

西藏加乌拉山土壤物理性质垂直地带性特征

韩嘉华, 张志伟*, 尹惠妍, 陈小强, 余 波

(西藏农牧学院 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000)

摘 要:以西藏加乌拉山为研究对象,采用野外调查与室内试验的方法,测定加乌拉山山脉南北两侧不同海拔梯度的土壤容重、含水量和孔隙度等8项物理性质,分析不同海拔、不同坡向下各土壤指标的差异性及各指标间的相关性,旨在高原生态建设、区域水土保持工作提供科学理论依据。结果表明,1)不同海拔不同土层土壤物理性质存在一定的差异,不同海拔土壤样品的土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、土壤含水量、土壤饱和含水量和土壤毛管持水量的变化范围分别为0.99~1.59 g/cm³、40.85%~67.47%、1.63%~6.76%、42.80%~70.17%、5.71%~20.42%、25.55%~68.55%、25.27%~65.34%。2)在山麓北坡,海拔与容重呈极显著负相关($P<0.01$),与土壤饱和含水量、土壤毛管持水量、土壤非毛管孔隙度的相关关系为极显著正相关($P<0.01$),土壤容重与其他物理指标呈极显著负相关($P<0.01$);在山麓南坡,土壤毛管孔隙度、总孔隙度、土壤毛管持水量与海拔呈显著负相关($P<0.05$),总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤含水量与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$)。3)研究区整体上0~10 cm土层土壤物理性质基本优于10~20 cm和20~30 cm;综合各海拔土壤物理性质表明,山麓北坡随着海拔升高,土壤各项物理指标越好,而南坡则相反。

关键词:土壤物理性质;海拔梯度;加乌拉山

中图分类号:S714.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0069-07

Vertical Zonal Characteristics of Soil Physical Properties in Jiawula Mountain, Tibet

HAN Jia-hua, ZHANG Zhi-wei*, YIN Hui-yan, CHEN Xiao-qiang, YU Bo

(Department of Resources and Environment, Tibet Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Tibet, China)

Abstract: Taking the Jiawula Mountain in Tibet as the research object, the physical properties of the soils collected from south and north slopes of the mountain with different altitude gradients were measured by field investigation and laboratory test, such as soil bulk density, water content, and porosity. The differences of soil indexes at different altitudes and slope directions, and the correlation among indices were analyzed to provide scientific theoretical basis for plateau ecological construction and regional soil and water conservation. The results show that 1) soil physical properties of different soil layers at different altitudes, The variation ranges of soil bulk density, capillary porosity, non-capillary porosity, total porosity, soil water content, soil saturated water content and soil capillary water holding capacity of soil samples at different altitudes were as follows: 0.99—1.59 g/cm³, 40.85%—67.47%, 1.63%—6.76%, 42.80%—70.17%, 5.71%—20.42%, 25.55%—68.55%, 25.27%—65.34%. 2) On the northern slope, altitude was negatively correlated with bulk density ($P<0.01$), and positively correlated with soil saturated water content, soil capillary water holding capacity and soil non-capillary porosity ($P<0.01$). Soil bulk density was negatively correlated with other physical indicators ($P<0.01$). On the southern slope, soil capillary porosity, total

收稿日期:2021-10-22 修回日期:2022-03-29

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0405)。

第一作者:韩嘉华,硕士在读。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:hjh17865664171@163.com

*通信作者:张志伟,硕士,讲师。研究方向:水土保持及荒漠区划。E-mail:aiwoweige@163.com

porosity and soil capillary water holding capacity were significantly and negatively correlated with altitude ($P < 0.05$), while total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity and soil water content were significantly and negatively correlated with soil bulk density ($P < 0.01$). 3) On the whole, the soil physical properties of 0–10 cm soil layer in the study area were better than those of 10–20 cm and 20–30 cm; the physical properties of soil at different altitudes showed that the physical indexes of soil on the northern slope were better with the increase of altitude, while those on the southern slope were opposite.

Key words: soil physical property; altitude gradient; the Jiawula Mountain

土壤是生态系统中的重要因素,土壤的形成过程包括生物过程、物理过程和化学过程,不同地区在地形地貌、植被类型和气候条件等方面不同,形成了不同的土壤类型。导致土壤物理性质存在明显的差异^[1]。山地具有浓缩的环境梯度、高度异质化的生境^[2],山地土壤物理性质会受到很多因素影响,尤其是众多因素在垂直性规律分布方面,导致山地土壤在海拔梯度上呈现明显的垂直分布特征^[2-4]。许多研究也表明^[5-7],土壤物理性质在不同海拔梯度上存在明显垂直分异特征。对青藏高原土壤容重、孔隙度、土壤饱和含水量、土壤毛管持水量等物理性质的测试较为耗时,测定也有一定的环境要求,因此研究较少,主要在藏东南区域有学者进行过相关研究^[8-9]。

