

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.028.

袁杰, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡微地形下典型生态系统土壤蓄水能力差异[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 159-167.

Yuan Jie, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Differences in Soil Water Storage Capacity of Typical Ecosystems Under Microtopography in Southern Slope of Qilian Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 159-167.

# 祁连山南坡微地形下典型生态系统土壤蓄水能力差异

袁杰<sup>1,2,3</sup>, 曹广超<sup>1,2,3</sup>, 曹生奎<sup>1,2,3</sup>, 袁有靖<sup>4</sup>, 张虔<sup>1,2</sup>, 蒲妮<sup>2</sup>

(1.青海师范大学.青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008;

2.青海师范大学.地理科学学院.青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008;

3.青海省人民政府—北京师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008; 4.青海省地质环境调查院, 西宁 810008)

**摘要:** [目的]探讨祁连山地区微地形形态下典型生态系统土壤蓄水能力差异性,为该区进一步提高水源涵养能力提供参考。[方法]以微地形不同坡向青海云杉和高山草地为研究对象,采取野外采样和室内试验分析相结合的方法,研究不同坡向对典型生态系统土壤蓄水能力的影响。[结果](1)微地形高山草地所在阳坡区域,土壤水分贮存量随坡位上升逐渐呈减少趋势,坡中上(PZS)为土壤水分贮存量最低的坡位;坡位对土壤饱和蓄水量影响较小。(2)坡位显著影响着阴坡青海云杉土壤水分贮存量,土壤贮水量沿坡位上升呈增加趋势,坡顶处(PSD)土壤水分贮存量最高;坡位对青海云杉土壤潜在蓄水能力影响显著,坡中和坡中上土壤潜在蓄水能力最强。(3)两类典型生态系统土壤蓄水能力存在显著差异,高山草地(阳坡)土壤实际蓄水能力在不同坡位均高于青海云杉,青海云杉(阴坡)土壤潜在蓄水能力在坡位和土层尺度均显著大于高山草地(阳坡)。[结论]研究区微地形坡中上至坡顶段是该区保水增蓄的重点区域,坡中上以下区域是两类生态系统土壤蓄水能力核心区域,应继续保护。

**关键词:**微地形; 典型生态系统; 土壤蓄水; 差异分析

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0159-09

## Differences in Soil Water Storage Capacity of Typical Ecosystems Under Microtopography in Southern Slope of Qilian Mountains

Yuan Jie<sup>1,2,3</sup>, Cao Guangchao<sup>1,2,3</sup>, Cao Shengkui<sup>1,2,3</sup>, Yuan Youjing<sup>4</sup>, Zhang Qian<sup>1,2</sup>, Pu Ni<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2.Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3.Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810008, China; 4.Environmental Geological Survey Bureau of Qinghai Province, Xining 810008, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the variability of soil water storage capacity of typical ecosystems under microtopographic morphology in the Qilian Mountains, and to provide reference for further improvement of water holding capacity in the study area. [Methods] Qinghai spruce and alpine grassland distributing on different slope orientations of microtopography were taken as the research objects. A combination of field sampling and laboratory experiments was conducted to study the effects of different slope orientations on the soil water storage capacity of two typical ecosystems. [Results] (1) Soil moisture storage was gradually decreasing in the microtopographic sunny slope (alpine grassland) area along the rising slope, with the lowest soil moisture storage in the upper middle of the slope. The slope position has less in-

收稿日期: 2022-10-27

修回日期: 2022-11-14

资助项目: 青海省科技厅自然科学基金项目(2021-ZJ-937Q); 祁连山国家公园青海研究中心开放课题(GKQ2019-1); 本科生科技创新项目(qhnuxskj2021049)

第一作者: 袁杰(1989—), 男, 青海西宁人, 博士, 副教授, 研究方向为地表环境过程。E-mail: yuanjie8903@126.com

通信作者: 曹广超(1971—), 男, 山东苍山人, 博士, 教授, 主要从事 GIS 应用、地表环境过程研究。E-mail: caoguangchao@qhnu.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

fluence on soil saturation water storage capacity as the potential water storage capacity of the soil. (2) The slope position also significantly influenced the soil water storage capacity of the shaded slope (Qinghai spruce), and the soil water storage capacity increased along the slope position, with the top of the slope being the slope with high soil water storage capacity. The potential water storage capacity of Qinghai spruce soils was significantly affected by slope position, and the potential water storage capacity of soils in the middle and upper slopes was significantly higher than that of other slopes. (3) There were obvious differences in the soil water storage capacity of the two typical ecosystems. The actual water storage capacity of the alpine grassland (sunny slope) soil was higher than that of Qinghai spruce at different slope positions, while the Qinghai spruce (shady slope) soil potential storage capacity at different slope positions was higher. The water capacity was significantly greater than that of the alpine grassland (sunny slope). [Conclusion] Enough attention should be paid to the work of soil and water conservation in the area from the middle to the top of the micro-topographic slope in the study area. The slopes below of upper slope are the key areas of soil water storage capacity of the two types of ecosystems in the micro-topographic. The areas from the middle to the down of the micro-topographic slope are the core areas of soil water storage capacity of the two types of ecosystems.

**Keywords:** microtopography; typical ecosystem; soil water storage; variation analysis

土壤作为陆地生态系统的重要组成部分,是连接大气和地上地下生物的重要枢纽,发挥着重要的水文调节功能,维持着生态系统的能量平衡<sup>[1]</sup>。其中作为疏通剂,土壤水分的多少及存在形式不仅对土壤形成发育过程有重要影响,而且是土壤物质迁移和运动的载体。因此土壤蓄水能力在区域产流和水文循环方面起着重要作用,是研究区域内水源涵养的重要指标,准确揭示土壤蓄水能力可以更好地反馈未来变化环境下山区水源涵养的重点构建能力<sup>[2]</sup>。国内外对土壤蓄水性能的研究集中于外界因素的影响,如不同生态环境、不同气候以及土壤水渗透性能等方面<sup>[3-6]</sup>,针对微地形影响下土壤蓄水能力的研究较少。地形因子对土壤水分空间分布有重大影响,坡向、坡位更是影响土壤蓄水能力坡面尺度变异的重要地形因素,不同坡向坡位下土壤蓄水能力的差异性尚有待深入研究。

祁连山作为西北内陆干旱区重要的水源涵养区,其生态环境的好坏,直接关系到河西走廊、西北部地区的生态安全,甚至可能会引起黑河下游甘肃及内蒙古两省区的生态环境经济问题,由于重要的地理位置和水源涵养功能,祁连山生态环境问题近年来受到学术界持续关注<sup>[7-10]</sup>。但整体来看,在该区仍然缺少微地形影响下土壤蓄水性能的相关研究。基于此,以祁连山微地形为研究对象,深入分析坡位坡向对土壤蓄水能力的影响,才能为该区精准实施提高土壤界面水源涵养功能提供基础参考。

