

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0005

LAN Aiyu, LIN Zhanju, FAN Xingwen, et al. Effects of aspects on soil environment and plant growth on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):42-53. [兰爱玉, 林战举, 范星文, 等. 坡向对青藏高原土壤环境及植被生长影响的实验研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):42-53.]

坡向对青藏高原土壤环境及植被生长影响的实验研究

兰爱玉^{1,2}, 林战举¹, 范星文^{1,2}, 姚苗苗^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 坡向差异导致不同坡面近地表水、热及能量平衡过程存在较大差异,进而影响了土壤环境及高寒植物的生长。基于青藏高原花石峡冻土观测基地建设的具有八个坡向的工程实体(简称八棱台),在6年后进行现场测量和实验测试,研究了坡向对青藏高原高寒植被生长环境及特性的影响。结果表明:各坡面近地表(10 cm和30 cm深度)土壤温度由高到低为:南坡>东南坡>西南坡>西坡>东坡>西北坡>东北坡>北坡,即相对朝阳坡面(东、东南、南和西南)温度明显高于相对背阳坡面(西、西北、北和东北)温度。而0~30 cm深度的土壤含水量朝阳坡面与背阳坡面之间差异不明显。地上植被长势(包括株高、覆盖度和地上生物量)朝阳坡面优于背阳坡面;地下植被长势(包括根深和地下生物量)朝阳坡面劣于背阳坡面。0~10 cm深度土壤有机碳和全氮含量基本是朝阳坡面高于背阳坡面;全磷含量朝阳坡面小于背阳坡面;各坡面之间全钾及速效养分的差异不显著($P>0.05$)。总体来看,高寒地区温度对植被生长及养分分布的影响更为显著。研究结果为不同坡向植被修复和能量平衡研究提供了参考资料。

关键词: 青藏高原; 坡向; 土壤温湿度; 高寒植被; 土壤养分

中图分类号: Q948.113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0042-12

0 引言

青藏高原作为世界“第三极”,因特殊的地理环境和生态系统,对全球变化十分敏感,是全球生态安全的重要屏障。地形作为青藏高原生态过程形成的基本因素,是造成该地区时空异质性的重要环境因子^[1-2]。在中高尺度上,地形主要通过坡向和海拔来实现水热的时空再分配,导致区域小气候存在较大的差异,进而对植被分布^[3]、土壤理化性质^[4]和微生物环境^[5]等造成了重要的影响。牛钰杰等^[6]在青藏高原东北缘山体的研究显示,阴坡的物种丰富度最高,阶地最低,随海拔的升高,阴坡和山脊的物种丰富度先增加后降低,而阳坡的物种丰富度呈线性增加。付建新等^[7]结合气温、降水、归一化植被指数(NDVI)和DEM数据,从海拔、坡度和坡向角度

探讨了祁连山南坡NDVI变化及其与气温和降水的关系,结果表明,NDVI值随海拔升高呈先增后降趋势,海拔2 700~3 700 m的植被覆盖度较好,>4 700 m植被出现退化现象,且阳坡的植被覆盖状况好于阴坡。Sharma等^[8]对喜马拉雅山地区不同坡向的森林组成、群落结构和土壤性质进行了研究,结果显示,北坡土壤含水量、持水量、有机碳、P和K含量均相对较高,且森林生产力也较高。宋雄儒等^[9]对贺兰山西坡不同海拔梯度草地的研究表明,0~10 cm和10~20 cm土壤层中的全磷含量随海拔下降呈显著降低趋势。杨帆等^[10]在祁连山中段阴阳坡地形序列的土壤有机碳和无机碳垂直分布特征的研究结果显示,阴坡平均土壤有机碳含量高于阳坡,但无机碳含量低于阳坡,且阴坡土壤有机碳含量随深度增加的下降速率低于阳坡。

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-08-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“高海拔多年冻土区局地坡向效应及水热差异定量化研究”(41971089);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905)资助

作者简介: 兰爱玉,硕士研究生,主要从事寒区环境与工程研究. E-mail: lanaiyu@nieer.ac.cn

在局地尺度上,辐射、光照、风速和降水等差异主要受坡向的控制,使得同一海拔高度上不同坡向土壤养分^[11]和植被生长状况^[12]存在较大的差异。Gong等^[13]在锡林河流域丘陵草地的研究显示,土壤可利用水分是限制南北坡植被生产力的首要因素,使得北坡的生产力和物种多样性高于南坡。马瑞等^[14]在东祁连山河谷高寒草地的研究显示,河谷阴坡植被群落的总科数、总属数、总种数和总盖度均高于阳坡,地上生物量分布为:阴坡下部>阳坡上部>阴坡上部>阳坡下部>水平阶地,而地下生物量的分布为:阴坡下部>阳坡下部>阴坡上部>水平阶地>阳坡上部,同时通过相关分析得到,土壤含水量、容重孔隙度和全氮等指标与植被总盖度、地上生物量、总科数、草地平均高度有显著的相关关系。刘旻霞等^[15]的研究表明,青藏高原高寒草甸区土壤养分含量除了有机碳和全氮为阴坡>阳坡>半阴半阳坡外,其他养分(全磷、碳氮比、速效磷等)总体呈现出:阴坡>半阴半阳坡>阳坡的规律,同时阴坡植物群落的物种多样性也高于阳坡。Kong等^[16]在黄土高原坡地的研究显示,东坡的总矿化氮和净矿化氮含量显著高于西坡。赵宁宁^[17]对青藏高原东部不同坡向-群落组合的土壤生物化学特性和碳氮矿化速率进行了研究,结果表明,朝南草甸群落的土壤总氮矿化和净氮矿化速率都显著大于朝北的灌丛群落,但无机氮含量却低于灌丛群落,这主要是由于灌丛植被生长速率低,对土壤氮素吸收也相对较低引起的。

综上可得,无论是在中高尺度还是在小尺度上,坡向是导致土壤养分分布和植被生长差异的重要间接环境因子,它主要通过改变温度和湿度来对植被及土壤养分产生影响。因此,探究坡向差异引起的温湿度差异与高寒植被生长特性及土壤养分之间的关系,深入剖析哪一因子的变化是引起青藏高原地区坡面植被和土壤养分差异的主导因素,对深入揭示坡向效应与高寒植被及养分空间分布之间的作用机制具有十分重要的意义。当前的研究大多是侧重于不同坡面的植被结构、丰富度、生产力和土壤温湿度及养分等差异的研究,鲜少对土壤养分、水热条件与植被生长状况间的关系进行系统性的分析,且目前研究都是基于自然坡面条件下,不能有效的排除其他地理因素(如土壤本底结构和性质等)的干扰。此外,由于实际的生态修复工程规模很难实现自然条件下地形差异,对自然条件下

的植被和土壤的研究对于生态修复等工程指导意义也相对有限。本研究基于青藏高原花石峡冻土观测基地建设的八棱台试验地,在尽可能保证其他因素相同的条件下,对八个坡面的植被、养分和温湿度分布特征进行了探究,并讨论了它们之间的作用关系,旨在揭示影响高寒植被生长及养分分布的主导因素,为青藏高原不同坡向的植被修复和能量平衡研究提供参考依据。同时,考虑到青藏高原不同走向的线型工程(如路基等)普遍存在坡向效应问题^[18],从根本上分析不同走向之间的坡向差异状况是十分必要的。因此研究对八棱台两两相对坡面的植被生长及养分分布状况进行了进一步的对比分析,旨在为将来线型工程的设计及维护提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验场地概况

