

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0006

ZHANG Mengxu, LIU Wei, ZHU Meng, et al. Responses of soil properties and vegetation biomass to slope aspect and position in forest-steppe zone of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):233-241. [张梦旭, 刘蔚, 朱猛, 等. 祁连山森林草原带土壤属性和植被生物量对坡向和坡位的响应[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):233-241.]

# 祁连山森林草原带土壤属性和植被生物量 对坡向和坡位的响应

张梦旭<sup>1,2</sup>, 刘蔚<sup>1</sup>, 朱猛<sup>1</sup>, 秦燕燕<sup>1</sup>, 李若麟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 祁连山森林草原带为典型的山地森林和草原镶嵌景观, 带内植被呈显著的斑块状分布格局, 与地形因子密切相关。探究森林草原带内地形因子与土壤和植被的关系, 对该区生态恢复具有重要意义。采用样地-样方调查法, 研究了祁连山森林草原带土壤属性和植被生物量随坡向(南、西南、西和北)和坡位(山顶、上坡、中坡、下坡和山谷)的变化特征及其与水热因子的关系。结果表明: 坡向梯度上, 北坡土壤有机碳含量为  $50.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮含量为  $2.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 土壤含水量为 32.86%, 地上和地下生物量为  $5.09$  和  $6.39 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 分别为南坡的 2.54、3.97、2.07、24.62 和 149.30 倍。坡位梯度上, 土壤有机碳、全氮、全磷、土壤含水量在山谷最大, 分别为  $50.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 32.01%, 是山顶的 1.73、1.69、1.56 和 1.30 倍, 山坡的 1.92、2.85、1.74 和 1.46 倍。回归分析显示, 土壤含水量是限制祁连山森林草原带土壤碳氮含量和草地生物量分布的主要环境因子, 复相关系数在 0.74~0.93 之间。

**关键词:** 土壤属性; 植被生物量; 坡向; 坡位; 森林草原带

**中图分类号:** S812.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0233-09

## 0 引言

高寒山区是内陆河流域重要的水源涵养区, 山区生态系统中土壤和植被的格局与演化将导致出山径流发生变化, 对中下游农田和荒漠绿洲区的生态安全造成影响。高寒山区的生态系统本身较为脆弱且对气候变化响应敏感, 在气候变暖和人类活动的影响下土壤和植被可能发生退化, 进而导致生态系统功能减弱或丧失。然而, 高寒山区下垫面复杂, 水热梯度巨大, 地形因子主导下的水热格局对山区生态系统中土壤和植被空间异质性的影响依然不清。定量描述地形梯度上土壤和植被属性的变化规律, 有助于理解山区复杂地形条件下土壤和植被的空间异质性, 进而确定生态恢复的高保护价

值区, 明确生态退化区的土壤及植被恢复潜力, 对制定气候变化条件下有效生态保护和恢复措施具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

地形是塑造山区土壤和植被格局的重要环境因子, 特别是海拔, 通过改变垂直方向上的温度及降水格局, 使土壤和植被类型呈明显的垂直地带性分布<sup>[1]</sup>。在同一海拔带内, 坡向和坡位通过改变坡面接收的太阳辐射量和水文过程, 形成影响山区小尺度上土壤及植被格局的重要微地形因子<sup>[3-4]</sup>。研究发现, 阴坡因水热组合优于阳坡, 其植被生物量和土壤碳、氮含量通常高于阳坡<sup>[4-7]</sup>。而从山顶到山谷, 在土壤侵蚀程度逐渐加重的情况下, 植被和土壤养分的变化趋势与之相反<sup>[8-9]</sup>。坡向和坡位在小尺度上对成土过程和植被生长的

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2020-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771252; 41801079; 41901100); 甘肃省自然科学基金重大项目(18JR4RA002), 甘肃省重点研发计划项目(20YF8FA002); 甘肃省林业和草原科技创新计划(GYCX[2020]01)资助

作者简介: 张梦旭, 硕士研究生, 主要从事山地生态系统碳循环研究. E-mail: zhangmx123@lzb.ac.cn

通信作者: 刘蔚, 研究员, 主要从事自然地理研究. E-mail: weilu@lzb.ac.cn

重塑,是同一海拔带内土壤和植被属性空间异质性的主要来源。准确理解这种异质性,对山区生态退化区土壤和植被的重建具有重要的参考价值。

祁连山是我国西北典型的高寒山区,是黑河、石羊河、疏勒河的水源地<sup>[10-11]</sup>,对内陆河流域的生态安全和社会的可持续发展具有重要意义。山区海拔2 500~3 300 m为典型的森林和草原镶嵌景观,山地森林呈斑块状分布在阴坡及半阴坡,草地则主要分布在阳坡、半阳坡及较为平坦的山顶、山谷和台地。这种特殊的景观格局使得该区土壤和植被属性的空间格局与地形因子密切相关,为研究高寒山区小尺度上地形-土壤-植被关系提供了理想场所。本研究通过选取典型的森林草原景观进行野外调查和室内分析,对祁连山森林草原带土壤主要属性和植被生物量随坡向和坡位的变化规律及其与水热因子的关系进行了研究,旨在加深对高寒山区小尺度上土壤属性及植被生产力空间异质性的理解,进而为祁连山森林草原带内生态退化区的土壤恢复与植被重建提供基础数据参考。