加乌拉山位于青藏高原西南部,海拔高,生境复杂多样,拥有阶梯式垂直生态系统和多种地貌地形的极其复杂的现代地表形态^[10]。由于地理交通和气候环境等多种限制性因素,该区域有关生态环境研究工作较少,针对土壤物理性质垂直地带性的基础研究工作更少。本文试图对加乌拉山不同海拔梯度和土层深度的土壤物理性质进行研究,探讨海拔与土壤物理性质的关系,对认识垂直带土壤的成土过程、结构和功能有重要理论价值,对不同海拔梯度与土壤间相互作用过程和机理的深入研究同样具有重要意义^[11-12],为高原生态建设、区域水土保持工作提供科学理论依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概况

加乌拉山位于日喀则定日县内,地处喜马拉雅山脉中段北麓,加乌拉山口是进入珠穆朗玛峰自然保护区后前往珠峰大本营必经的一个垭口,其山脉走向是西北—东南,地理坐标 87.039° — 87.088° E, 28.472° — 28.547° N,海拔 $3\,130\sim 6\,768\text{ m}$ (图1)。该地属于高原亚寒带季风干旱半干旱气候区和高原寒带季风干旱气候区,日照时间长,太阳辐射强烈,夏季凉爽湿润、雨水集中,冬季寒冷干燥多大风。年降水量 295.8 mm ,以8月最多,为 123.2 mm ,2、3月最少,均为 0.6 mm ,年蒸发量

$2\,526.8\text{ mm}$,年平均相对湿度 40% ;年日照时数 $3\,337.3\text{ h}$,年太阳总辐射 $7\,553.8\text{ MJ/m}^2$;年平均气温 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[13]。在该区域常见植物有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、青藏薹草(*Carex moorcroftii*)、垫状点地梅(*Androsace tapete*)、独一味(*Lamio-phlomis rotata*)、乌奴龙胆(*Gentiana urnula*)、垂头菊(*Cremanthodium reniforme*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、山居雪灵芝(*Arenaria edgeworthiana*)、藏波罗花(*Incarvillea younghusbandii*)和匙叶甘松(*Nardostachys jatamansi*)。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查方法 2019年9月,在海拔 $4\,488\sim 5\,268\text{ m}$ 垂直于加乌拉山脉走向,以 200 m 为一个海拔梯度,设置9个采样地点,但在山顶 $5\,268\text{ m}$ 和南坡的 $5\,055\text{ m}$ 处,由于裸露岩石较多,土层较薄,且石块较多,无法取样,所以有效采样地点为7个。在不同海拔梯度选择均一环境内的3个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准样地,运用五点采样法,在每个样点分 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 共3个土层深度,进行取土编号后,带回实验室分别用以测定土壤的各项物理指标。样地基本情况及采样路线如图1、表1所示。

1.2.2 测试方法与数据处理 各物理性质测定与计算参照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤分析方法》^[14]。数据统计与处理采用 Excel 2010 和 SPSS 23 软件,显著性分析采用 ANOVA 完成;相关性采用双变量 Pearson 相关分析完成。

2 结果与分析

2.1 土壤容重

容重是土壤中最重要物理指标之一,容重指的是土壤在完整自然结构状态下单位容积的重量。土壤容重会影响土壤的其他性质,还可以有效地指示土壤生产力和土壤质量^[15-16]。

由表2可知,加乌拉山不同海拔不同土层的土壤容重的变化范围为 $0.99\sim 1.59\text{ g/cm}^3$ 。在山麓北坡,随着海拔的升高容重总体呈减小趋势,主要由于海拔升高过程中,立地类型由高寒草地→稀疏灌

木→高寒草甸转变过程中,植被盖度越大,地表植被的根系影响土壤容重导致的结果。在 0~10 cm 土层中,海拔 5 006 m 处土壤容重最小,并且与 4 488、4 634、4 899 m 有显著差异($P<0.05$);在 10~20 cm 土层中,4 488、4 634、4 899 m 之间均无显著差异($P>0.05$);在 20~30 cm 土层中,4 899 m 和

5 006 m 处土壤容重显著小于($P<0.05$)北坡其他海拔。在 0~30 cm 土层中,各海拔梯度的不同土层土壤容重呈现减小趋势,但差异不显著($P>0.05$)。在山麓南坡,5 159 m 的 20~30 cm 和 10~20 cm 与 0~10 cm 之间有显著差异($P<0.05$),其他海拔不同土层之间均不显著($P>0.05$)。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the research sites