试验场地位于青藏高原青海省果洛州玛多县东北部的花石峡多年冻土研究观测基地,地理坐标34°57'36" N, 98°33'36" E(图1),距离玛多县城45 km,海拔约4 260 m,属于典型的高寒草原气候,太阳辐射强烈,日照充足,昼夜温差大,冬春季节寒冷漫长,夏秋季节温凉短暂,2009—2019年的年平均气温约为-2.5℃,降水少且年际变化大,年平均降水量约为303.9 mm^[19],试验地区植物优势种为垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)。

2014年在青海交通科技项目的资助下,在该基地建设了高3.5 m,底边长20 m,顶边长15 m的八棱台观测实体2个(简称:八棱台),坡面朝向分别为北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)、西(W)、西北(NW)(图2)。八棱台台体填充材料直接来自场地就近取土,土质类型为砂砾土及碎石土。为了确保每个坡面的温湿度具有较好的对比性,台体填好后在每个坡面和顶面铺设30 cm厚的搅拌均匀的红棕色黏土。2015年在其中一个八棱台坡面及顶面布设了部分水、热、辐射监测系统,另一个八棱台受经费的限制,未安装任何监测设备,之后坡面开始生长垂穗披碱草。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 植被调查与分析

为研究坡向差异对植被生长的影响,2020年9月中旬对八棱台试验场地各坡面的植被种类、高度、盖度、根深、生物量等进行了详细的实地调查,

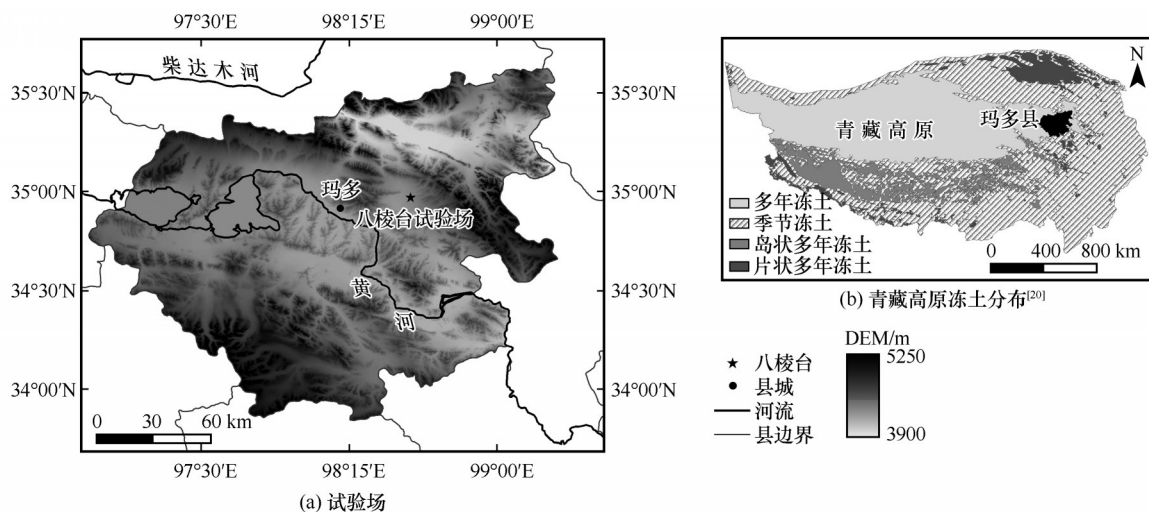


图1 试验场地位置

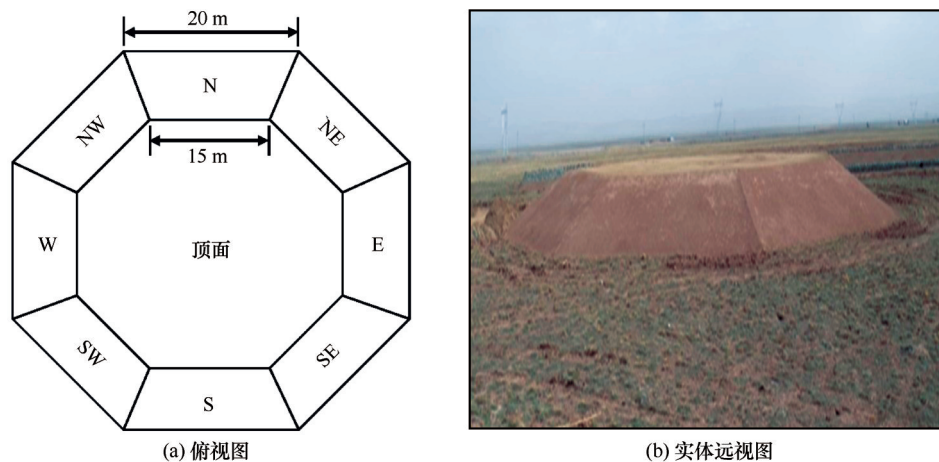
Fig. 1 Location of test site: test site (a); distribution of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau^[20] (b)

图2 八棱台试验场

Fig. 2 Test site of octagon platform: vertical view (a); entity hyperopia (b)

调查采用样地法进行。为全面反映各坡面的植被生长差异状况,在八棱台各个坡面的四角(左上、左下、右上和右下)和中心位置分别随机设置了一个 50 cm×50 cm 的正方形样方。调查各样方中的植被种类,测定并记录样方内植株的最大、中等和最小高度,然后计算三者的平均值作为该样方的平均植株高度。利用数码相机对样方进行重复垂直拍照,然后在 Photoshop CS4 软件中根据样框大小裁剪照片,并记录像素值,使用软件“选择”下拉菜单中的“彩色范围”选项,用“吸管”选择图像的植被部分,然后再根据实际情况用“魔术棒”工具适当调整选区,记录选区的像素。然后,根据公式(1)计算植被覆盖度^[21-23]。

$$\text{覆盖度}(P) = \frac{\text{植被选区像素}}{\text{样方像素}} \times 100\% \quad (1)$$

植被地上生物量采用刈割法直接获取^[1,24],然后挖取各样方中植被的地下部分,测量记录其根茎长度,装袋带回实验室,用水洗掉土壤,筛选出各样方的草根。植物样品在 105 ℃ 的烘箱内杀青后,用 70 ℃ 的温度烘至恒重,称得植被地上和地下生物量^[25]。

1.2.2 土壤湿度

在八棱台各坡面中心位置随机选取了一个采样点,垂直挖取一个约 30 cm 深的土坑,并在未扰动剖面的 10 cm、20 cm 和 30 cm 深度处采集适量的土样,现场称重获取各坡面的土壤湿重(m_1),然后采用烘干法测得土壤干重(m_2),最后,根据公式(2)计算各坡面的土壤质量含水量。

$$\theta = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: θ 为土壤含水率。

1.2.3 土壤养分特征

为获取各坡面表层土壤的养分特征,取0~10 cm深度的土样,测定有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、全钾(total potassium, TK)、碱解氮(alkali hydrolyzed nitrogen, AN)、有效磷(available phosphorus, AP)和速效钾(available potassium, AK)等指标。实验在甘肃省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所完成。其中,SOC含量采用重铬酸钾硫酸氧化-外加热法进行测定,TN、TP和TK分别采用凯氏定氮法、碱熔-钼锑抗比色法和碱熔-火焰光度法进行测定,AN、AP和AK采用碱解扩散法、碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法和乙酸铵浸提-火焰光度法进行测定^[25-28]。