## 1 研究区概况

研究区位于祁连山自然保护区的西水林区(38°23′~38°48′ N, 100°03′~100°23′ E),属于甘肃省肃南裕固族自治县,该区气候为高寒半干旱气候,年平均气温-1.5~2.0℃,年降水量330~540 mm,90%的降水集中在6—9月,年均蒸发量为1 488 mm<sup>[12-13]</sup>。景观格局为山地森林草原,其中草地面积约55%,主要分布在阳坡、半阳坡及地势平缓的山顶和谷地,林地面积约38%,主要分布在阴坡和半阴坡。

采样点位于西水林区海拔2 912 m处的一座具有完整坡向和坡位梯度的山体(图1),景观类型是典型的森林草原,且是冬季牧场,生长季放牧干扰较小。林地分布在北坡,建群种为青海云杉(*Picea crassifolia*),郁闭度为0.70,林下有少量灌木及草本植物。草地分布在南坡、西南坡、西坡、山顶及山谷,南坡和西南坡,太阳辐射强烈,土壤水分较少,植被以耐旱的冰草(*Agropyron cristatum*)、密生苔草(*Carex crebra*)为主,盖度为40%,具有干草原的特征。西坡和山顶水分条件介于南、北坡之间,植被较为茂密,以矮蒿草为主(*Kobresis humilis*),盖度为



图1 采样点的景观及地貌

Fig. 1 Map showing the landscape and landform of the sampling sites

65%。山谷水热条件好,草层高而茂密,以马蔺(*Iridaceae*)和银露梅(*Potentilla glabra*)为主,盖度达95%。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

在南(180°)、西南(225°)、西(270°)和北坡(360°)的上坡(坡面上部1/3)、中坡(坡面中部1/3)、下坡(坡面下部1/3)及山坡底端的山谷(距离山坡底端约20~50 m)各设置一个10 m×30 m的样地,每个样地内设置3个5 m×5 m(在北坡青海云杉林,样方大小改为10 m×10 m)的样方。另外,在山顶设置3个5 m×5 m的样方(图1)。调查样方内所有青海云杉的高度、冠幅和胸径,根据文献中的公式,估算林地地上和地下生物量<sup>[14]</sup>。草地地上生物量的获取采用收获法,根生物量的获取采取根钻法,每个坡位3个重复。在每个样方内用直径5 cm的土钻沿对角线在0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm和40~60 cm取样,分深度混合后得到4个混合样,用于土壤化学性质分析。另外,再挖开一个剖面,用环刀法在5、15、30和50 cm处取土,用于分析土壤容重及土壤含水量。土壤温度通过在各坡面中坡土壤5 cm深处理设地温计获取,记录间隔为5 min。选择2015年7月29日20:00至7月31日20:00(北京时间)考察晴朗无云的天气条件下各坡面土壤温度的日变化。

### 2.2 样品分析

环刀采集的样品当天在野外台站用天平(精确到0.01 g)称量鲜重,然后采用烘干法获得土壤容重和含水量数据。土钻采集的样品带回实验室风干

后过筛研磨,用于土壤理化性质分析,其中,土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定,全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定,全磷含量采用钼锑抗比色法测定<sup>[15]</sup>,土壤机械组成采用激光粒度仪测定(Mastersizer 2000,英国 Malvern 公司)。由于采样山地缺乏实测气象数据,热量条件通过计算各样地年潜在直接太阳辐射量来评估<sup>[16]</sup>。

### 2.3 统计分析

采用一般线性模型(General Linear Model, GLM)进行方差分析和回归分析,多重比较用新复极差法(Duncan),显著性水平设为 0.05,所有数据

表示为:均值±标准误。所有统计分析在 SAS 9.2 (SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA)中完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同地形条件下土壤属性的分布特征

从南坡到北坡,土壤 5 cm 深处最高温度出现的时间向后推迟,温度变化幅度降低[图 2(a)]。平均温度在南坡、西南坡、西坡和北坡分别为 22.1、22.3、17.9、7.9 °C[图 2(b)],年潜在直接入射辐射量分别为 1.06、0.99、0.77 和 0.58 MJ·cm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>[图 2(c)]。

