-0.954**	0.778**	0.905**	-0.872**	0.982**	0.998**
	有机碳(OC)	0.642**	-0.933**	0.153	-0.103	-0.643**	-0.514*	-0.329	-0.131	0.111	0.273	0.038	0.766**	-0.536*	-0.373
	全磷(FP)	-0.963**	0.589*	0.447	0.662**	0.887**	0.917**	0.818**	0.680**	-0.668**	0.333	0.547*	-0.995**	0.928**	0.844**
	全钾(AP)	-0.938**	0.077	0.851**	0.956**	0.849**	0.986**	0.997**	0.964**	-0.956**	0.779**	0.906**	-0.873**	0.983**	0.999**

呈显著负相关($P < 0.05$);土壤0~15 cm土层铵态氮、硝态氮与植被根系全氮、硝态氮、速效氮全磷和全钾呈显著负相关($P < 0.05$),土壤0~15 cm铵态氮与根系铵态氮和有机碳呈显著正相关($P < 0.05$);土壤0~15 cm速效氮、有机碳、全磷和全钾均与植被根系全氮、全磷和全钾呈显著正相关($P < 0.05$),与植被根系铵态氮和有机碳呈显著负相关($P < 0.05$)。

15~30 cm土层全氮与植被地上部全氮呈显著正相关($P < 0.05$),与植被地上部硝态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾极显著负相关($P < 0.01$);15~30 cm土层硝态氮和速效氮与植被地上部全氮呈显著负相关($P < 0.05$),与植被地上部硝态氮、速效氮、有机碳、全磷和全钾极显著正相关($P < 0.01$);15~30 cm土层有机碳与植被地上部全氮呈显著正相关($P < 0.05$),与铵态氮、有机碳和全磷呈显著负相关($P < 0.05$);15~30 cm土层全磷和全钾与植被地上部全氮呈显著负相关,与植被地上部速效氮、有机碳、全磷和全钾极显著正相关($P < 0.01$)。

15~30 cm土层全氮、铵态氮与植被根系的全氮、硝态氮、速效氮、全磷和全钾呈显著负相关($P < 0.05$),与植被根系铵态氮和有机碳呈显著正相关($P < 0.05$);15~30 cm土层硝态氮、速效氮与植被根系的全氮、硝态氮、速效氮、全磷和全钾呈显著正相关($P < 0.05$),与植被根系铵态氮和有机碳呈显著负相关($P < 0.05$);15~30 cm土层有机碳与植被根系有机碳呈显著正相关($P < 0.05$),与植被根系全磷呈显著负相关($P < 0.05$);

15~30 cm土层全磷、全钾与植被根系铵态氮和有机碳呈极显著负相关($P < 0.05$),与植被根系全氮、速效氮、全磷和全钾呈显著正相关($P < 0.05$)。

3 讨论

青藏高原是全球气候变化的敏感区,全球气候变化对高原陆地生态系统演变的影响非常明显,这必将导致高寒草甸草地生态系统发生变化,而这种变化主要通过影响水肥气热与碳、氮、磷等营养物质含量及循环途径来改变高寒草甸草地结构、功能及养分含量,而植被及土壤养分的变化直接作用于高寒草甸生态系统,导致局部、区域气候的变化^[25]。水、肥、气、热是土壤理化性质的反映指标,气候是决定植被生长发