	经度	纬度	海拔/m	立地类型	坡向	坡位	坡度(°)	盖度(%)
北坡	87.088665°E	28.547647°N	4 488	高寒草地	西北	中下部	13	30
	87.08539°E	28.536763°N	4 634	稀疏灌木	西北	中下部	22	20
	87.079713°E	28.522922°N	4 899	高寒草甸	北	中部	14	40
	87.07407°E	28.516553°N	5 006	高寒草甸	东北	中上部	17	70
南坡	87.039233°E	28.472705°N	4 688	稀疏荒漠草原	西南	中下部	25	<5
	87.057163°E	28.482863°N	4 864	稀疏荒漠草原	西南	中部	32	<5
	87.070730°E	28.494987°N	5 159	荒漠草地	西南	中上部	10	20

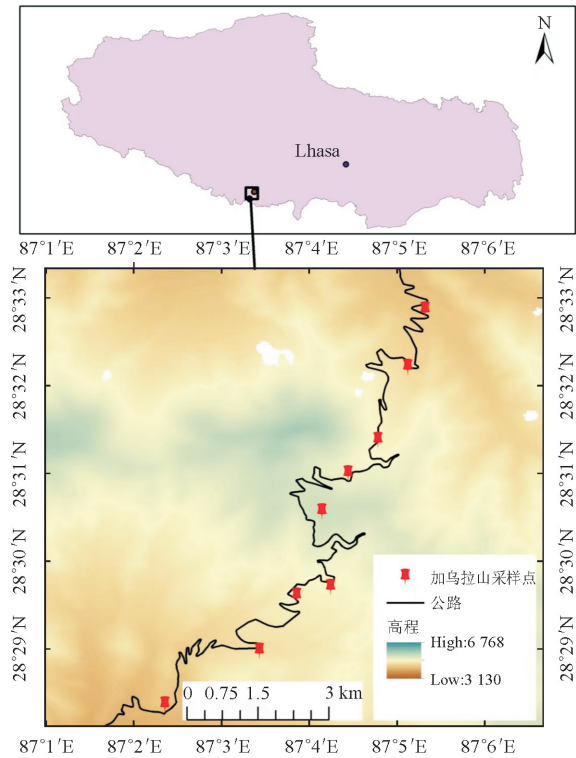


图 1 研究区域取样示意图

Fig. 1 Sampling diagram of the study area

2.2 土壤孔隙度

土壤孔隙度会影响土壤通气性和土壤水分涵养功能,对土壤中水、肥、气、热和微生物活性等发挥着重要作用,并且反映土壤潜在蓄水和调节降水的功能^[17-18]。

由表 2 可知,不同海拔不同土层土壤毛管孔隙度的变化范围为 40.85%~67.47%。在山麓北坡,0~10 cm 土层中,土壤毛管孔隙度在海拔 5 006 m 显著大于($P<0.05$)北坡的其他 3 个海拔;10~20

cm 土层中,北坡 4 个海拔梯度处土壤毛管孔隙度差异性均不显著($P>0.05$),海拔 4 488 m 和 5 006 m 处 10~20 cm 毛管孔隙度显著大于($P<0.05$)0~10 cm 和 20~30 cm,在海拔 4 899 m 处 0~10 cm 与 20~30 cm 毛管孔隙度有显著差异($P<0.05$)。在山麓南坡,0~10 cm 土层中,4 688 m 海拔的毛管孔隙度显著大于($P<0.05$)南坡的另外 2 个海拔;在 20~30 cm 土层中,山麓南坡各海拔毛管孔隙度差异性不明显($P>0.05$),在海拔 4 864 m 处 0~10 cm 与 20~30 cm 毛管孔隙度有显著差异($P<0.05$)。

不同海拔不同土层非毛管孔隙度的变化范围为 1.63%~6.76%。0~10 cm 土层非毛管孔隙度的变化范围为 2.66%~6.76%,明显大于 10~20 cm 和 20~30 cm 土层(1.63%~4.52%)。在山麓北坡,随着海拔的升高非毛管孔隙度总体呈增大趋势,在 0~10 cm 土层中,在海拔 5 006 m 的非毛管孔隙度显著大于($P<0.05$)北坡的其他海拔;10~20 cm 土层中,4 个海拔处非毛管孔隙度的显著性均不明显($P>0.05$);在 20~30 cm 土层中,5 006 m 显著大于($P<0.05$)北坡的其他海拔。在 0~30 cm 土层中,各海拔梯度的不同土层非毛管孔隙度呈现减小趋势,4 488 m 处 0~10 cm 和 10~20 cm 非毛管孔隙度显著大于($P<0.05$)20~30 cm 土层处,在海拔 5 006 m 处 0~10 cm 和 20~30 cm 显著大于($P<0.05$)10~20 cm 土层处。在山麓南坡,4 864 m 处 0~10 cm 和 20~30 cm 非毛管孔隙度显著大于($P<0.05$)10~20 cm。