## 1 研究区概况

研究区位于祁连山南坡中段,地理位置为 97°16′—101°11′E,38°11′—40°13′N。地势整体南高北低、地形复

杂多变,山地、平原相间排列,长年受西风带和东南季风影响,属于典型大陆性高原气候<sup>[11]</sup>。冬季寒冷干燥,夏季温凉湿润,降水主要集中在 5—9 月,年降水量约 300~700 mm,其中夏季降水量约占全年的 86%,同时降水量整体呈由东向西减少趋势<sup>[12-13]</sup>。研究区以干旱半干旱植被为主,广泛分布乔本科(*Gramineae*)、莎草科(*Cyperaceae*)植被,以及少数的狼毒(*Stellera chamaejasme*)、蔷薇科(*Rosaceae*)和委陵菜属(*Potentilla chinensis*)。受地形、气候和植被影响,该区土壤垂直分带明显,随海拔自下而上依次为栗钙土、黑钙土、灰褐土、山地草甸土、高山草原土、高山草甸土、寒漠土<sup>[12]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地布设与样品采集

试验选取该区腹地普遍分布的典型坡地,阴阳坡分别为青海云杉(北东向)和高山草地(西南向),采样时间为 2021 年 8 月(图 1)。以“倒 V”形路线,自高山草地坡底至青海云杉坡底,共设置 11 个样地,根据实地情况,参考海拔梯度,分别在两类典型生态系统坡底(PD)、坡底上(PDS)、坡中(PZ)、坡中上(PZS)、坡上(PS)、公共坡顶(PSD)设 3 个 1 m×1 m 样方,共计 33 个样方。利用土钻环刀法进行土壤样品分层采集,采样间隔为 10 cm,采样深度为 0—50 cm,共采集 165 件土壤样品。将土壤样品现场称重后,装入透明无菌袋封装并标号,每类样地均利用手持 GPS 记录地理坐标、植被盖度、海拔高度、坡度等样地信息。

### 2.2 样品测定和数据处理

本研究所有试验均在青海省自然地理与环境过程重点实验室中完成。土壤蓄水能力分别由土壤贮

水量和土壤饱和蓄水量进行指代,其中土壤贮水量为土壤实际蓄水能力<sup>[12]</sup>,土壤饱和蓄水量为一定土层厚度土壤孔隙中水分达到饱和时的量,代表土壤潜在蓄水能力<sup>[12,14]</sup>,计算公式见表 1。

其余土壤理化性质测定:(1) 土壤粒度使用英国 Malvern 公司制造的 Mastersizer2000 型粒度仪进行测试,详细过程不再赘述,详见文献<sup>[15]</sup>。(2) 土壤 pH 采用 pH(pH-3c) 计进行测试<sup>[16]</sup>。(3) 土壤有机质采取重铬酸钾氧化法<sup>[16]</sup>。通过上述方法测定完成所有指标后,运用 Graphpad Prism7.0 软件完成数据统计、差异性分析及图表制作工作。

表 1 土壤蓄水能力指标计算公式

Table 1 Calculation formula of soil water storage capacity index

各指标	计算公式	说明
土壤贮水量(SWS <sub>n</sub> )	$SWS_n = SW_n \times U_n \times d_n \times 10^{-1}$	SW <sub>n</sub> 为第 n 层土壤含水量;U <sub>n</sub> 为第 n 层土壤容重(g/cm <sup>3</sup> );d <sub>n</sub> 为第 n 层土层
土壤饱和蓄水量(W <sub>t</sub> )	$W_t = 10^4 \times P_t \times d_n$	深度(cm);10 <sup>-1</sup> ,10 <sup>4</sup> 分别为单位换算系数;P <sub>t</sub> 为土壤总孔隙度 <sup>[12,14]</sup>

3 结果与分析

3.1 高山草地土壤蓄水能力差异分析

由图 2 可知,高山草地在 PD,PZS,PS 处土壤贮水量均随土层深度增加而减少;PZ,PDS,PSD 处土壤贮水量随土层深度增加呈先增后减趋势。不同坡位 0—50 cm 土层土壤贮水量均值以 PZS 处为界呈先减后增趋势,界下随坡位的增加减小趋势明显,界

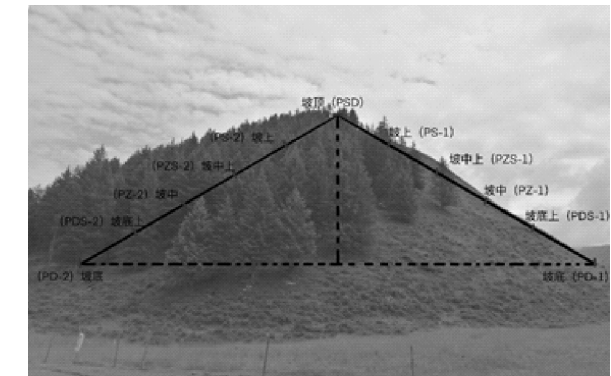
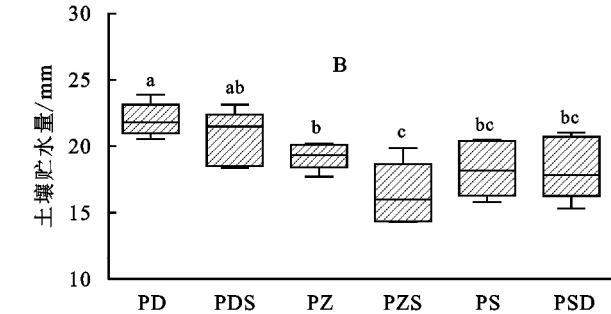
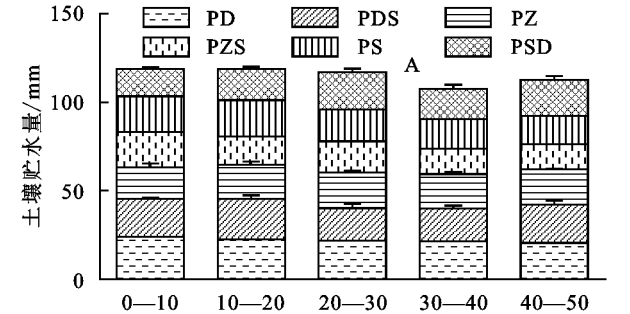


图 1 采样区示意图

Fig. 1 Sampling area diagram

上呈增大趋势。其中 PD 处土壤贮水量最大,显著大于 PZ,PZS,PS,PSD 处土壤贮水量( $p < 0.05$ ),PZS 处土壤贮水量最小,显著小于 PD,PDS 及 PZ 处土壤贮水量( $p < 0.05$ )。