1.2.4 土壤温度测量

八棱台各坡面地温数据通过安装温度传感器(Campbell-109, Salt-Lake-City, UT, USA)和数采仪(CR3000, Campbell, USA)来自动收集数据。温度传感器安装在10 cm和30 cm两个深度,用于测量各坡面近地表温度。传感器测量精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,测量范围为 $-50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。地温于2015年10月开始测量,每隔30 min记录一次,但受电池续航、维护困难及恶劣环境等的影响,2015—2018年间某些月份及近三年的地温数据存在缺失。为探究八棱台各坡面近地表温度的分布规律,本研究选取了与采样时间最为接近且较为完整的2016年9月和2017年9月的地温数据进行对比分析,同时还计算分析了各坡面2017—2018年的年平均地温。

1.3 数据分析

运用SPSS18.0软件进行数据分析,采用单因素方差法(One-way ANOVA)对不同坡向的各项植被特性指标(样品数: $n=5$)和土壤养分指标($n=3$)进行差异分析。采用Pearson相关分析法分析了土壤温湿度与植被特征指标之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同坡向近地表温湿度差异

图3为八棱台各坡面10 cm和30 cm深度2016年9月和2017年9月的月平均地温及2017—2018年的年平均地温分布曲线。从中可以看出,八棱台2016年9月、2017年9月和2017—2018年各坡面近地表地温的分布规律基本相同,大致呈:南坡>东南坡>西南坡>西坡>东坡>西北坡>东北坡>北坡的规

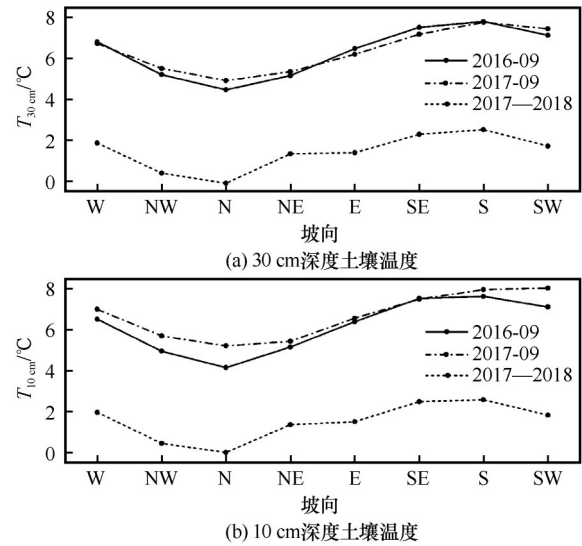


图3 不同坡向近地表土壤温度分布规律

Fig. 3 Distribution of surface soil temperature of different aspects

律。由此可知,八棱台相对朝阳的四个坡面即:东、东南、南和西南坡的近地表温度基本高于相对背阳的四个坡面即:西、西北、北和东北坡。其中温度最高的南坡和温度最低的北坡2016年9月、2017年9月和2017—2018年10 cm深度的平均温差分别达到了 3.5°C 、 2.8°C 和 2.6°C ;30 cm深度的平均温差分别为 3.3°C 、 2.9°C 和 2.6°C 。就分层土壤含水量而言(图4),西坡土壤含水量显著高于其他坡面,10、20和30 cm深度土壤含水量分别为19.2%、19.7%和21.6%,平均含水量达到了20.2%;而其余坡面土壤含水量均不高,不足13.0%。可以看出30 cm内坡向间的湿度差异不明显(除西坡以外),朝阳面和背阳面之间的差异也很小。

2.2 不同坡向植被生长差异

由表1可知,八棱台各坡面植物丰富度较小,坡

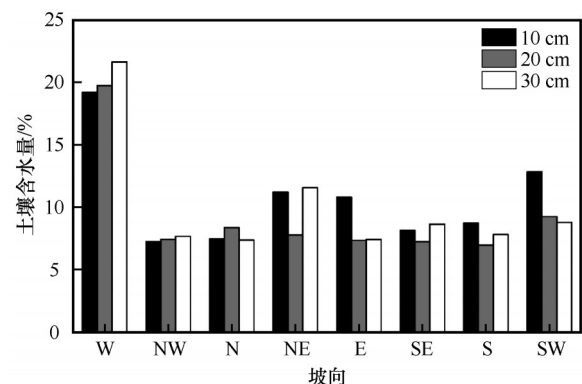


图4 不同坡面土壤含水率分布情况

Fig. 4 Distribution of soil water content of different aspects

表1 八棱台不同坡向主要植物组成

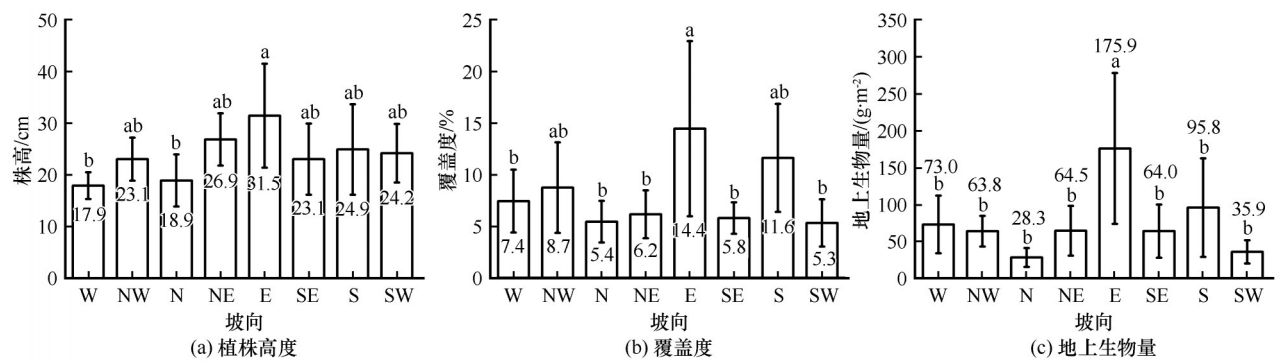
Table 1 The main plant species of different aspects of the octagonal platform

坡向	植物组成
西坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、二裂委陵草(<i>Potentilla bifurca</i> L.)
西北坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、马先蒿(<i>Pedicularis</i>)
北坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、二裂委陵草(<i>Potentilla bifurca</i> L.)
东北坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、二裂委陵草(<i>Potentilla bifurca</i> L.)、马先蒿(<i>Pedicularis</i>)
东坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、二裂委陵草(<i>Potentilla bifurca</i> L.)、马先蒿(<i>Pedicularis</i>)
东南坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、二裂委陵草(<i>Potentilla bifurca</i> L.)、马先蒿(<i>Pedicularis</i>)
南坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、二裂委陵草(<i>Potentilla bifurca</i> L.)、马先蒿(<i>Pedicularis</i>)
西南坡	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)、二裂委陵草(<i>Potentilla bifurca</i> L.)