育的关键因子。高寒草甸作为青藏高原典型的植被特征,是适应高原隆起和高山寒冷中湿气候的产物。其生态系统极其脆弱,对人为干扰和温室气体造成的气候变化较为敏感^[26]。适宜的降水、光照、气候、温度直接影响高寒草甸植被的生长发育。温度控制生态系统中大部分生物与化学反应及几乎所有生物学过程,低温则是限制高寒草甸植物生长历程的关键因素^[27],决定植被光合速率、养分的吸收和生长率等,从而间接影响植物的生长、生物量及养分积累。光是影响和决定植物生长发育和生理代谢的一个重要生态因子^[28],是影响植被生命历程的外部环境之一,其中光照时数对作物形态建成、代谢调节、光合作用均具有重要影响^[29-30]。本试验研究结果表明,高寒草甸植被养分(植被地上部、植被根系)与最低气温、平均气温和日照时数存在极显著正相关关系,与文献^[26]的研究结果相似。也有学者持不同观点,温度对草原植被产生不利影响^[31]。上述研究尚存在较大的争议,可能与研究区状况、植被类型、试验方法有关。可以看出,温度对不同植被产生的影响存在差异。由于试验地属中度退化草地,水土流失严重,土壤肥力下降,养分供应不足。温度、日照时数则是决定高寒草甸植被长势的关键因子^[32],可见,温度、日照时数对植被形成、养分含量及运输均存在影响。本研究结果表明,降水量与植被养分含量不存在相关性,与张秀敏^[33]、李浪^[34]、石岳等^[35]研究结果不一致。研究地区处于半干旱地区,降水量应是环境限制因子中的重要因素。笔者认为研究区处于以高山嵩草+矮嵩草为建群种的高寒草甸,其地表常年低温形成的草毡层有减缓水分蒸发的持水能力,同时,试验地常年低温,夏季最高气温不超过20℃,其水分蒸发量较少,水分足以供应植被生长发育。因此,相比于降水,温度及日照时数对植被养分的影响更大。

土壤是高寒草甸植被生长发育的载体,也是许多营养物质的储存库以及动植物分解和循环的场所^[36]。气象因子对土壤物理指标的影响主要通过土壤孔隙度、土壤质地、团聚作用、渗透率、有效水含量、通气性等等的改变,同时直接或间接影响土壤微生物活性、种类及数量(微生物碳、氮、磷等营养元素)的分解、循环,改变土壤化学成分,进而导致土壤养分含量发生

变化。植被凋落物及根系是土壤氮素的主要来源,由于土壤具有复杂性和滞后性的特性,导致土壤养分含量的影响机制极为复杂^[21]。本研究结果表明,0~15 cm土层中硝态氮、速效氮和全钾分别与平均气温、降雨量和相对湿度呈显著正相关;铵态氮和有机碳含量分别与日照时数、相对湿度呈负相关。说明高寒草甸土壤表层(0~15 cm土层)硝态氮含量与平均气温、速效氮含量与降雨量、全钾含量与相对湿度均存在显著正效应。与陈永勤^[37]、张春来^[38]、申胜龙等^[39]研究结果相似。温度是土壤微生物活动及矿化作用的决定因子,硝态氮作为土壤无机氮的主要元素之一,其形成过程及土壤中的存储与温度密不可分。由于土壤是一个复杂的自然综合体,土壤硝态氮受温度影响之外,还受到土壤铵态氮含量及温度与水肥的耦合作用影响,同时,由于土壤地形因素(坡向、坡度、下垫面曲率、地貌特征)对水分的利用不同导致水分对硝态氮有淋洗作用^[40]。降水量会改变土壤含水量、土壤微生物活动所需水分,土壤含水量高会降低土壤温度导致土壤呼吸的抑制作用可能会比较明显^[21]。土壤速效氮作为可直接被植物根系吸收的氮素,在土壤中存在形态多样。降水量会增加土壤含水量进而改变土壤中游离态、水溶液的硝态氮含量。土壤相对湿度是反映相对于饱和水量百分比的反映相对含水量的指标。全钾作为土壤主要的营养物质,湿度会改变高寒草甸生态系统凋落物的分解速率来影响土壤全钾含量^[41]。