综上,可以看出坡位显著影响土壤中水分贮存量,在研究区微地形高山草地所在阳坡区域,土壤水分贮存量沿坡位上升呈减少状态,坡中上(PZS)为土壤水分贮存量最低坡位。



注:不同小写字母代表在显著性水平  $p < 0.05$  上存在显著差异,下同。

图 2 不同坡位高山草地土壤贮水量差异性分析

Fig. 2 Analysis of the variability of soil water storage in alpine grassland at different slopes

由图 3 可知,高山草地土壤饱和蓄水量除 PD 和 PZS 变化规律不明显之外,其余坡位均表现出随土层深度增加而减小。与土壤贮水量不同,高山草地 PSD 处各土层土壤饱和蓄水量均大于其余坡位。不同坡位土壤饱和蓄水量均值在 PD-PZ-PZS 处差异较小,自 PZS 处开始高山草地土壤饱和蓄水量呈跳跃式增加趋势,在 PSD 处土壤饱和蓄水量均值最大且显著大于其他坡位( $p < 0.05$ ),其他坡位之间仅 PZ 处和 PZS 处存在显著差异( $p < 0.05$ )。

综上,通过高山草地土壤贮水量和饱和蓄水量随坡位变化差异分析可知,高山草地 PZS 处土壤实际

水分和土壤潜在蓄水能力均最低且整体蓄水能力与其他坡位存在显著差异,因此在研究区该坡向上,坡中上(PZS)区域应重视保水增蓄工作。

3.2 青海云杉土壤蓄水能力差异分析

由图 4 可知,青海云杉 PSD,PZS,PDS 处各土层土壤贮水量明显大于其他坡位,说明上述坡位土壤持水能力均大于其他坡位。此外除 PSD 外,其他坡位土壤贮水量均随土层深度增加而减小。青海云杉土壤贮水量随坡位增加呈“增减”型变化趋势。其中 PD,PZ,PS 坡位之间土壤贮水量无显著差异性( $p > 0.05$ ),而 PDS,PZS,PDS 坡位与其他坡位之间均存

在显著差异( $p < 0.05$ )。可以看出青海云杉土壤贮水量总体上符合坡位越高土壤持水能力越强的特点。因此,坡位同样显著影响青海云杉土壤水分贮存量,

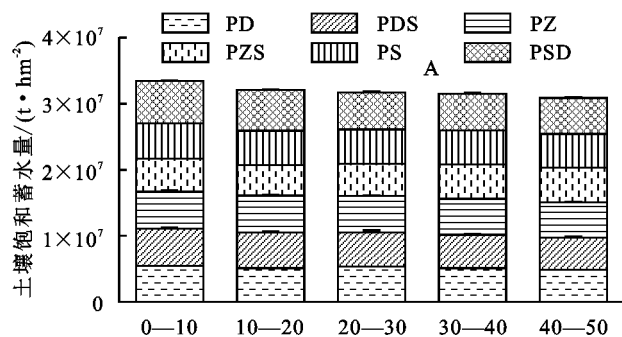


图3 不同坡位高山草地土壤饱和蓄水量差异性分析

Fig. 3 Analysis of the variability of soil saturation water storage in alpine grassland at different slopes

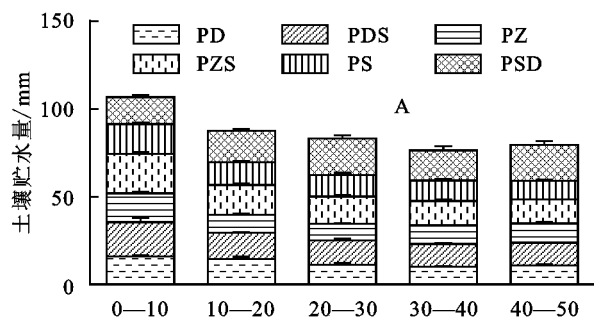


图4 不同坡位青海云杉土壤贮水量差异性分析

Fig. 4 Analysis of the variability of soil water storage in Qinghai spruce at different slopes

不同坡位青海云杉土壤饱和蓄水量基本随土层深度增加而减小(图5)。土壤饱和蓄水量随坡位增加呈三段式分布,具体来看  $PZ-PZS > PD-PDS > PS$ -

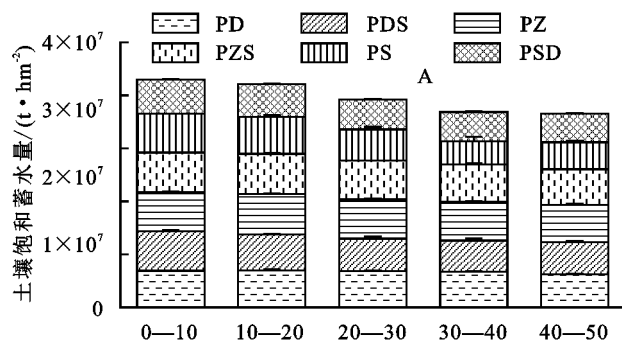


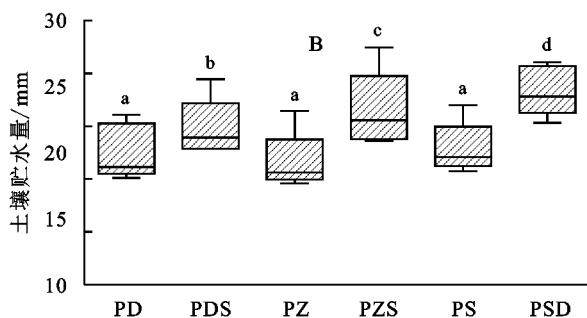
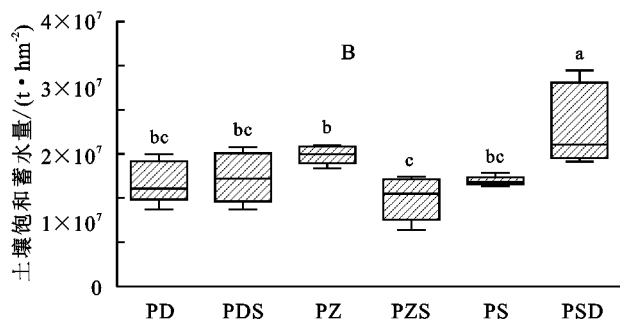
图5 不同坡位青海云杉土壤饱和蓄水量差异性分析

Fig. 5 Analysis of the variability of saturated water storage in Qinghai spruce soils at different slopes