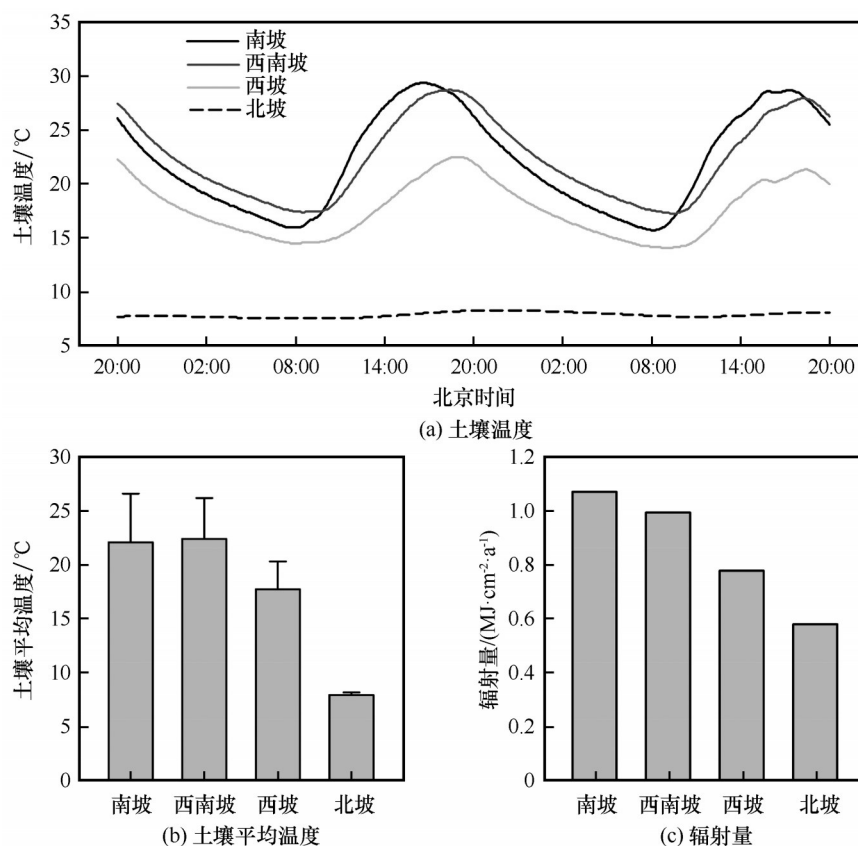


图2 坡面土壤温度与辐射量分布  
Fig. 2 Hourly variation of the soil temperature at 5 cm depth for various slope aspects (a), and mean soil temperature for various slope aspects (b) and radiation for various slope aspects (c)

土壤表层容重在南坡最大,平均为 1.18 g·cm<sup>-3</sup>,分别是西南坡、西坡和北坡的 1.09、1.39 和 1.77 倍[图 3(a)]。北坡 0~60 cm 土壤含水量最高,为 32.86%,分别是西南坡、西坡和北坡的 1.24、1.77 和 2.07 倍[图 3(b)]。土壤机械组成在全山范围内差异不大,其中黏粒含量为 8.15%,粉粒含量为 78.34%,砂粒含量为 12.51%[图 3(c)]。南坡土壤有机碳和全氮含量分别为 20.03 g·kg<sup>-1</sup>和 0.71 g·

kg<sup>-1</sup>,在西南坡为 21.22 g·kg<sup>-1</sup>和 0.97 g·kg<sup>-1</sup>,在西坡为 35.92 g·kg<sup>-1</sup>和 1.55 g·kg<sup>-1</sup>,在北坡为 50.79 g·kg<sup>-1</sup>和 2.82 g·kg<sup>-1</sup>[图 3(d)和 3(e)]。土壤全磷含量在各坡向差别不大,介于 0.42~0.51 g·kg<sup>-1</sup>之间[图 3(f)]。坡位梯度上,土壤有机碳、全氮、全磷和土壤含水量在山谷最大,分别为 50.23、3.47、0.80 g·kg<sup>-1</sup>和 32.01%,是山顶的 1.73、1.69、1.56 和 1.30 倍,山坡的 1.92、2.85、1.74 和 1.46 倍。