面之间物种组成差异也较小。现场的实地调查显示,各坡面植被的优势种均为垂穗披碱草,伴生物种为马先蒿和二裂委陵草。其中,马先蒿主要分布于相对朝阳的坡面,而二裂委陵草除西北坡以外,其余坡面均有分布,但二裂委陵草长势较差,其植株高度和覆盖度均较低,分布连续性差。

在坡向差异影响下,八棱台植株高度、覆盖度和地上生物量呈现出一定的差异(图5)。东坡植株最高,平均高度可达到31.5 cm,西坡最低,平均高度仅为17.9 cm[图5(a)]。各坡面的植株高度排列顺序为:东>东北>南>西南>东南≈西北>北>西。对两两相对坡面进行对比分析可得,东坡的植株高于西坡,南坡高于北坡,西南坡略低于东北坡,东南坡与西北坡的植株高度差异较小,基本呈现出相对朝阳坡面植株高度大于背阳坡面的趋势。各坡面植被覆盖度的统计结果如图5(b),可以看出东坡的植被覆盖度最高,达到了14.4%,西南坡最低,仅为

5.3%。各坡面植被覆盖度的排列顺序为:东>南>西北>西>东北>东南>北>西南。对两两相对坡面进行对比分析可得,东坡植被盖度高于西坡,南坡高于北坡,西南坡略低于东北坡,东南坡低于西北坡。就坡向间的地上生物量统计分析可得[图5(c)],东坡植被地上生物量平均值达到了175.9 g·m⁻²,显著高于其他坡面($P<0.05$)。而其余坡面之间的地上生物量差异不显著($P>0.05$),其中北坡最低,平均值仅为28.3 g·m⁻²。各坡面地上生物量的排列顺序为:东>南>西>东北>东南>西北>西南>北。对两两相对坡面进行对比分析可得,东坡地上生物量大于西坡,南坡大于北坡,西南坡小于东北坡,东南坡大于西北坡。总体来看,相对朝阳坡面(E、S、SW和SE)地上植被的长势基本优于背阳坡面(W、N、NE和NW),特别是东西坡面、南北坡面的差异非常明显,东南和西北坡的差异较小,西南坡的长势略低于东北坡。



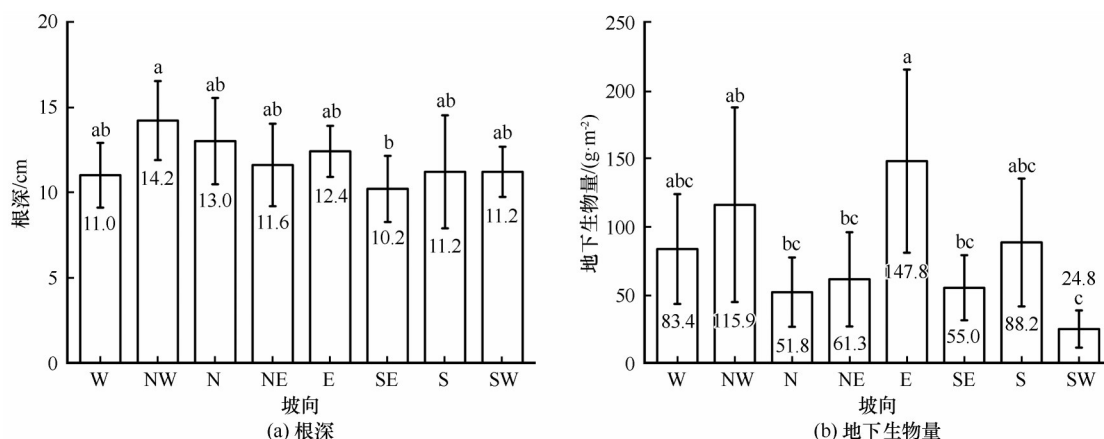
注: (1) 不同小写字母表示坡向间存在显著差异(在 $P<0.05$ 水平上); (2) 图中数据为各坡面上各项指标的平均值, 误差线为标准误。
Note: (1) Different lowercase letters indicate significant difference between slope aspects (at the $P<0.05$ level); (2) The data in the figure is the average value of each index on each slope, and the error bar is standard error. The same below.

图5 不同坡向植被地上生长情况

Fig. 5 Aboveground growth of vegetation of different aspects: plant height (a); coverage (b); aboveground biomass (c)

图6显示了不同坡面的根深及地下生物量情况,八棱台不同坡向植被根茎深度的差异相对较小

[图6(a)]。其中西北坡植被根深最大,平均值达到14.2 cm,东南坡根深最小,仅为10.2 cm,其他坡面



注: (1) 不同小写字母表示坡向间存在显著差异 (在 $P < 0.05$ 水平上); (2) 图中数据为各坡面上各项指标的平均值, 误差线为标准误差。

图6 不同坡向植被地下生长情况

Fig. 6 Underground growth of vegetation of different aspects: root depth (a); underground biomass (b)

之间差异较小。各坡面根茎深度排列顺序为: 西北>北>东>东北>南~西南>西>东南。对两两相反坡向进行分析可得, 朝阳坡面中仅东坡的根茎深度略大于西坡, 其余的南、西南和东南坡均小于相对应的北、东北和西北坡。虽然不同坡面根茎深度的差异较小, 但地下生物量却存在较大的差异。如图6(b)可得, 东坡地下生物量最高, 为 $147.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 西北坡次之, 为 $115.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 西南坡最低, 仅为 $24.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。各坡面地下生物量的排列顺序为: 东>西北>南>西>东北>东南>北>西南, 东坡大于西坡, 南坡大于北坡, 西南坡小于东北坡, 东南坡小于西北坡。总体的趋势是背阳坡面(W、N、NE和NW)的植物根系优于对应的朝阳坡面(E、S、SW和SE), 其原因主要与土壤温度和湿度相关。

2.3 不同坡向土壤理化性质差异

2.3.1 不同坡向土壤有机质和全量养分差异

受植被长势差异的影响, 不同坡面表层(0~10 cm深度)土壤SOC含量存在一定的差异[图7(a)]。其中, 东坡的土壤SOC含量最高, 为 $15.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 东北坡和西北坡的SOC含量相对较低, 分别为 $9.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其余坡面之间SOC含量无显著性差异($P > 0.05$)。各坡面SOC含量由高到低排序为: 东>东南>西>南>北>西南>东北>西北。两两相对坡面的比较表明, 四个朝阳坡面(E、S、SE和SW)的SOC含量分别高于相对应的四个背阳坡面(W、N、NW和NE)。八个坡面中TN含量的分布基本与SOC相似, 由高到低排列顺序为东>东南~西南>西>北>南>东北>西北, 东坡最高, 为 $1.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 西北坡最低, 为 $0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对于TP养分而言, 各坡面的含量均较低, 不足 $0.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 排列顺序为: 西>