本研究表明,15~30 cm土层中铵态氮、全钾与平均气温呈正相关;硝态氮、全磷与相对湿度呈负相关。与常帅^[40]、胡璐^[42]和王斌^[43]研究结果相似,却与张珊^[44]研究结果不一致。土壤铵态氮是植物所能直接吸收利用的矿化氮中的重要组成部分,其含量的变化几乎涉及到氮循环中所有生物过程^[42]。铵态氮的一系列反映均是在适宜的温度下进行的,但土壤铵态氮、全钾含量受平均气温影响之外,还与土壤微生物类型、有机质含量、土壤质地等因素影响。磷素是高寒草甸生态系统中主要的限制性生态要素之一,在土壤中存在多种形态,各形态间的转换关系极为复杂。磷素在土壤中迁移率差,是植物生长的主要限制因子^[45]。

硝态氮与全磷含量和相对湿度呈负相关关系,可能是因为高寒草甸土壤含水量对硝态氮和磷素的淋洗作用强烈,相对湿度会影响温度,进入改变土壤内部的环境因子间的耦合作用。同时,土壤磷素受到气候、母质等多种因素的影响。土壤酶、土壤酶活性是反映土壤肥力的指标,在一定程度上反映养分转化的动态变化,二者相互作用,共同维持并提高土壤肥力^[46]。试验地海拔较高,土壤冻土层受气象因子变化的影响,冻土层向土壤释放的养分及输入方式尚不清楚,可进一步探索土壤冻土受气象因子的变化及其冻土与气象因子对高寒草甸草地生态系统养分的影响机制。

由于研究区草地类型比较单一,并且青藏高原土壤冻土层对草地生态系统存在直接或间接的影响,导致未能充分探讨高寒草甸植被与土壤之间养分的变化及其分配机制,采样时未考虑微生物碳氮磷含量、微生物种类、植被根系分泌物、植被根际微生物等因素的影响,这些都是今后青藏高原高寒草甸植被与土壤养分的重点研究内容,从而可以全面揭示植被、土壤养分在高寒草甸的分配机制。

4 结论

本研究发现植被(地上部、根系)全氮与最低气温存在正相关关系;植被根系铵态氮与平均气温呈正相关,有机碳与日照时数呈正相关。植被铵态氮、全磷和全钾与气候因子无显著相关关系。0~15 cm土层中硝态氮、速效氮和全钾分别与平均气温、降水量和相对湿度呈正相关;铵态氮和有机碳分别与日照时数、相对湿度呈负相关。土壤15~30 cm土层中铵态氮和全钾与平均气温均呈正相关,硝态氮和全磷与相对湿度均呈负相关。本研究认为气象因子对高寒草甸植被和土壤养分的影响是通过影响植被生活史、根际微生物、植被养分利用策略的方式实现。

参考文献:

- [1] 张佳宁,张靖庚. 青藏高原高寒草甸资源可持续利用的放牧对策及建议[J]. 中国草食动物科学, 2017, 37(6): 63-67.
- [2] 张利,周广胜,汲玉河,等. 中国草地碳储量时空动态模拟研究[J]. 中国科学:地球科学, 2016, 46(10): 1392-1405.