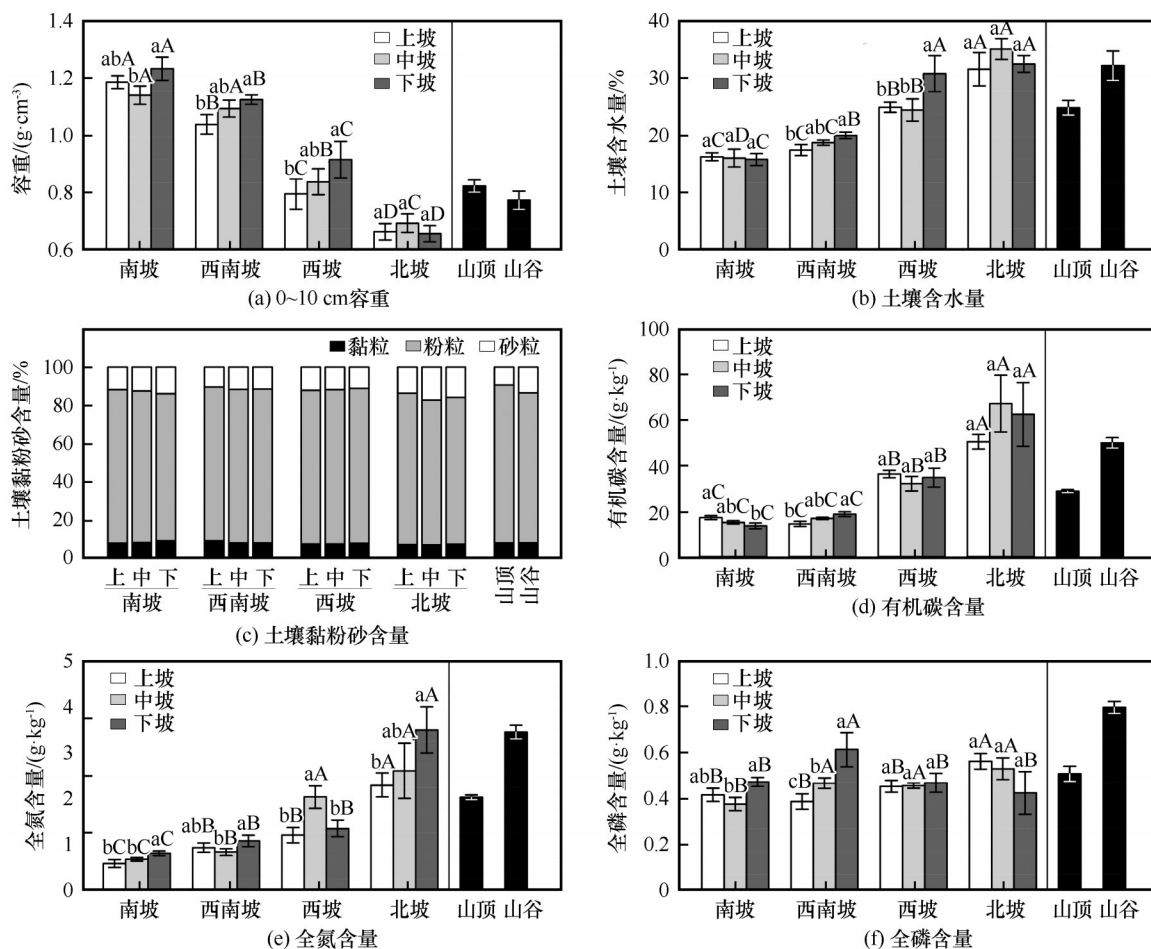


图3 坡面0~60 cm土壤属性分布:不同小写字母表示同一坡向,不同坡位均值差异显著;

不同大写字母表示同一坡位,不同坡向均值差异显著( $P<0.05$ )

Fig. 3 Patterns of soil properties at the depth of 0~60 cm on the south slope, southwest slope, west slope, north slope, top and valley for bulk density (first 0~10 cm) (a), soil water content (b), clay, silt and sand content (c), organic carbon (d), total nitrogen content (e) and total phosphorus content (f), on the top (white bar), the middle (gray bar) and the bottom (black bar) of the slope (Statistically different mean values between slope positions on the same aspect are indicated with different lowercase letters, and between aspect at the same slope position are indicated with different uppercase letters ( $P<0.05$ ))

### 3.2 不同地形条件下植被生物量的分布特征

北坡平均地上生物量为 $5.09 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,中坡显著高于上坡和下坡。西坡、西南坡和南坡平均地上生物量分别为 $740.77 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $305.32 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $206.71 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,上、中、下坡位间差异不显著( $P>0.05$ )。山谷和山顶地上生物量分别为 $1399.64 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $896.30 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ [图4(a)]。北坡平均地下生物量为 $6.39 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,不同坡位间中坡显著高于上坡和下坡。西坡平均地下生物量为 $115.08 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,分别是西南坡和南坡的2.59倍和2.69倍,下坡显著高于上坡( $P<0.05$ )。山谷和山顶草地地下生物量分别为 $199.91 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $100.81 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ [图4(b)]。

### 3.3 土壤属性和植被生物量与水热因子的关系

土壤碳氮含量与土壤水热密切相关(图5)。具体地,土壤有机碳含量随土壤含水量增加呈指数增加趋势( $R^2=0.93, P<0.01$ ),随辐射量的增加呈线性递减趋势( $R^2=0.80, P<0.01$ )。土壤全氮含量随土壤含水量增加呈线性增加趋势( $R^2=0.74, P<0.01$ ),随辐射量的增加呈线性递减趋势,拟合方程的 $R^2$ 为0.48,经验证达到极显著水平。

北坡为林地,生物量与其他坡面相差一个数量级(图4),故单独分析,结果表明北坡生物量与水热因子关系不显著( $P>0.05$ )。在其他坡面上,地上和地下生物量与土壤含水量和辐射量密切相关。具体地,地上和地下生物量均随土壤含水量