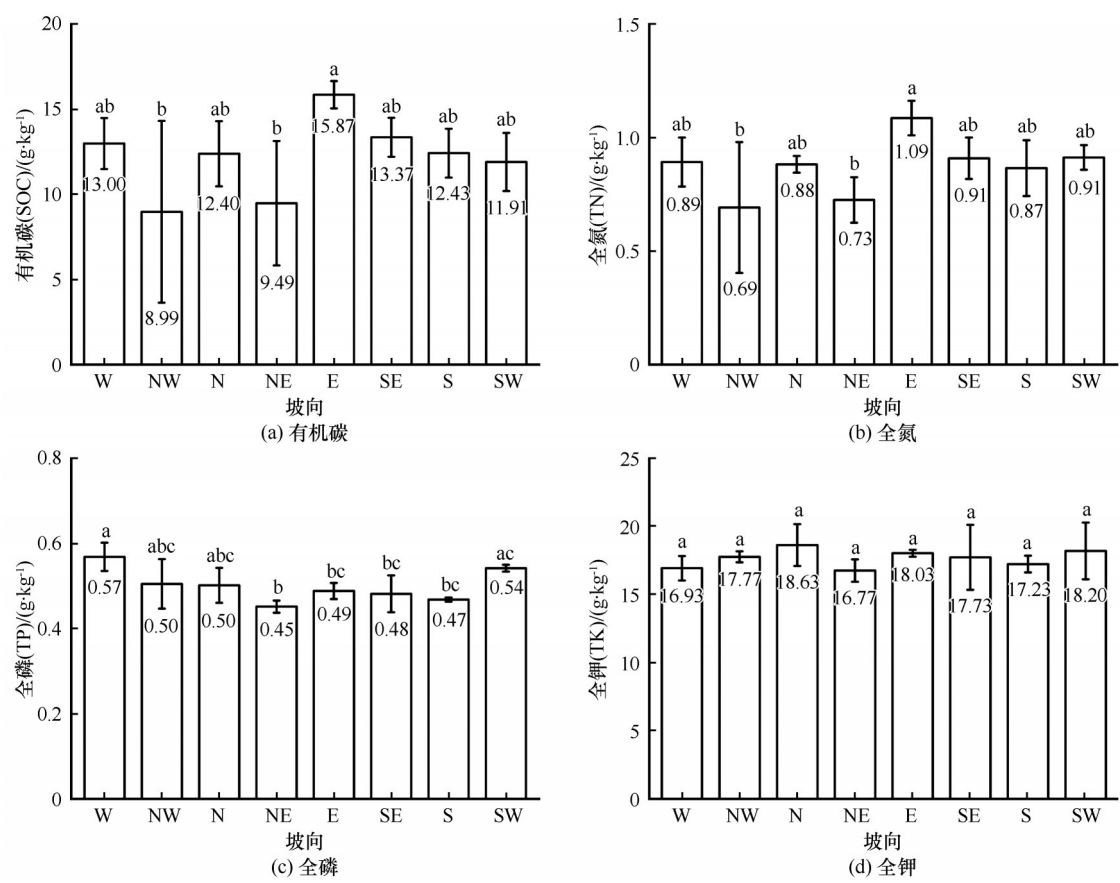
西南>西北~北>东>东南>南>东北。其中, 西、北、西北三个背阳坡面的TP含量分别高于对应的东、南和东南三个朝阳坡面, 而东北坡略低于西南坡。其中, 西坡的TP含量最高, 为 $0.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 东北坡的含量最低, 为 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。八棱台各坡面的TK含量相对较高, 均在 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 但各坡面之间无显著性差异($P > 0.05$)。由此可以看出, 研究中坡向差异对土壤SOC、TN和TP的影响较大, 而对TK的影响较小。

2.3.2 不同坡向土壤速效养分差异

青藏高原在低温环境的影响下, 土壤微生物活性大大受到抑制, 致使植被凋落物的分解速率十分缓慢, 因而土壤中速效养分的含量较低^[25]。实验测得, 花石峡八棱台各坡面近地表土壤速效养分远远低于全量养分, 尤其是AP和AK含量, 不足全量养分的1%。根据表2可得, 各坡面AN分布顺序为: 东>西南>东南>南>西>北>东北>西北, 可知, 四个朝阳坡面(E、S、SE和SW)的AN含量均高于相对应的背阳坡面(W、N、NW和NE)。AP的分布从高到低依次为: 西南>东南>北>南>东北>东>西北>西, 朝阳坡面中东、东南和西南(SW)的AP含量分别高于背阳坡面中西、西北和东北坡的含量, 仅南坡的含量略低于北坡。AK的分布顺序为: 西南>东南>南>东>东北>西>北>西北, 也基本呈现朝阳坡面高于背阳坡面的趋势。此外根据表2可得, 各坡面之间的碱解氮、有效磷和速效钾含量差异不显著($P > 0.05$)。

2.4 土壤温湿度与植被指标相关性分析

根据土壤温湿度与植被生长指标的相关性分析结果显示(表3), 近地表温度(10、30 cm)与植株高度、覆盖度和地上生物量呈正相关关系, 与根茎



注：(1) 不同小写字母表示坡向间存在显著差异（在 $P<0.05$ 水平上）；(2) 图中数据为各坡面上各项指标的平均值，误差线为标准误。

图 7 不同坡向 0~10 cm 土壤有机碳及 N、P 和 K 全量养分

Fig. 7 Soil organic carbon and total N, P and K contents in 0~10cm soil of different aspects: soil organic carbon (a); total nitrogen (b); total phosphorus (c); total potassium (d)

表 2 不同坡向近地表(0~10 cm)速效养分含量
(平均值±标准误)

Table 2 Available nutrient contents of different aspects in 0~10 cm layer (mean ± standard error)

坡向	碱解氮(AN)/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷(AP)/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾(AK)/ (mg·kg ⁻¹)
西坡	64.47±9.45a	1.19±0.20a	72.50±11.89a
西北坡	57.87±24.79a	1.61±0.34a	66.03±15.48a
北坡	62.97±6.40a	2.01±0.40a	70.70±5.27a
东北坡	58.37±14.80a	1.75±0.42a	73.30±13.58a
东坡	79.87±10.02a	1.70±0.21a	74.00±2.45a
东南坡	71.73±9.53a	2.14±0.52a	88.30±11.44a
南坡	68.23±1.60a	2.00±0.99a	78.30±4.94a
西南坡	72.50±4.48a	2.24±0.26a	91.17±21.12a

深度及地下生物量呈负相关关系,说明适当的增温在一定程度上有利于八棱台地上植被的生长。此外,由表3还可以看出,除植株高度以外,近地表温度与根茎深度、覆盖度、地上和地下生物量的相关系数绝对值基本大于土壤含水量与这些参数之间的相关系数绝对值,说明在花石峡八棱台试验场近

地表温度对植被生长的影响程度更大,而土壤含水量的影响程度较小。

3 讨论

3.1 坡向差异对土壤温湿度的影响

坡向作为重要的地形因子,影响着地表太阳辐射的接收,而太阳辐射又进一步影响了近地表气温、土壤温度和湿度等^[15],致使各坡面植被生长及土壤养分出现差异。研究中八棱台朝阳坡面 10 cm 和 30 cm 深度的土壤温度均高于背阳坡面,其中南坡的地温最高,北坡最低,该结果与乔永平等^[29]在改则地区的研究结果相似。造成朝阳坡面和背阳坡面地温这一差异的原因主要在于,朝阳坡面的太阳高度较大,光照时间较长(尤其是南坡),地表所接收的辐射能高于背阳坡面。坡向引起的土壤温度差异对近地面土壤含水量具有十分重要的影响。此外,植被也会影响地表土壤水分的变化过程。主要表现为:(1)植被能够削减到达地面的辐射量,从而减小了地面的蒸发量^[30]; (2)植被发育区域地表

表3 土壤温湿度与植被指标的相关关系

Table 3 The correlation between soil temperature and moisture and vegetation indices

指标	时间	深度/cm	株高/cm	根深/cm	盖度/%	地上生物量/(g·m ⁻²)	地下生物量/(g·m ⁻²)
含水量/%	—	10	-0.242	-0.421	-0.071	0.064	-0.070
		20	-0.590	-0.261	-0.184	-0.117	-0.063
		30	-0.485	-0.362	-0.202	-0.086	-0.067
地温/℃	2016年9月	10	0.215	-0.770*	0.237	0.287	-0.072
		30	0.156	-0.749*	0.258	0.285	-0.047
	2017年9月	10	0.080	-0.698*	0.137	0.124	-0.200
		30	0.083	-0.714*	0.165	0.143	-0.169
	2017—2018年	10	0.203	-0.868*	0.183	0.278	-0.099
		30	0.215	-0.856*	0.197	0.283	-0.089

注: * 表示在0.05水平显著相关。Note: * represent a significant correlation at the level of 0.05.