- [3] Tan K, Ciais P, Piao S, *et al.* Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(1):1013-1024.
- [4] 武胜男, 张曦, 高晓霞, 等. 三江源区“黑土滩”型退化草地人工恢复植物群落的演替动态[J]. *生态学报*, 2019, 39(7):2444-2453.
- [5] 史惠兰, 王启基, 景增春, 等. 江河源区人工草地群落特征、多样性及其稳定性分析[J]. *草业学报*, 2005, 14(3):23-30.
- [6] 兰玉蓉. 青藏高原高寒草甸草地退化现状及治理对策[J]. *青海草业*, 2004, 13(1):27-30.
- [7] Wang C T, Cao G M, Wang Q L, *et al.* Changes in plant biomass and species composition of alpine *Kobresia* meadows along altitudinal gradient on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2008, 51(1):86-94.
- [8] 周学辉, 张力, 苗小林, 等. 青藏高原高寒草甸草场土一草一畜生态系统中钠、钾的季节变化研究[J]. *中国畜牧杂志*, 2006, 42(9):46-48.
- [9] 周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. *草业学报*, 2005, 14(3):31-40.
- [10] Lavado R S, Sierra J, Hashimoto P N. Impact of grazing on soil nutrients in a Pampean grassland [J]. *Journal of Range Management*, 1996, 49(5):452-457.
- [11] 张小芳, 张春平, 董全民, 等. 三江源区高寒混播草地群落结构特征的研究[J]. *草地学报*, 2020, 28(4):1090-1099.
- [12] 德科加. 施肥对三江源区高寒草甸初级生产力和土壤养分的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014.
- [13] 刘育红, 魏卫东, 杨元武, 等. 三江源区退化高寒草甸植物功能群特征[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(1):286-291.
- [14] 张胜权. 三江源地区草甸草场13种典型牧草营养价值评定研究[D]. 西宁:青海大学, 2013.
- [15] 郭艳红, 蒲小剑, 蒲小朋, 等. 青藏高寒牧区天然草地上生物量和营养品质的变化规律[J]. *草地学报*, 2021, 29(4):734-742.
- [16] 高亚君, 李亚娟, 姜智英, 等. 不同退化程度高寒草甸土壤磷素含量与碱性磷酸酶活性研究[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(5):81-87.
- [17] 王春燕, 杨冲, 宋成刚, 等. 三江源区高寒草地根系—土壤C、N、P生态化学计量特征[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(5):8-20.
- [18] Xu X, Sherry R A, Niu S, *et al.* Long-term experimental warming decreased labile soil organic carbon in a tallgrass prairie[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1):307-315.
- [19] McCulley R L, Burke I C, Nelson J A, *et al.* Regional patterns in carbon cycling across the Great Plains of North America[J]. *Ecosystems*, 2005, 8(1):106-121.
- [20] 马文红, 马文红, 方精云, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系[J]. *中国科学:生命科学*, 2010, 40(7):632-641.
- [21] 张文娟. 气候变化与放牧管理对三江源草地生物量和土壤有机碳的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
- [22] 郭彦军, 龙瑞军, 张德罡, 等. 东祁连山高寒草甸灌木和牧草营养成分含量季节变化动态[J]. *草业科学*, 2001, 18(6):36-39.
- [23] 孙鹏飞, 崔占鸿, 刘书杰, 等. 三江源区不同季节放牧草场天然牧草营养价值评定及载畜量研究[J]. *草业学报*, 2015, 24(12):92-101.
- [24] 向雪梅, 德科加, 冯廷旭, 等. 三江源区高寒草甸草场植被和土壤对外源氮素输入响应[J]. *草地学报*, 2021, 29(9):2010-2016.
- [25] 范广洲, 华维, 黄先伦, 等. 青藏高原植被变化对区域气候影响研究进展[J]. *高原山地气象研究*, 2008, 28(1):72-80.
- [26] 徐满厚, 薛娴. 青藏高原高寒草甸植被特征与温度、水分因子关系[J]. *生态学报*, 2013, 33(10):3158-3168.
- [27] 姜炎彬, 范苗, 张扬建. 短期增温对藏北高寒草甸植物群落特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(3):616-622.
- [28] 熊伟, 杨虹琦, 王正华, 等. 不同光照度与光照时数对培育烤烟壮苗的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(3):66-70.
- [29] 王旺田, 张金文, 王蒂, 等. 光质与马铃薯块茎细胞信号分子和糖苷生物碱积累的关[J]. *作物学报*, 2010, 36(4):629-635.
- [30] Franklin K A. Light and temperature signal crosstalk in plant development[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12(1):63-68.
- [31] 马文红, 杨元合, 贺金生, 等. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系[J]. *中国科学:生命科学*, 2008, 38(1):84-92.
- [32] 袁巧霞, 朱端卫, 武雅娟. 温度、水分和施氮量对温室土壤pH及电导率的耦合作用[J]. *应用生态学报*, 2009, 20