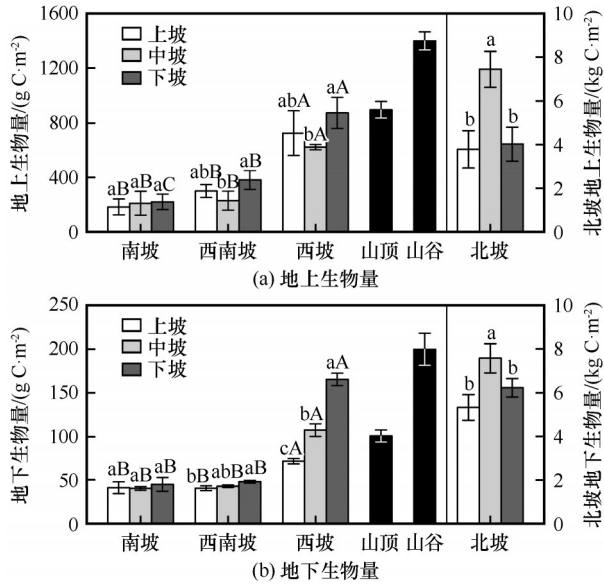


图4 坡面地上和地下生物量分布

Fig. 4 Above-ground biomass (a) and underground biomass (b) on south slope, southwest slope, west slope, top and valley and north slope on the top (white bar), the middle (gray bar) and the bottom (black bar) of the slope

增加呈线性增加趋势,且 $R^2$ 高达0.90[图6(a)和6(b)],地上和地下生物量随辐射量的增加呈降低

趋势, $R^2$ 在0.30左右,在0.05水平上不显著[图6(c)和6(d)]。

#### 4 讨论

本研究中各样方海拔接近,考虑到研究区年平均降水和温度是海拔的函数,因此各样方的气候背景接近,但受坡向和坡位的影响,土壤温湿度在同一海拔带内发生显著变化,不同地形部位土壤属性和植被生物量差异巨大<sup>[2,4,17]</sup>。本研究中土壤温度、含水量和年潜在直接入射辐射量从南坡到北坡变化显著,这与刘旻霞等<sup>[18]</sup>、Rorison等<sup>[19]</sup>学者关于不同坡向土壤水热分布的研究结果类似。但祁连山森林草原带南北坡的土壤温差更大,达14.2℃,这主要与坡向塑造下的植被格局有关。祁连山森林草原带内,随着坡向由南转北,植被类型从以冰草为主的山地草原(南-西南坡)过渡到以嵩草和苔草为主的山地草甸(西坡),在西北-北坡时已完全转变为青海云杉林,形成了半干旱山区特有的“南草北树”景观<sup>[4]</sup>。青海云杉林冠层的遮蔽效应大大减少了土壤表层接受的辐射量,因此北坡林内土壤

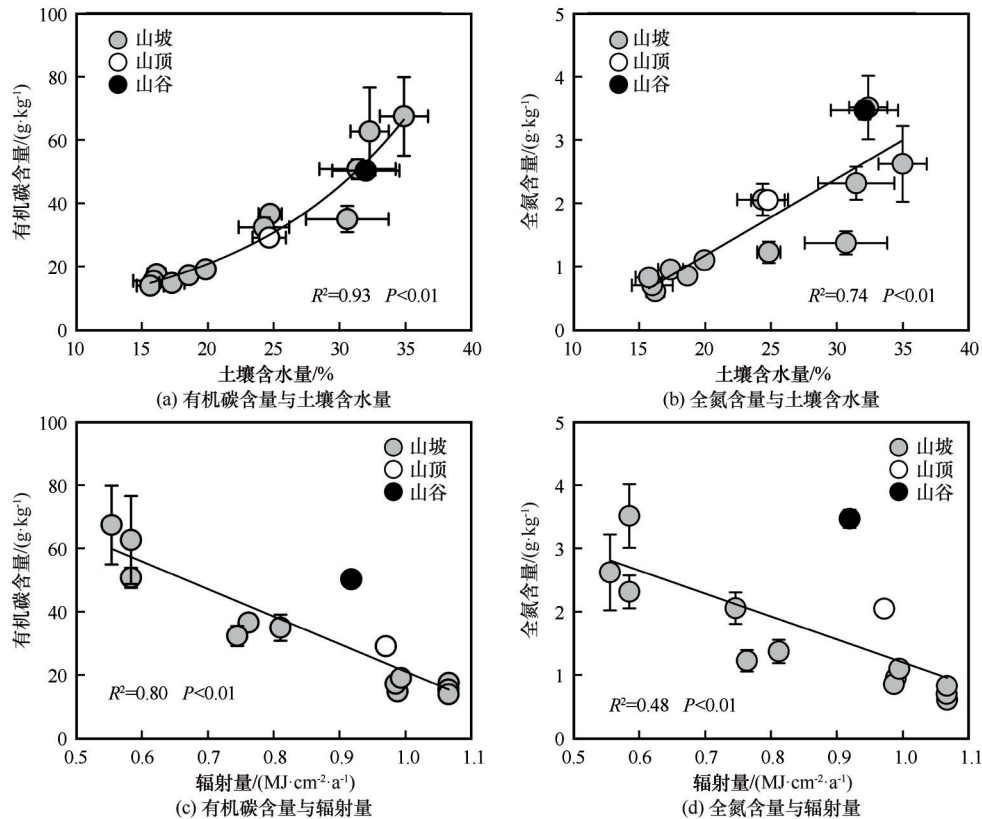


图5 土壤碳氮和水热因子的关系

Fig. 5 Soil organic carbon content (a), total soil nitrogen content (b) changing with soil moisture content, and soil organic carbon content (c) and total nitrogen content (d) changing with radiation quantity: on the slope (gray), the top (white) and the bottom (black) of the slope