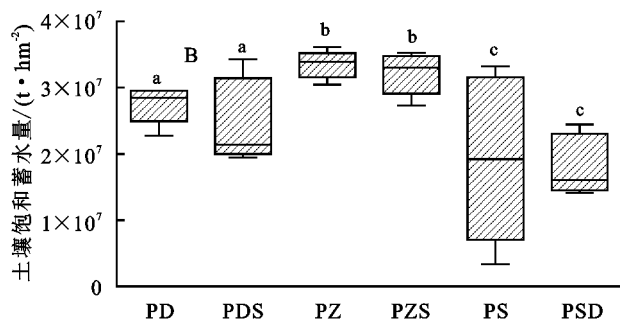
### 3.3 不同坡向典型生态系统土壤蓄水能力差异分析

研究区多分布此类微地形,具体表现为各微地形阴阳坡植被分异极为明显,即阳坡基本发育为高山草地,阴坡基本发育为青海云杉。为进一步揭示微地形对土壤蓄水能力的影响,分别分析不同坡向同一坡位土壤蓄水差异性。由图6可以看出,除0—10 cm土层外,阴阳坡土壤贮水量基本以PZS为界,界下各坡位土壤贮水量差异显著( $p < 0.05$ ),界上不显著( $p > 0.05$ )。同时可以看出高山草地土壤水分贮存量整体

在研究区微地形下青海云杉所在阴坡区域,土壤贮水量沿坡位上升呈增大趋势,坡顶处(PSD)为土壤水分贮存量最大坡位。



PSD,说明阴坡青海云杉林PZ-PZS区域土壤潜在蓄水能力最强,其次是PD-PDS处,PS-PSD土壤潜在蓄水能力最弱。



大于青海云杉。

不同坡向土壤饱和蓄水量差异分析见图7。与土壤贮水量不同,青海云杉各坡位土壤潜在蓄水能力整体大于高山草地。PZS处同样是两类典型生态系统土壤潜在蓄水能力产生明显差异区域,即自PD-PZS,两类生态系统土壤饱和蓄水量在坡位和土层尺度均表现出极显著差异性;而自PZS向上,两者在坡位和土层尺度上土壤饱和蓄水量差异性趋弱,说明PZS以下坡位是两类生态系统土壤蓄水能力核心区域。