有机质含量较高,有利于水分的保持^[31-32](3)植被根系具有强大的保水功能^[33]。研究中西坡0~30 cm深度的土壤含水量显著高于其他坡面,原因主要在于西坡地处阴坡面且植被覆盖度相对较好,土壤水分含量较高。除西坡以外,三个背阳坡面0~30 cm深度的土壤含水量与四个朝阳坡面差异不明显,这主要受温度和植被的共同影响。朝阳坡面虽然地表温度较高,为蒸发提供了有利条件,但其植被长势及覆盖度好,利于水分的保持。背阳坡面与此相反,虽然地表温度较低,但植被覆盖度也较低,在风速等因素的作用下不利于水分的保持,所以朝阳坡面和背阳坡面的土壤含水量差异不显著。

3.2 坡向差异对植被生长的影响

在高海拔地区,植物所处的环境温度普遍低于生长的最优温度^[34],所以坡向差异引起的近地面温度差异对植被的生长及分布具有十分重要的影响。徐满厚等^[35]的研究表明,适度的升温对高寒植被的生长具有正效应,尤其是植株高度和地上生物量随温度的上升有增加的趋势。因为增温将直接改变高寒植物的光合作用能力和生长速率,促进植物的生长发育^[36]。研究中近地表温度(10和30 cm)与植株高度、覆盖度和地上生物量呈正相关关系,与根深及地下生物量呈负相关关系。所以四个朝阳坡面(E、S、SE和SW)的植株高度、覆盖度和地上生物量基本高于相对应的四个背阳坡面(W、N、NW和NE)。地下根系部分,背阳坡面的根系(除西坡以外)基本长于对应的朝阳坡面。原因主要在于,八棱台朝阳坡面辐射较强、光照较充足,近地表温度较高,为地上植被的生长创造了有利条件,促进了光合作用进行,使得植物生长中心主要集中在地上部分,所以朝阳坡面土壤中的养分和水分大部分用

于供给地上植被的生长所需,致使其根系生长受到了一定的限制。因而朝阳坡面相对于背阳坡面而言,植被地上部分的长势较好,地下部分的长势较差。由此可知,高寒地区温度对植被地上部分的影响较大,结果与徐满厚等^[37]的研究结果相似。

但当前一些研究也显示,增温处理下高寒植被根系的总生物量有所增加^[38],同时增温改变了地下生物量的分配格局,促使生物量向深层转移^[39]。这主要与增温幅度及土壤水分的变化密切相关。李娜等^[34]的研究显示,小幅度升温能够促使高寒草甸0~5 cm深度根系的生物量增加,5~20 cm的生物量比例减少,但变化不显著,在大幅度增温后,地上生物量分配比例减小,地下生物量逐步向深层根系转移。这主要是由于大幅度增温增强了地表的蒸发,致使浅层土壤含水量降低,植被为获取生长所需的水分,生长中心向根部转移,根系向土壤深处生长,根系伸长引起的^[40-41]。杨凯等^[42]在青藏高原的小蒿草草甸和藏蒿草沼泽化草甸的增温研究显示,增温降低了小蒿草草甸浅层土壤的含水量,导致其生物量转移至根系;而沼泽化草甸在增温的影响下,冻土发生融化,浅层土壤水分得到了很好的补给,再加上沼泽草甸的根系较发达,具有很强的持水保水能力,使得其生物量大多用于发育植被地上部分,以获得光照等资源的竞争力。本研究中虽然朝阳坡面的温度相对较高,但在植被覆盖度等的影响下,0~30 cm深度的土壤含水量与背阳坡面差异不大(除西坡以外),再加上优势种垂穗披碱草属于耐旱喜阳的植物种群,能够在稍干旱的生境下形成优势层片,所以适度增温促进了朝阳坡面地上植被的生长。

3.3 坡向差异对土壤养分的影响

土壤有机质、氮素和磷素等是土壤主要的养分指标,同时有机质还是形成土壤结构的重要因素,对土壤肥力、抗侵蚀能力和容重等具有直接的影响,是土壤特性的重要指标之一^[43]。植被生长可以逐渐富集土壤养分,土壤养分又促进植被的生长,所以坡向差异引起的植被生长差异对近地表(0~10 cm)土壤养分分布具有重要的影响作用。研究中朝阳坡面尤其是东坡的有机碳含量高于背阳坡面,主要是由于朝阳坡面的植被长势较好,且温度相对较高,在高寒环境下有利于植物凋落物的分解,所以有机碳含量相对较高。土壤有机碳又与 TN 存在显著的正相关关系^[44],有机碳的分解与累积直接影响氮在土壤中的转化和存储,对土壤氮元素起主导作用^[45-46],所以研究中八坡面的 TN 变化趋势大致与 SOC 相同,结果与李瑞等^[47]的研究结果相同。但研究中背阳坡面的 TP 含量基本高于朝阳坡面,这可能与背阳坡面植物群落的高度、盖度和生物量较低有关。因为背阳坡面的生物量较低,一方面影响了土壤中难溶磷的转化,另一方面也不能充分吸收土壤中已经转化的磷元素,最终使得磷元素累积^[48],所以即使朝阳坡面的植被长势及盖度相对较好,但其土壤中的 TP 含量依旧略微低于背阳坡面。

此外,不同坡向太阳辐射差异导致的土壤温湿度差异对土壤有机质、氮、磷和钾元素也具有一定的作用^[49-50]。本研究中各坡面的土壤含水量差异较小(除西坡以为),所以土壤水分对养分的影响也较小,因而本研究各坡面土壤养分差异主要受温度的控制。根据上述分析可知,温度可通过直接影响坡面植被的生长状况来对土壤养分含量产生间接影响。同时土壤温度与养分之间也存在较为复杂的关系。一方面,适度的升温有利于植物残体的分解和转化,增加土壤中有效养分的含量^[51],但同时也促进了植被对养分的吸收;另一方面,低温虽然抑制了动植物残体的分解,但在一定程度上利于养分的积累^[15],所以适宜的温度对土壤养分的累积和转化具有促进作用。研究中朝阳坡面的速效养分呈现出高于背阳坡面的趋势,这主要是因为气候寒冷的花石峡地区朝阳坡面较高的土壤温度利于微生物对养分的分解,所以其速效养分含量高于背阳坡面。但各坡面之间速效养分的这一差异却不显著。原因可能在于,八棱台建设至今时间较短,而

植被从生长到凋落再到分解所需的时间较长,所以各坡面之间的土壤速效养分分解量均较小,故差异不显著。

4 结论

坡向对青藏高原高寒植被和土壤性质具有十分重要的影响,文章对青藏高原花石峡八棱台试验场不同坡向的植被生长特性及环境进行了研究,得到了以下主要结论:

(1)在坡向的控制下,八棱台朝阳坡面所接收的太阳辐射较高,使得近地表(10 cm 和 30 cm 深度)土壤温度高于背阳坡面,其中南坡的地温最高,北坡最低。而浅层(0~30 cm 深度)土壤含水量在地温及植被的共同影响下,朝阳坡面与背阳坡面(除西坡以外)之间的差异较小。所以研究中坡向差异引起的土壤温度差异对各坡面植被生长及养分分布的影响较大,是造成各坡面差异的主要因素,而土壤含水量的影响较小。

(2)适度的增温有利于高寒地区植被的生长(尤其是地上部分)。八棱台相对朝阳的四个坡面由于近地表温度较高且光照时间较长,植物生长中心集中于地上部分,使得土壤养分及水分主要用于供给地上植被的生长。所以朝阳坡面植株高度、覆盖度和地上生物量均高于相对应的背阳坡面,而地下根茎深度和生物量均小于背阳坡面。

(3)朝阳坡面较好的植被长势为土壤养分提供了有效的物质来源,再加上土壤温度相对较高,有利于植被凋落物等的分解,使得朝阳坡面 SOC 和 TN 含量高于背阳坡面。但 TP 含量由于背阳坡面的生物量较低,对土壤中难溶磷的转化及磷元素的吸收具有一定的限制,所以背阳坡面的 TP 积累量高于朝阳坡面。而各坡面 TK 无显著性差异($P>0.05$)。此外,由于八棱台建设距今时间较短,各坡面速效养分的差异不显著($P>0.05$)。