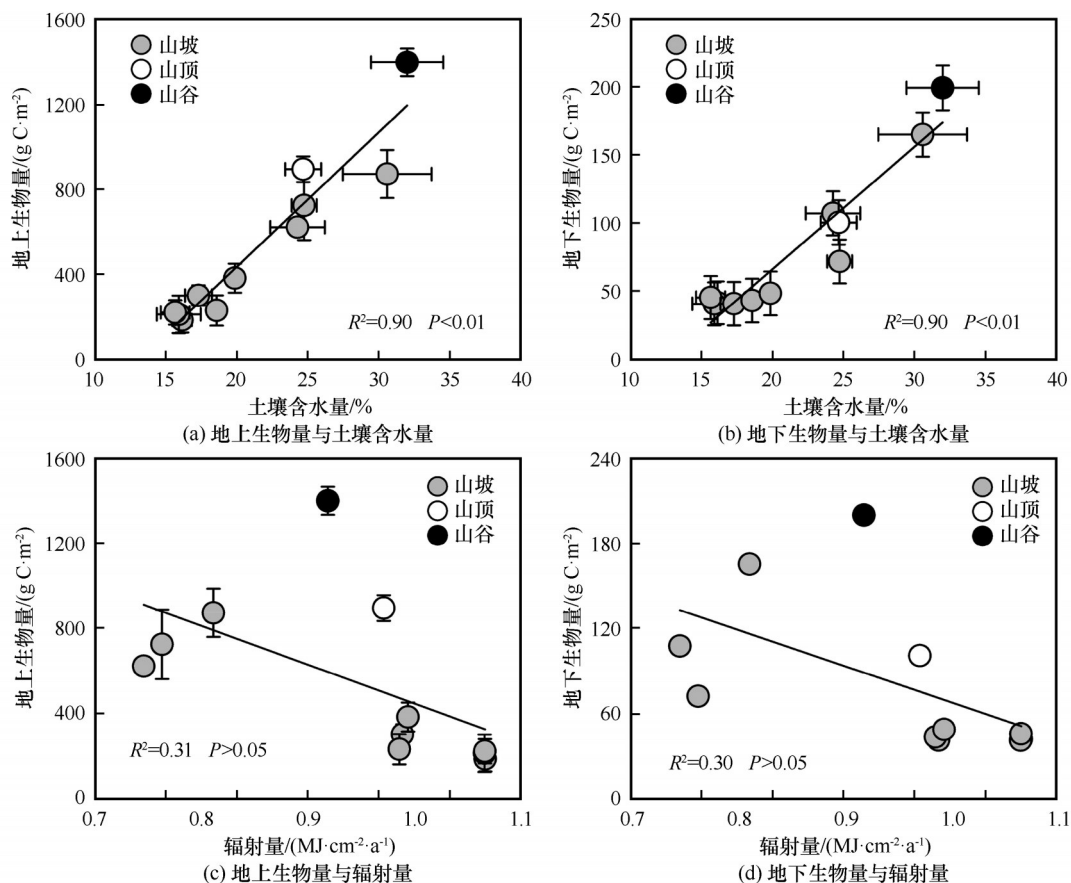


图6 植被生物量和水热因子的关系

Fig. 6 Biomass above ground (a) and underground (b) changing with soil water content, and biomass above ground (c) and underground (d) changing with radiation quantity: on the slope (gray), the top (white) and the bottom (black)

温度远低于南坡。本研究中,南北坡土壤水分相差巨大,北坡约南坡的2.07倍,原因在于北坡森林对水源涵养的能力要高于南坡草地,降雨多截留在土壤中。另外,山谷土壤含水量显著高于山坡和山顶,这主要是因为山坡上地表径流和壤中流在山谷汇聚,使得山谷获得额外的水分,土壤含水量也相应增加<sup>[20]</sup>。

本研究中土壤容重为:北坡<西坡<西南坡<南坡,山谷和山顶与西坡中坡位接近。这是因为北坡为青海云杉林,林下阴湿寒冷,地表腐殖质累积多,土壤疏松;西坡、山谷和山顶表层地下生物量显著高于西南坡和南坡,草根密集,土壤较为疏松,因此容重较小。全山范围内砂、黏、粉含量接近,土壤质地为粉壤土。孙文义等在黄土高原的研究发现<sup>[6]</sup>,由于土壤侵蚀作用,土壤细颗粒被搬运到沟底,使得沟底黏粒含量显著高于峁顶和峁坡。本研究各坡位黏粒含量接近,无显著差异,这可能是因为森林草原带内植被覆盖度较高且极端降水事件较少,土壤侵蚀强度较低,尤其是在阴坡青海