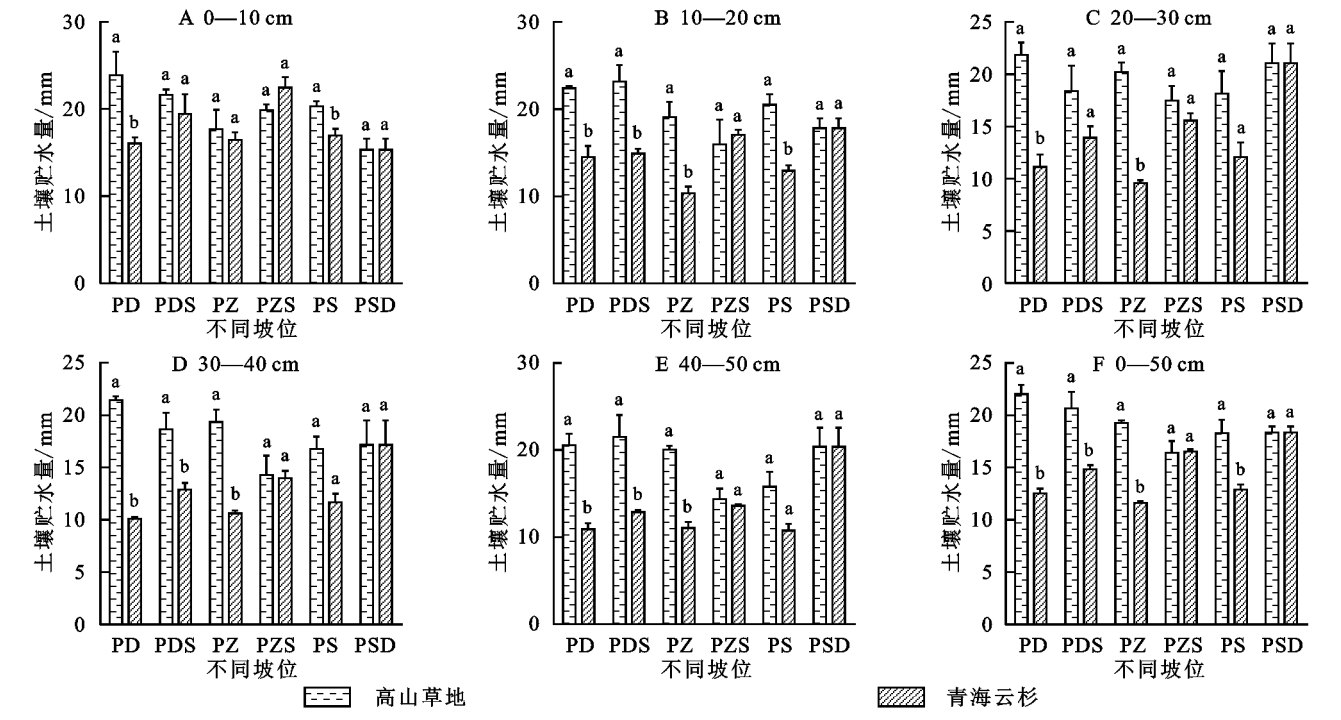


图 6 不同坡向典型生态系统土壤贮水量差异性分析

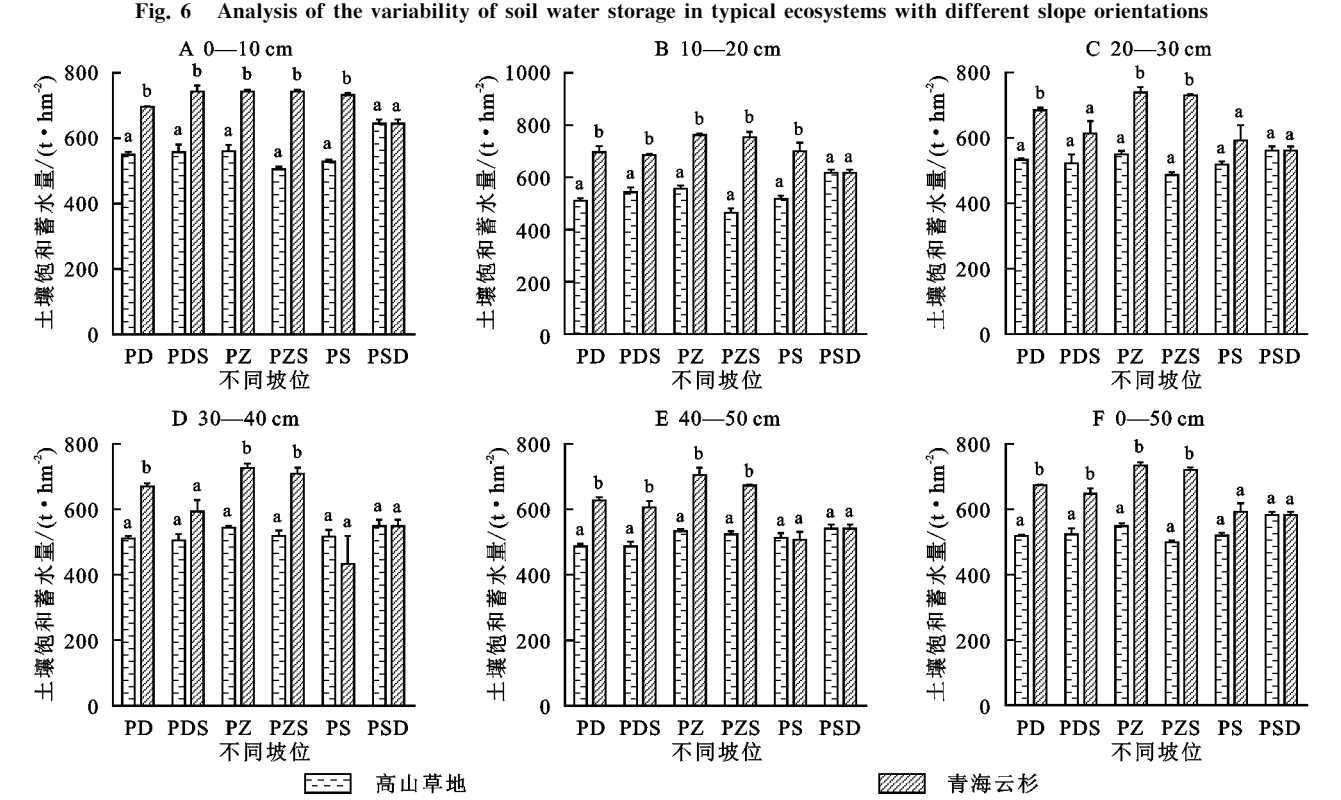


图 7 不同坡向典型生态系统土壤饱和蓄水量差异性分析

Fig. 7 Analysis of the variability of soil saturation water storage in typical ecosystems with different slope orientations

综前所述,由于微地形影响,两类典型生态系统土壤蓄水能力明显存在差异。可以看出在微地形塑造下高山草地(阳坡)土壤实际蓄水量整体高于青海云杉;而青海云杉(阴坡)土壤潜在蓄水能力均大于高山草地。此外 PZS 是两类生态系统土壤蓄水能力产生差异最为明显的坡位。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

祁连山是西北内陆干旱区重要的水源涵养区之一,对于该区水源涵养方面的研究一直是学术界研究的重点<sup>[7-10]</sup>。团队自 2013 年在祁连山南坡进行相关研究过

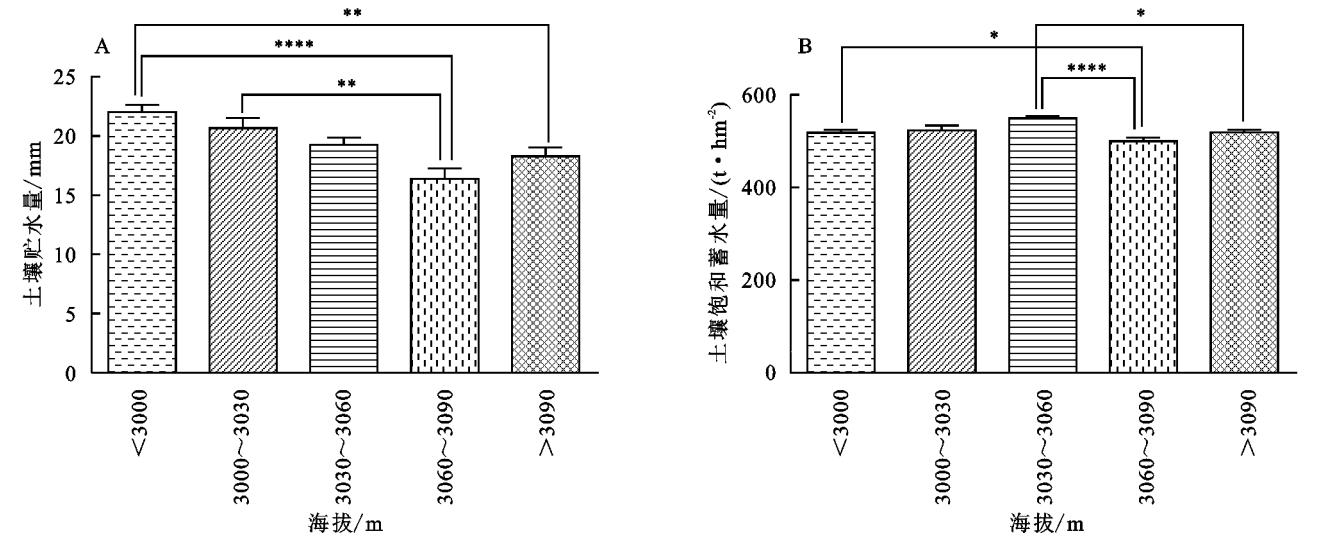
程中发现,在该区腹地多现如图 1 所示地形(本研究中称为“微地形”)且伴有一个显著特点,即以地形脊顶为中心阳坡均为高山草地,阴坡均为青海云杉。但以往众多研究中忽略此类微地形下土壤蓄水能力的相关研究,使得量化该区土壤界面水源涵养量时缺少了参考依据。因此研究微地形对土壤蓄水能力的影响对精确挖掘祁连山水源涵养潜力具有重要意义。

坡向和坡位因改变局地土壤形态、水热条件、植被分布被认为是影响土壤蓄水能力发生差异的重要地形因素<sup>[17-18]</sup>。本研究发现,坡位显著影响了土壤中水分贮存量,直接影响各土层中土壤水分贮存量的大小。在阳坡土壤水分贮存量沿坡位逐渐增加呈减少状态,坡中上(PZS)土壤水分贮存量最低;而土壤饱和蓄水量作为土壤潜在蓄水能力,坡位对其影响较小,各坡位之间土壤饱和蓄水量差异较小。总体上高山草地土壤蓄水能力在 PZS 处最小,对该坡位区的水土保持工作应引起重视。在阴坡,坡位同样显著影响着青海云杉土壤水分贮存量,土壤中水分贮存量沿坡位逐渐增加呈增大趋势,坡顶处(PSD)为土壤水分

贮存量高坡位。

通过对比发现研究区地形塑造下高山草地(阳坡)土壤实际蓄水能力在不同坡位均高于青海云杉,受坡位影响大;高山草地土壤潜在蓄水能力在不同坡位上相差不大,受坡位影响小。青海云杉(阴坡)土壤实际蓄水能力和潜在蓄水能力均同样受到坡位影响,但其土壤实际蓄水能力小于阳坡(高山草地),造成差异的主要原因在于大气降水多被青海云杉林冠层进行截留,加之地表枯落物层和腐殖质层的吸收,导致土壤中实际贮水量较高山草地小,但枯枝落叶影响下的土壤饱和含水量有良好表现,潜在蓄水能力强于阳坡草地。