(4)坡向差异通过影响坡面光照和辐射强度的差异,进而影响坡面的温湿度、植被生长环境、土壤养分、能量平衡。定量化的研究对未来高原线性工程选线、次生病害防治、高寒植被修复具有重要意义。本文受条件的限制,仅开展了坡面温湿度与植被生长环境之间的研究。下一步将系统开展坡向差异影响下的地气能量平衡过程研究。

参考文献(References):

- [1] Xu Changlin. Variations in vegetation composition and nutrient

- characteristics related to aspect in an alpine meadow in the northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(4): 26-35. [徐长林. 坡向对青藏高原东北缘高寒草甸植被构成和养分特征的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(4): 26-35.]
- [2] Wang Yanlong, Wang Xiaoli, Ma Yushou. Effect of slope aspect on vegetation growth and soil nutrient characteristics of alpine grassland in the source region of Yangtze River[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(10): 2336-2346. [王彦龙, 王晓丽, 马玉寿. 坡向对长江源区高寒草地植被生长和土壤养分特征的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(10): 2336-2346.]
- [3] Lei Longju, Zhao Jinmei, Zhang Xue, et al. Study on the community characteristics and biomass allocation of different vegetation in the Eastern Qilian Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(5): 853-863. [雷隆举, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段不同植物群落的特征及生物量分配[J]. 草业科学, 2020, 37(5): 853-863.]
- [4] Carletti P, Vendramin E, Pizzeghello D, et al. Soil humic compounds and microbial communities in six spruce forests as function of parent material, slope aspect and stand age[J]. *Plant and Soil*, 2009, 315(1/2): 47-65.
- [5] Chu Haiyan, Xiang Xingjia, Yang Jian, et al. Effects of slope aspects on soil bacterial and arbuscular fungal communities in a boreal forest in China[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 226-234.
- [6] Niu Yujie, Zhou Jianwei, Yang Siwei, et al. Quantitative apportionment of slope aspect and altitude to soil moisture and temperature and plant distribution on alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1489-1497. [牛钰杰, 周建伟, 杨思维, 等. 坡向和海拔对高寒草甸山体土壤水热和植物分布格局的定量分解[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1489-1497.]
- [7] Fu Jianxin, Cao Guangchao, Guo Wenjiong. Changes of growing season NDVI at different elevations, slopes, slope aspects and its relationship with meteorological factors in the southern slope of the Qilian Mountains, China from 1998 to 2017[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1203-1212. [付建新, 曹广超, 郭文炯. 1998—2017年祁连山南坡不同海拔、坡度和坡向生长季NDVI变化及其与气象因子的关系[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1203-1212.]
- [8] Sharma C M, Baduni N P, Gairola S, et al. Effects of slope aspects on forest compositions, community structures and soil properties in natural temperate forests of Garhwal Himalaya[J]. *Journal of Forestry Research*, 2010, 21(3): 331-337.
- [9] Song Xionggu, Shang Zhenyan, Li Xudong, et al. Soil phosphorus and influencing factors in the grasslands at different elevations on west-slope of Helan Mountain, Inner Mongolia[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(7): 1054-1060. [宋雄儒, 尚振艳, 李旭东, 等. 贺兰山西坡不同海拔梯度草地土壤磷特征及其影响因素[J]. 草业科学, 2015, 32(7): 1054-1060.]
- [10] Yang Fan, Huang Laiming, Li Decheng, et al. Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1226-1236. [杨帆, 黄来明, 李德成, 等. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1226-1236.]
- [11] Zhang Qian, Yao Baohui, Wang Chan, et al. Soil physical and chemical characteristics and microbial proportions in an alpine meadow with different slopes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3167-3174. [张倩, 姚宝辉, 王缠, 等. 不同坡向高寒草甸土壤理化特性和微生物数量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3167-3174.]
- [12] Sternberg M, Shoshany M. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: comparison of a semiarid and an arid site in Israel[J]. *Ecological Research*, 2001, 16(2): 335-345.
- [13] Gong X, Brueck H, Giese K M, et al. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(4): 483-493.
- [14] Ma Rui, Zhao Jinmei. Relationship between the grassland and soil conditions in the Eastern Qilian Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(2): 374-381. [马瑞, 赵锦梅. 东祁连山河谷高寒草地植被群落特征及其与土壤性状的关系[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 374-381.]
- [15] Liu Minxia, Wang Gang. Responses of plant community diversity and soil factors to slope aspect in alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 259-265. [刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学报, 2013, 32(2): 259-265.]
- [16] Kong Weibo, Yao Yufei, Zhao Zhongna, et al. Effects of vegetation and slope aspect on soil nitrogen mineralization during the growing season in sloping lands of the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 172: 753-763.
- [17] Zhao Ningning. Aspect-community complex effects on soil biochemical characteristics and decomposability of soil organic carbon and nitrogen on eastern Qinghai-Tibetan Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. [赵宁宁. 青藏高原东部山区坡向一群落组合对土壤生物化学特性和碳氮矿化的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.]
- [18] Zhang Luxin, Yuan Sicheng, Yang Yongping. Mechanism and prevention of deformation cracks of embankments in the permafrost region along Qinghai-Xizang Railway[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 604-610. [张鲁新, 原思成, 杨永平. 青藏铁路多年冻土区路基变形裂缝发生机理及其防治[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 604-610.]
- [19] Yang Yongmei, Li Huimei, Gao Zebing, et al. Relevance of vegetation degradation and soil nutrient at Huashixia Area of Three River Source Region in China[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(2): 361-367. [杨永梅, 李惠梅, 高泽兵, 等. 三江源花石峡地区植被退化与土壤养分的关联[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 361-367.]
- [20] Li Shude, Cheng Guodong. Map of frozen ground on Qinghai-Xizang Plateau[M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996. [李树德, 程国栋. 青藏高原冻土图[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996.]
- [21] Su Zhanxiong. Estimation of shrub and grassland vegetation aboveground biomass using photography method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. [苏占雄. 利用照相方法估算灌木和草地植被地上生物量的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.]
- [22] Zhang Beibei. Information extraction method of vegetation coverage in small scale[J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2012, 41(3): 18-20. [张蓓蓓. 小尺度样方植被覆盖度信息提取方法的探索[J]. 山西林业科技, 2012, 41(3): 18-20.]
- [23] Ji Zengbao. A simple method to calculate vegetation coverage with digital photos and Photoshop[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2015(5): 10-11. [吉增宝. 用数码照片和Photoshop计算植被覆盖度的简易方法[J]. 水土保持应用技术, 2015(5): 10-11.]
- [24] You Quangang, Xue Xian, Peng Fei, et al. Alpine meadow