- (5):1112—1117.
- [33] 张秀敏,陈先江,侯扶江. 陇东典型草原不同坡向土壤呼吸对模拟降雨的短期响应[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1820—1824.
- [34] 李浪,李义博,马全会,等. 水分驱动下茵陈蒿地上生物量模型与异速生长特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 337—348.
- [35] 石岳. 青藏高原高寒草地地上净初级生产力和氮磷计量特征的年际动态及其在畜牧业中的意义[D]. 北京:北京大学. 2012. 2—3.
- [36] 赵艳艳,周华坤,姚步青,等. 长期增温对高寒草甸植物群落和土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(4): 665—671.
- [37] 陈永勤,冯勃,徐卫红,等. 小白菜硝酸盐含量与光照度及氮代谢关键酶的相关性[J]. 食品科学, 2016, 37(13): 183—188.
- [38] 张春来,杨芸,徐卫红,等. 环境温度对普通白菜硝酸盐含量、土壤硝态氮及氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国蔬菜, 2017, 344(10): 51—58.
- [39] 申胜龙,李援农,银敏华,等. 秸秆覆盖对夏玉米土壤温度和硝态氮的影响[J]. 节水灌溉, 2018, 270(2): 29—33.
- [40] 常帅,于红博,张巧凤,等. 锡林郭勒草原土壤速效氮空间变异分析[J]. 草业学报, 2021, 30(7): 11—21.
- [41] 王其兵,李凌浩,白永飞,等. 气候变化对草甸草原土壤氮素矿化作用影响的实验研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(6): 687—692.
- [42] 胡璐,李心清,黄代宽,等. 中国北方—蒙古干旱半干旱区土壤铵态氮的分布及其环境控制因素[J]. 地球化学, 2008, 37(6): 572—580.
- [43] 王斌,陈亚明,周志宇. 贺兰山西坡不同海拔梯度上土壤氮素矿化作用的研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 483—490.
- [44] 张珊,李玉,车克钧,等. 祁连山东段青海云杉林区土壤氮矿化与土壤因子的相关性[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 218—223.
- [45] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 193—195.
- [46] 谈嫣蓉,杜国祯,陈懂懂,等. 放牧对青藏高原东缘高寒草甸土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 86—91.

A study on the correlation between vegetation–soil nutrient content and meteorological factors in alpine meadows

LIN Wei-shan¹, DE Ke-jia^{1,2*}, QIAN Shi-yi¹, XIANG Xue-mei¹, FENG Ting-xu¹, WEI Xi-jie^{1,2}

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810013, China; 2. Academy of Animal Science and Veterinary Science, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] The study was conducted to reveal the response of alpine meadow vegetation soil nutrient content to changes in meteorological factors. [Method] One-way ANOVA, Duncan's method of analysis of variance (ANOVA) and Pearson's correlation analysis were used to investigate the correlation between and soil content of total nitrogen, total phosphorus, total potassium, organic carbon, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and quick nitrogen of alpine tarragon meadow and six meteorological factors, including mean annual air temperature, maximum air temperature, minimum air temperature, precipitation, relative humidity and hours of sunshine. [Result] Vegetation nutrients were significantly positively correlated with the minimum air temperature, average air temperature and sunshine hours from July to September ($P < 0.05$), while other indexes were not significantly correlated with climatic fac-

tors ($P > 0.05$); Nitrate nitrogen, quick nitrogen and total potassium in the soil layer of 0~15 cm were significantly positively correlated with the average air temperature, precipitation and relative humidity from July to September ($P < 0.05$), respectively. Ammonium nitrogen and organic carbon were significantly negatively correlated with sunshine hours and relative humidity, respectively ($P < 0.05$). Ammonium nitrogen and total potassium in the soil layer of 15~30 cm were significantly positively correlated with the average air temperature ($P < 0.05$). Nitrate nitrogen and total phosphorus were significantly negatively correlated with relative humidity ($P < 0.05$). **【Conclusion】** Vegetation nutrients, total potassium in the 0~15 cm and 15~30 cm soil layers were significantly and positively correlated with mean air temperature ($P < 0.05$).

Key words: meteorological factors; Sanjiangyuan District; alpine meadows; nutrients; soil