海拔梯度也是影响土壤蓄水能力的重要因素之一<sup>[18]</sup>。如图 8 所示,整个微地形海拔梯度介于 2 090~3 120 m,以 30 m 为间隔分别探讨海拔梯度对土壤蓄水能力的影响。分析可见随海拔梯度的增加,在一定高度范围(3 090 m 以下)高山草地土壤贮水量呈减少趋势,高于 3 090 m 的坡顶处土壤贮水量有所增加;高山草地土壤饱和蓄水量随海拔梯度基本变化不大,这与上文分析结果一致。



注:“\*”代表在显著性水平 0.05 上存在显著差异,“\*\*”代表在显著性水平 0.01 上存在显著差异,下同。

图 8 海拔高度对高山草地土壤蓄水能力影响分析

Fig. 8 Analysis of the effect of altitude on soil water storage capacity of alpine grassland

不同于阳坡,海拔梯度对阴坡土壤贮水量和土壤饱和蓄水量均产生了较为复杂的影响(图 9)。可以看出青海云杉土壤贮水量在 3 000~3 030 m 和 3 060~3 090 m 海拔梯度上土壤贮水量最大,其余海拔梯度间土壤贮水量差异不大。青海云杉土壤饱和蓄水量随海拔升高呈增大趋势,但坡顶处土壤饱和蓄水量明显减小。

海拔不同,山体垂直方向温度和降水格局会发生明显改变,在同一海拔梯度内,坡向的不同直接决定了其

太阳辐射的接受量,从而与坡度一起改变整个山体的土壤水文过程<sup>[19]</sup>。分析结果显示,阳坡(高山草地)土壤实际贮水量随海拔梯度升高依次减小,而土壤潜在蓄水能力在不同海拔梯度虽有差异但不显著,说明在阳坡一方面随海拔梯度的上升,受到太阳辐射影响,土壤蒸发变强,土壤贮水量随之减小;另一方面阳坡高山草地土壤质地较为均质,因此表现出土壤实际贮水量和土壤潜在蓄水能力的不一致性。阴坡(青海云杉)土壤实际贮水量随海拔升高无明显规律,但在

3 000~3 900 m 出现了高峰值,这与其他学者<sup>[20-21]</sup>坡中土壤含水量较大的结论具有相似之处;青海云杉土

壤潜在蓄水能力自坡底至坡顶均大于阳坡(高山草地),究其原因与云杉林对土壤结构的塑造能力有关。

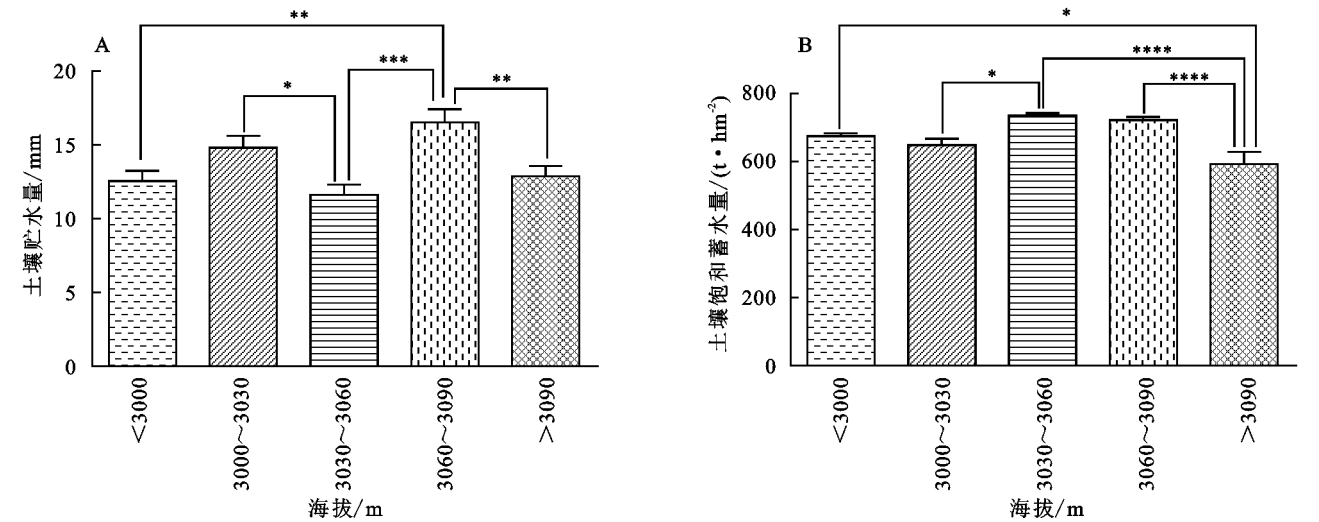


图 9 海拔高度对青海云杉土壤蓄水能力影响分析  
Fig. 9 Analysis of the effect of altitude on the water storage capacity of Qinghai spruce soils

除地形因子外,土壤理化指标也是影响土壤蓄水能力的重要因素之一<sup>[22]</sup>。分别选取土壤容重、土壤质地、土壤有机质及土壤 pH 分别与不同坡向土壤蓄水能力指标进行相关性分析。可以看出由于坡向不同,土壤理化性质同样发生明显差异,进一步影响土壤蓄水能力。研究区阴坡为云杉林,林内地表积累一定厚度枯落物层(10 cm 左右)且常年阴湿,有机质层与腐殖质层之间转换强度远较高山草地强烈,加之云杉林庞大根系结构,致使云杉林土壤结构松散,容重较低,因此可以发现云杉林土壤贮水量分别与土壤容重呈显著负相关( $p<0.01$ ),与有机质呈显著正相关( $p<0.01$ );此外阴湿环境和疏松土壤结构同样极易导致云杉林土壤酸性较阳坡草地强,一般认为酸性土壤质地疏松,透气透水性更强,因此云杉林土壤贮水

量还与 pH 值呈显著正相关( $p<0.01$ ),同时这也能进一步解释上文图 6 中阳坡草地土壤贮水量显著大于阴坡云杉林的原因:云杉林土壤结构疏松、容重小、孔隙多,透气透水性强,水分极难贮存在土层中,因此表现出土壤贮水量显著小于阳坡草地的特征。阳坡草地为西南向,地表无枯枝落叶层且辐射蒸作用强,土壤发育强度远低于阴坡云杉林,土壤结构更易坚硬,容易板结,在这种情况下,土壤中细颗粒组分越多,土壤水分越难以贮存在土壤中,而分析中发现不但阴坡土壤中细颗粒组分显著大于阳坡,而且阳坡草地土壤贮水量显著大于阴坡(图 6),说明阳坡草地土壤水分很大程度上与土壤质地中细颗粒组分相关。表 2 中阳坡土壤贮水量仅与土壤黏粒组分呈显著负相关( $p<0.01$ )能较好的证明上述观点。