- degradation effect on soil thermal and hydraulic properties and its environmental impacts [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(5): 1183-1192. [尤全刚, 薛娴, 彭飞, 等. 高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1183-1192.]
- [25] Yue Guangyang, Zhao Lin, Zhao Yonghua, et al. Relationship between soil properties in permafrost active layer and surface vegetation in Xidatan on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 565-573. [岳广阳, 赵林, 赵拥华, 等. 青藏高原西大滩多年冻土活动层土壤性状与地表植被的关系[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 565-573.]
- [26] Hao Aihua, Xue Xian, Peng Fei, et al. Different vegetation and soil degradation characteristics of a typical grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 964-975. [郝爱华, 薛娴, 彭飞, 等. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 964-975.]
- [27] Wang Yibo, Wang Genxu, Zhang Chunmin, et al. Response of soil physicochemical properties to the changes of the vegetation ecosystem on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 921-927. [王一博, 王根绪, 张春敏, 等. 高寒植被生态系统变化对土壤物理化学性状的影响[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 921-927.]
- [28] Ma Lvyi, Zhai Mingpu, Lin Ping. Analysis of soil physicochemical properties of Beijing Xishan Mountain [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1999, 21(1): 32-37. [马履一, 翟明普, 林平. 京西山土壤理化性质的分布[J]. *北京林业大学学报*, 1999, 21(1): 32-37.]
- [29] Qiao Yongping, Zhao Lin, Pang Qiangqiang, et al. Characteristics of permafrost in Gerze County on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(6): 1453-1460. [乔永平, 赵林, 庞强强, 等. 青藏高原改则地区多年冻土特征[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(6): 1453-1460.]
- [30] Chang Xiaoli, Jin Huijun, Wang Yongping, et al. Influences of vegetation on permafrost: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7981-7990. [常晓丽, 金会军, 王永平, 等. 植被对多年冻土的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7981-7990.]
- [31] Fisher J P, Estop-Aragonés C, Thierry A, et al. The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3127-3140.
- [32] Liu Xiaodong, Qiao Yuna, Zhou Guoyi. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(12): 1209-1218. [刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(12): 1209-1218.]
- [33] Wang Genxu, Hu Hongchang, Li Yuanshou, et al. Impacts of changes in vegetation cover on soil water heat coupling in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(3): 327-341.
- [34] Li Na, Wang Genxu, Yang Yan, et al. Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 895-905. [李娜, 王根绪, 杨燕, 等. 短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(4): 895-905.]
- [35] Xu Manhou, Xue Xian. Analysis on the effects of climate warming on growth and phenology of alpine plants [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(3): 137-141. [徐满厚, 薛娴. 气候变暖对高寒地区植物生长与物候影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(3): 137-141.]
- [36] Jarvis A J, Stauch V J, Schulz K, et al. The seasonal temperature dependency of photosynthesis and respiration in two deciduous forests [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(6): 939-950.
- [37] Xu Manhou, Xue Xian. Correlation among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3158-3168. [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.]
- [38] Xu Manhou, Liu Min, Zhai Datong, et al. Effects of experimental warming on the root biomass of an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6812-6822. [徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 模拟增温对青藏高原高寒草甸根系生物量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6812-6822.]
- [39] Yu Xinchao, Yao Buqing, Zhou Huakun, et al. Variable responses to long-term simulated warming of underground biomass and carbon allocations of two alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(4): 379-388. [余欣超, 姚步青, 周华坤, 等. 青藏高原两种高寒草甸地下生物量及其碳分配对长期增温的响应差异[J]. *科学通报*, 2015, 60(4): 379-388.]
- [40] Chen Mingtao, Zhao Zhong. Effects of drought on root characteristics and mass allocation in each part of seedlings of four tree species [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(1): 16-22. [陈明涛, 赵忠. 干旱对4种苗木根系特征及各部分物质分配的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(1): 16-22.]
- [41] Liu Jinchun, Zhong Zhangcheng. Influence of water stress and re-watering on the root growth of *Cupressus funebris* Endl. seedlings in the limestone area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6439-6445. [刘锦春, 钟章成. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6439-6445.]
- [42] Yang Kai, Wang Genxu, Zhang Tao, et al. Responses of root functional traits to experimental warming in the alpine meadow with different soil moisture in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6362-6373. [杨凯, 王根绪, 张涛, 等. 青藏高原多年冻土区不同水分条件的高寒草甸根系功能性状对增温的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6362-6373.]
- [43] Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Zhou Li, et al. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the 'Alpine Meadow' of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14(3): 31-40. [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.]
- [44] Fu Hua, Pei Shifang, Zhang Hongrong. Total soil nitrogen in the grasslands at different elevations on west-slope of Helan Mountain, Inner Mongolia [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14(6): 50-56. [傅华, 裴世芳, 张洪荣. 贺兰山西坡不同海拔梯度草地土壤氮特征[J]. *草业学报*, 2005, 14(6): 50-56.]
- [45] Wang Guoliang, Liu Guobin, Xu Mingxiang. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(1): 1-5. [王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. *水土保持*

- 持通报, 2002, 22(1): 1-5.]
- [46] Wang Jun, Fu Bojie, Qiu Yang, et al. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 48(4): 537-550.
- [47] Li Rui, Liu Minxia, Zhang Can, et al. Distribution characteristics of soil microbial communities along different slope direction of Gannan sub-alpine meadows[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(11): 1884-1891. [李瑞, 刘旻霞, 张灿, 等. 甘南亚高寒草甸不同坡向土壤微生物群落分布特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1884-1891.]
- [48] Wang Ting, Zhang Yongchao, Zhao Zhichong. Characteristics of the vegetation community and soil nutrient status in a degraded alpine wetland of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(4): 9-18. [王婷, 张永超, 赵之重. 青藏高原退化高寒湿地植被群落结构和土壤养分变化特征[J]. 草业学报, 2020, 29(4): 9-18.]
- [49] Fang Jingyun, Shen Zehao, Cui Haiting. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology[J]. Chinese Biodiversity, 2004, 12(1): 10-19. [方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 10-19.]
- [50] Liu Minxia, Ma Jianzu. Responses of plant functional traits and soil factors to slope aspect in alpine meadow of South Gansu, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3295-3300. [刘旻霞, 马建祖. 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3295-3300.]
- [51] Bao Ya, Dawa Zhuoma. Different elevation of temperature humidity effects on soil nutrients[J]. Qinghai Prataculture, 2014, 23(4): 16-18. [保娅, 达哇卓玛. 不同海拔高度温、湿度对土壤养分的影响[J]. 青海草业, 2014, 23(4): 16-18.]

Effects of aspects on soil environment and plant growth on the Qinghai-Tibet Plateau

LAN Aiyu^{1,2}, LIN Zhanju¹, FAN Xingwen^{1,2}, YAO Miaomiao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The different aspects lead to great differences in the processes of water, heat, and energy balance, which further affect the soil environment and the growth of alpine plants. Based on an experimental study with eight aspects (abbreviated as octagonal platform) of Huashixia frozen soil observation base on the Qinghai-Tibet Plateau, the influence of aspects on soil environments and alpine vegetation growth was studied. The results showed that: (1) After 6 years, the soil temperature of each slope near the surface (10 cm and 30 cm depth) from high to low was as follows: south > southeast > southwest > west > east > northwest > northeast > north, that is, the relatively sunny slope (east, southeast, south and southwest) was higher than the relatively shady slope (west, northwest, north and northeast). However, there was no significant difference in soil water content between the sunny slope and the shady slope at the depth of 0~30 cm. (2) The growth trend of aboveground vegetation (including plant height, coverage and aboveground biomass) on sunny slope was better than that on shady slope. The growth trend of underground vegetation (including root depth and underground biomass) on sunny slope was worse than that on shady slope. (3) In the depth of 0~10 cm, the content of soil organic carbon and total nitrogen on sunny slope was higher than that on shady slope. However, the content of total phosphorus on sunny slope was lower than that on shady slope. There was no significant difference in total potassium and available nutrients among different slopes ($P>0.05$). In general, the effect of temperature on vegetation growth and nutrient distribution is significant in alpine regions, and these findings provides an important reference for vegetation restoration and energy balance research in different aspects.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; aspects; soil temperature and water; alpine vegetation; soil nutrients

(责任编辑: 吴晓东)