云杉林内,由于林冠截留作用及土壤表层苔藓对水分的涵养作用,林区内无土壤侵蚀发生<sup>[21]</sup>。土壤有机碳和全氮含量的变化趋势均为:北坡>西坡>西南坡>南坡,山谷与北坡下坡接近,山顶与西坡中坡接近。回归分析表明,土壤有机碳和全氮含量随着土壤含水量的增加呈指数和线性增加趋势。其原因在于水分条件好的坡面植被生物量高,进入土壤中的凋落物多,土壤有机碳和全氮含量更高<sup>[22]</sup>。此外,坡向梯度上土壤全磷含量差异不显著,土壤全磷与水热因子也未表现出显著的相关性。这主要是因为土壤中磷除小部分来自干湿沉降外,大多数来自土壤母质<sup>[23]</sup>。山谷较高的全磷含量可能与磷随地表径流的迁移有关,山坡上的磷随地表径流流失,并在山谷汇集,使山谷土壤全磷含量显著增加。

研究结果显示,生物量随坡向和坡位变化显著。坡向梯度上,地上和地下生物量为:西坡>西南坡>南坡,山谷最大,山顶次之,山坡最小。这与坡向和坡位影响下的土壤水分分布有关。回归分析

显示,地上地下生物量随土壤含水量的增加呈线性增加趋势,土壤含水量可以解释地上地下生物量变异的90%,说明土壤水分是限制植被生物量空间分布的主要限制因子。西坡水分条件好于南坡和西南坡,山谷好于山坡和山顶,因此在这两个区域,草地地上地下生物量最大。研究区北坡为林地,中坡位生物量最大,这可能是因为中坡位于林斑内部,一方面受人类活动干扰较小,另一方面生境条件较好。研究区青海云杉多为天然次生林,阴坡中部是青海云杉适宜生长区域,森林郁闭度较高,生物量较其他坡位更大<sup>[24]</sup>。

## 5 结论

通过研究祁连山森林草原带土壤属性和植被生物量随坡向和坡位的变化特征及其与水热因子的关系。发现土壤有机碳、全氮、土壤含水量、地上和地下生物量均随坡向由南到北呈递增趋势,土壤温度和容重变化趋势与之相反,而土壤机械组成和全磷含量则在各坡向上无显著变化。土壤有机碳、全氮、土壤含水量、地上和地下生物量在山谷最大,山顶次之,山坡最小。土壤含水量是限制研究区祁连山森林草原带土壤碳氮含量和生物量的主要环境因子,决定系数在0.74~0.93之间。因此,在祁连山森林草原带进行生态恢复时,应重点考虑不同坡向和坡位条件下土壤水分的差异,在适宜的地形部位选择合适的植被进行生态恢复。

## 参考文献(References):

- [1] Fang Jingyun, Shen Zehao, Cui Haiting. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology[J]. Biodiversity Science, 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.]
- [2] Zhao Haipeng, Lü Mingxia, Wang Yibo, et al. Soil water content and temperature of the active layer dynamics on the slope of the Fenghuoshan basin, Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1158-1168. [赵海鹏, 吕明侠, 王一博, 等. 青藏高原风火山流域坡面尺度活动层土壤水热时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1158-1168.]
- [3] Yuan Yong, Li Xiaoying, Liu Xiaomei, et al. Soil nutrient of evergreen broad-leaved forests in different slope aspects and slope positions in Nabanhe Nature Reserve [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(3): 12-15. [袁勇, 李小英, 刘晓梅, 等. 纳板河自然保护区不同坡向和坡位的常绿阔叶林土壤养分[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(3): 12-15.]
- [4] Qin Y, Feng Q, Holden N M, et al. Variation in soil organic carbon by slope aspect in the middle of the Qilian Mountains in the upper Heihe River Basin, China[J]. Catena, 2016, 147: 308-314.
- [5] Sigua G C, Coleman S W. Spatial distribution of soil carbon in pastures with cow-calf operation: effects of slope aspect and slope position [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(2): 240-247.
- [6] Sun W Y, Zhu H H, Guo S L. Soil organic carbon as a function of land use and topography on the Loess Plateau of China [J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 249-257.
- [7] Niu Yun, Liu Xiande, Miao Yuxin, et al. Research on the spatial variation characteristics of soil moisture and temperature in Dayekou basin of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1353-1360. [牛贇, 刘贤德, 苗毓鑫, 等. 祁连山大野口流域土壤水热空间变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1353-1360.]
- [8] Zhao Rudong, Fan Jianbo, He Yuanqiu, et al. Effect of slope position on soil physicochemical properties, enzyme activities and microbial properties in *Pinus massoniana* plantation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(12): 2857-2862. [赵汝东, 樊剑波, 何园球, 等. 坡位对马尾松林下土壤理化性质、酶活性及微生物特性影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2857-2862.]
- [9] Wiaux F, Cornelis J T, Cao W, et al. Combined effect of geomorphic and pedogenic processes on the distribution of soil organic carbon quality along an eroding hillslope on loess soil [J]. Geoderma, 2014, 216: 36-47.
- [10] Ma Suhui, Mu Cuicui, Guo Hong, et al. Distribution features of permafrost organic carbon density on different vegetation types in the upper reaches of Heihe River, Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 426-433. [马素辉, 牟翠翠, 郭红, 等. 祁连山黑河上游多年冻土区不同植被类型土壤有机碳密度分布特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 426-433.]
- [11] Wang Tao, Gao Feng, Wang Bao, et al. Status and suggestions on ecological protection and restoration of Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 229-234. [王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 229-234.]
- [12] Zhang Hu, Wen Yali, Ma Li, et al. The climate features and regionalization of vertical climatic zones in the northern slope of Qilian Mountains[J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(6): 497-502. [张虎, 温娅丽, 马力, 等. 祁连山北坡中部气候特征及垂直气候带的划分[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 497-502.]
- [13] Jiang Lin, Geng Zengchao, Li Shanshan, et al. Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3368-3377. [姜林, 耿增超, 李珊珊, 等. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3368-3377.]
- [14] Wang Jinye, Che Kejun, Jiang Zhirong. A study on carbon balance of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2000, 15(1): 9-14. [王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9-14.]
- [15] Lu Rukun. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 146-226. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 146-226.]
- [16] Mccune B, Keon D. Equations for potential annual direct inci-