表 2 土壤贮水量与各理化指标相关性

Table 2 Correlation between soil water storage and each physicochemical index							
不同坡向	相关参数	pH	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	有机质/%	黏粒/%	粉砂粒/%	砂粒/%
阳坡(高山草地)	R	-0.1039	-0.04353	0.08032	-0.3315	0.1526	0.06002
	R <sup>2</sup>	0.01079	0.001895	0.006451	0.1099	0.0233	0.003602
	p(双尾)	0.3752	0.7108	0.4933	0.0037	0.1911	0.609
阴坡(青海云杉)	R	0.2966	-0.3032	0.3306	0.1031	0.02799	-0.07284
	R <sup>2</sup>	0.08798	0.09194	0.1093	0.01064	0.000783	0.005306
	p(双尾)	0.0098	0.0082	0.0038	0.3786	0.8116	0.5345

土壤饱和蓄水量作为土壤潜在蓄水能力,与土壤总孔隙度直接相关,而土壤孔隙度又直接受土壤容重、土壤有机质及土壤质地影响。如上文所言,阴坡云杉林由于自身生境影响,土壤有机质层发育强烈,

结构疏松,透气透水性强,因此土壤饱和蓄水量显著高于阳坡草地(图 7),分别与土壤有机质( $p<0.000 1$ )、黏粒( $p<0.001$ )、粉砂粒( $p<0.05$ )、砂粒( $p<0.001$ )呈显著相关性;而阳坡草地虽然土壤结构更加紧实,有机质层

发育弱于云杉林,但土壤饱和蓄水量是土壤孔隙中水分达到饱和时的量,主要受土壤质地和容重影响,因此阳坡草地土壤饱和蓄水量同样与土壤有机质和土壤质地呈显著相关(表 3)。

表 3 土壤饱和蓄水量与各理化指标相关性

Table 3 Correlation between saturated soil water storage and various physicochemical indicators						
不同坡向	相关参数	pH	有机质/%	黏粒/%	粉砂粒/%	砂粒/%
阳坡(高山草地)	$R$	-0.1699	0.3994	0.2224	0.1977	-0.3868
	$R^2$	0.02887	0.1595	0.04946	0.0391	0.1497
	$p$	0.1094	<0.0001	0.0351	0.0617	0.0002
阴坡(青海云杉)	$R$	-0.07993	0.5302	0.3915	0.2300	-0.3920
	$R^2$	0.006389	0.2811	0.1533	0.0529	0.1536
	$p$	0.4954	<0.0001	0.0005	0.0471	0.0005

综上,分别从地形因素和土壤理化性质两个方面探讨了影响土壤蓄水能力的影响因素,有别于该区其他研究,本研究基于祁连山区普遍存在的微地形,分别分析了微地形下以青海云杉和高山草地为主导植被的阴、阳坡土壤蓄水能力差异,分析中地形对植被群落再塑造而产生的蓄水能力差异是显而易见的。在地形影响下,不同坡向植被受到的水热条件也随之不同,因此形成了由图 2 所示的特有植被分异山体,加之后期不同生态系统对土壤的再影响导致两种坡向下土壤蓄水能力发生了明显的差异,这与赵海鹏等人<sup>[23]</sup>关于坡面尺度土壤水热的研究结果类似。此外,与相关研究<sup>[9,24]</sup>得出的在该区草地生态系统水源涵养能力最强的结论不一致的是本研究中青海云杉土壤界面水源涵养能力要强于草地,主要体现在阴坡(青海云杉)土壤饱和蓄水能力显著高于阳坡(高山草地),原因在于云杉林地表积累了一定厚度枯落物,加之阴冷潮湿,地表腐殖质累积厚,土壤疏松,土壤孔隙度随之远大于阳坡(高山草地),透气透水性强,因此在降水期,能够更好保留水分,涵养水源。

4.2 结论

- (1) 在本研究区域,坡位显著影响了土壤中水分贮存量,在阳坡土壤中水分贮存量沿坡位上升逐渐呈减少状态,坡中上为土壤水分贮存量最低的坡位;在阴坡土壤中水分贮存量沿坡位上升逐渐呈增多状态,坡顶处为土壤水分贮存量高的坡位,坡中上至坡顶区域应当在水土保持工作中引起足够重视;
- (2) 青海云杉(阴坡)各坡位土壤潜在蓄水能力均高于高山草地(阳坡),自坡底至坡中上,两类型生态系统土壤饱和蓄水量在坡位、土层均表现出了极显著差异性,但自坡中上开始,两者在坡位和土层尺

度上土壤饱和蓄水量差异性趋弱,说明坡中上以下坡位是两类生态系统土壤蓄水能力核心区域。

参考文献:

[1] 党宏忠,却晓娥,冯金超,等.土壤水分对黄土区苹果园土壤—植物—大气连续体(SPAC)中水势梯度的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):829-836.  
Dang H Z, Que X E, Feng J C, et al. Effect of soil moisture on water potential gradients in the soil-plant-atmosphere continuum(SPAC) of apple orchards in the Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(3):829-836.

[2] 温林生,彭云,邓文平,等.庐山杉木林与黄山松林的土壤层水源涵养能力和土壤侵蚀敏感性探究[J].水土保持学报,2022,36(2):255-260.  
Wen L S, Peng Y, Deng W P, et al. Research on water conservation ability and soil erosion sensitivity in *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus taiwanensis* Forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 255-260.

[3] Bodman G B, Colman E A. Moisture and Energy Condition During Downward Entry of water into soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,8(2):166-182.

[4] Schwazel K, Menzer A, Clausnitzer F, et al. Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes:a comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt forest(Saxony Germany)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009(149):1994-2006.

[5] 张静,贾洪文,李远航,等.青海大通县典型林分的枯落物和土壤蓄水能力评价[J].中国水土保持科学,2022,29(3):135-141,146.  
Zhang J, Jia H E, Li Y H, et al. Evaluation of litter and soil water-holding capacity of typical stand in Datong, Qinghai[J]. Science of Soil and Water Conser-



- vation, 2022, 29(3):135-141, 146.
- [6] 张黎明, 皇甫超河, 远勇帅, 等. 升金湖消落带植被特征及与土壤特性的关系[J]. 草业科学, 2021, 38(1):52-62. Zhang L M, Huangfu C H, Yuan Y S, et al. The correlations between vegetation composition and soil characteristics in the riparian zone of Shengjin Lake[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(1):52-62.
- [7] 李玉辰, 李宗省, 张小平, 等. 祁连山国家公园植被时空变化及其对人类活动的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(1):219-233. Li Y C, Li Z X, Zhang X P, et al. Spatial and temporal changes in vegetation cover and response to human activities in Qilian Mountain National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1):219-233.
- [8] 李红琴, 王卓权, 张法伟, 等. 祁连山南麓高寒禾草—矮嵩草草甸土壤水源涵养功能的特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3):135-141, 146. Li H Q, Wang Z Q, Zhang F W, et al. Soil water conservation function of an alpine *graminoid-kobresia* meadow on the southern slope of the Qilian Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3):135-141, 146.
- [9] 薛健, 李宗省, 冯起, 等. 1980—2017年祁连山水源涵养量时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):1-13. Xue J, Li Z X, Feng Q, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water conservation amount in the Qilian Mountains from 1980 to 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):1-13.
- [10] 杨晓霞, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1):197-207. Yang X X, Zhao J M, Zhang X, et al. Litter and soil water conservation function of typical shrubs in eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1):197-207.
- [11] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 近半个世纪以来祁连山区气温与降水变化的时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(4):125-130. Zhang Y Z, Zhang B, Liu Y Y, et al. Variation characteristics of air temperature and precipitation in Qilian mountain region in recent half century[J]. Journal of Arid and Land Resources and Environment, 2009, 23(4):125-130.
- [12] 袁杰. 祁连山黑河源区土壤储碳蓄水能力及潜力研究[D]. 西宁:青海师范大学, 2019. Yuan J. Study on the capacity and potential of soil carbon storage and soil water storage in Heihe River source area of Qilian Mountain[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2019.
- [13] 吕明侠, 王一博, 刘国华. 黑河上游高山区浅层土壤水分变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4):899-907. Lü M X, Wang Y B, Liu G H, et al. Changes in shallow soil moisture and its influencing factors in the alpine region of the Upper Heihe River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4):899-907.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社, 1978. Soil Physics Research Laboratory, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical property determination method[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [15] 李学林, 李福春, 陈国岩, 等. 用沉降法和激光法测定土壤粒度的对比研究[J]. 土壤, 2011, 43(1):130-134. Li X L, Li F C, Chen G Y, et al. Comparative study on grain-size measured by laser diffraction and sedimentation techniques[J]. Soils, 2011, 43(1):130-134.
- [16] 吉艳芝, 张丽娟, 王殿武, 等. 土壤学试验方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2021. Ji Y Z, Zhang L J, Wang D W, et al. Soil science laboratory methods[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2021.
- [17] 乔文英, 安琪琪, 常小峰, 等. 黄土高原草地灌丛化对潜在植被截留和土壤蓄水能力的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1):69-76. Qiao W Y, An Q Q, Chang X F, et al. Effects of shrub encroachment on potential vegetation interception and soil water-holding capacity of grasslands on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1):69-76.
- [18] 李强, 何国兴, 刘志刚, 等. 东祁连山高寒草甸土壤“固—液—气”三相组成对海拔和坡向的响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3):195-200, 206. Li Q, He G X, Liu Z G, et al. Response of three-phase composition of soil “solid-liquid-gas” to altitude and slope aspects in alpine meadow of the eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3):195-200, 206.
- [19] 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. Zhang M X, Liu W, Zhu M, 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.

- [21] Pang D, Cui M, Liu Y, et al. Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded karst ecosystems of south-west China[J]. *Ecological Engineering*, 2019,138:391-402.
- [22] García F, Sveshtarova B, Oliva M. Seasonal effects on soil organic carbon dynamics in a tropical deciduous forest ecosystem in western Mexico [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2003,19(2):179-188.
- [23] Feng W, Zou X, Schaefer D. Above-and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of south-west China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5):978-983.
- [24] 魏翠翠,刘小飞,林成芳,等.凋落物输入改变对亚热带两种米槠次生林土壤酶活性的影响[J].*植物生态学报*,2018,42(6):692-702.  
Wei C C, Liu X F, Lin C F, et al. Response of soil enzyme activities to litter input changes in two secondary *Castanopsis carlessii* forests in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018,42(6):692-702.
- [25] 李英年,王勤学,杜明远,等.草毡寒冻锥形土有机质补给、分解及大气 CO<sub>2</sub> 通量交换[J].*草地学报*,2006,14(2):165-169.  
Li Y N, Wang Q X, Du M Y, et al. A study on replenishment and decomposition of organic matter in and mat-cryic cambisols CO<sub>2</sub> flux between vegetation and atmosphere[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006,14(2):165-169.
- [26] 唐仕姗,杨万勤,殷睿,等.中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子[J].*植物生态学报*, 2014,38(6):529-539.  
Tang S S, Yang W Q, Yin R, et al. Spatial characteristics in decomposition rate of foliar litter and controlling factors in Chinese forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014,38(6):529-539.
- [27] Xiong X, Zhou G, Zhang D. Soil organic carbon accumulation modes between pioneer and old-growth forest ecosystems[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(12):2419-2428.
- [28] 梁艺凡,万晓华,桑昌鹏,等.滨海防护林土壤氮组分对凋落物和根系去除的响应[J].*森林与环境学报*,2019, 39(2):127-134.  
Liang Y F, Wan X H, Sang C P, et al. Response of soil nitrogen pool to litter and root exclusion in costal protection forest[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019,39(2):127-134.
- [29] 陈玉平,吴佳斌,张曼,等.枯落物处理对森林土壤碳氮转化过程影响研究综述[J].*亚热带资源与环境学报*, 2012,7(2):84-94.  
Chen Y P, Wu J B, Zhang M, et al. Research advances of effects of detritus input and removal on dynamics of carbon and nitrogen in forest soils[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*,2012,7(2):84-94.

~~~~~  
(上接第 167 页)

- [20] 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.  
Liu M X, Wang G. Responses of plant community diversity and soil factors to slope aspect in alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013,32(2):259-265.
- [21] 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.  
Gao X S, Deng L J, Zhang S R, et al. 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.
- [22] 高露,张圣微,赵鸿彬,等.退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J].*干旱区研究*,2020, 37(3):607-617.  
Gao L, Zhang S W, Zhao H B, et al. Spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties in degraded grassland and their effect on soil moisture[J]. *Arid Zone Research*, 2020,37(3):607-617.
- [23] 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.  
Zhao H P, Lü M X, Wang Y B, et al. Spatiotemporal variation characteristics of soil water content and temperature within active layer at slope scale in the Fenghuoshan basin, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020,42(4):1158-1168.
- [24] 胡健,吕一河,张琨,等.祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异[J].*生态学报*,2016,36(11): 3338-3349.  
Hu J, Lü H, Zhang K, et al. The differences of water conservation function under typical vegetation types in the Pailugou catchment, Qilian Mountain, northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(11):3338-3349.