- dent radiation and heat load[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13(4): 603-606.
- [17] Zhu M, Feng Q, Qin Y Y, et al. Soil organic carbon as functions of slope aspects and soil depths in a semiarid alpine region of Northwest China[J]. *Catena*, 2017, 152: 94-102.
- [18] 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]. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 259-265. ]
- [19] Rorison I H, Sutton F, Hunt R. Local climate, topography and plant growth in Lathkill Dale NNR. I. A twelve-year summary of solar radiation and temperature [J]. *Plant Cell & Environment*, 1986, 9(1): 49-56.
- [20] Gao Xuesong, Deng Liangji, Zhang Shirong. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 53-56. [高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 53-56. ]
- [21] He Hongyuan, Che Kejun, Fu Hui'en, et al. A preliminary study of water and soil erosion conditions in Sidalong Forest region in the Qilian Mountain Areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(1): 48-56. [贺红元, 车克钧, 傅辉恩, 等. 祁连山寺大隆林区水土流失状况的初步研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(1): 48-56. ]
- [22] Ma Qiang, Jin Huijun. Impacts of climate warming on soil organic carbon pools in permafrost regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 91-103. [马蔷, 金会军. 气候变暖对多年冻土区土壤有机碳库的影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 91-103. ]
- [23] Shu Xiangyang, Hu Yufu, Jiang Shuanglong, et al. Influences of grassland desertification on soil particles composition and soil phosphorus and potassium nutrients in northwestern Sichuan [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(8): 173-179. [舒向阳, 胡玉福, 蒋双龙, 等. 川西北草地沙化对土壤颗粒组成和土壤磷钾养分的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 173-179. ]
- [24] Yang W, Wang Y, Webb A A, et al. Influence of climatic and geographic factors on the spatial distribution of Qinghai spruce forests in the dryland Qilian Mountains of Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 1007-1017.



## Responses of soil properties and vegetation biomass to slope aspect and position in forest-steppe zone of the Qilian Mountains

ZHANG Mengxu<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, ZHU Meng<sup>1</sup>, QIN Yanyan<sup>1</sup>, LI Ruolin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, 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 forest-steppe zone in the Qilian Mountains is a typical semiarid mountain mosaic landscape of forest and grassland. The vegetation pattern within this zone is characterized by significant patchiness, which is closely related to micro topographic factors. An exploration to the relationships between topographic factors and soil and vegetation in the forest-steppe zone will enable us to take more efficient ecological protection and restoration measures. Based on field plots investigations and general linear model, we investigated the variation of soil properties and vegetation biomass with slope aspects (south-, southwest-, west- and north-facing slopes) and slope positions (summit, upper slope, middle slope, lower slope and valley), and their relationships with water and heat conditions. Results showed that soil organic carbon, total nitrogen, soil water content, above ground and underground biomass on the north-facing slope is  $50.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $2.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $32.86\%$ ,  $5.09 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ , and  $6.39 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ , which were significantly larger than that on the south-facing slope by factors of 2.54, 3.97, 2.07, 24.62 and 149.30, respectively. Along the slope position gradient, soil organic carbon, total nitrogen, soil water content, above ground and underground biomass were maximal at the valley, reaching to  $50.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $3.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and  $32.01\%$ , which were about 1.73, 1.69, 1.56, and 1.30 times higher than that on the summit, and were about 1.92, 2.85, 1.74, and 1.46 times higher than that on the sloping area. Regression analysis showed that soil water content was the dominant environmental control of the spatial patterns of soil organic carbon, soil total nitrogen content, and vegetation biomass, with the coefficient of determination varying from 0.74 to 0.93. The result suggested that soil water availability at different topographic positions should be given priority in terms of soil and vegetation protection and restoration in the forest-steppe zone of the Qilian Mountains.

**Key words:** soil properties; vegetation biomass; slope aspects; slope positions; forest-steppe zone

(责任编辑：何志斌；编辑：周成林)