不同海拔不同土层总孔隙度的变化范围为 42.80%~70.17%。在山麓北坡,0~10 cm 土层

中,5 006 m 总孔隙度显著大于($P < 0.05$)北坡的其他海拔;在 10~20 cm 土层中,4 488 m 显著大于($P < 0.05$)北坡其他海拔,在海拔 4 488 m 处 10~20 cm 总孔隙度显著大于($P < 0.05$)其他 2 个土层,在 0~30 cm 土层中,各海拔梯度的不同土层土壤总孔隙度有一定差异,在 4 899 m 处 20~30 cm 显著大于($P < 0.05$)0~10 cm 和 10~20 cm。在山麓南坡,0~10 cm 土层中,4 864 m 显著大于($P < 0.05$)4 688 m 和 5 159 m;20~30 cm 土层中,南坡 3 个海拔处的总孔隙度差异性均不显著($P > 0.05$),在 4 864 m 处 0~10 cm 和 10~20 cm 总孔隙度显著大于($P < 0.05$)20~30 cm。

2.3 土壤通气性

土壤通气性对植被生长发育至关重要,是大气和土壤中气体进行交换的通道,良好的土壤通气性是土壤空气质量的保障,有利于植被生长发育,能够保持较高的土壤肥力^[19]。

由表 2 可知,不同海拔不同土层土壤通气性的变化范围为 24.11%~44.87%。在山麓北坡,0~10 cm 土层中,在 4 899 m 处的土壤通气性显著小于($P < 0.05$)北坡的其他海拔;在 10~20 cm 土层中,5 006 m 显著大于($P < 0.05$)北坡其他海拔;在 20~30 cm 土层中,4 899 m 处土壤通气性显著大于($P < 0.05$)北坡的其他 3 个海拔。在 0~30 cm 土层中,各海拔梯度的不同土层土壤通气性总体呈增大趋势,4 488、4 899、5 006 m 海拔处 10~20 cm 和 20~30 cm 土层中土壤通气性显著大于($P < 0.05$)0~10 cm。在山麓南坡,0~10 cm 土层中,4 864 m 海拔处土壤通气性显著大于($P < 0.05$)4 688 m 和 5 159 m;10~20 cm 和 20~30 cm 土层中,5 159 m 海拔处的土壤通气性显著小于 4 688 m 和 4 864 m。

2.4 土壤水分

土壤水分是土壤重要的指标之一更是植被生长发育的重要因素,土壤水分广泛分布于陆地表面是植被根系吸水的主要来源^[20]。

2.4.1 土壤含水量 由表 2 可知,不同海拔不同土层土壤含水量的变化范围为 5.71%~20.42%。在山麓北坡,随着海拔的升高,土壤含水量不断增大;在 0~10 cm 土层中,5 006 m 海拔处的土壤含水量显著大于($P < 0.05$)北坡其他海拔;在 10~20 cm 土层中,4 488 m 显著大于($P < 0.05$)其他海拔;20~30 cm 土层中,各海拔梯度的含水量差异性都不显著($P > 0.05$);0~30 cm 土层中,各海拔梯度的不同土层土壤含水量随着土壤深度的增加总体呈减小趋势,4 488 m 海拔 10~20 cm 土层与 0~10、

20~30 cm 土层有显著差异($P < 0.05$),其余各海拔土层之间均不显著($P > 0.05$)。在山麓南坡,0~30 cm 土层中,各海拔梯度的不同土层土壤含水量总体呈减小趋势,但差异不显著($P > 0.05$)。

2.4.2 土壤饱和含水量与毛管持水量 由表 2 可知,不同海拔不同土层土壤饱和含水量的变化范围为 25.55%~68.55%。在山麓北坡,随着海拔的升高,土壤饱和含水量增大,在 0~10、10~20 cm 土层中,5 006 m 海拔处土壤饱和含水量显著大于($P < 0.05$)北坡的其他海拔。在山麓南坡,各海拔梯度的不同土层土壤饱和含水量总体呈减小趋势,且在各土层中 4 864 m 海拔处土壤饱和含水量显著大于($P < 0.05$)4 688 m 和 5 159 m。

不同海拔不同土层土壤毛管持水量的变化范围为 25.27%~65.34%。在山麓北坡,随着海拔的升高,土壤毛管持水量增大,0~10、10~20 cm 土层,5 006 m 海拔处土壤毛管持水量显著大于($P < 0.05$)各自土层山麓北坡的其他海拔,4 488 m 处土壤毛管持水量 0~10 cm 和 20~30 cm 土层之间差异性不显著($P > 0.05$)。在山麓南坡,0~10、20~30 cm 土层中,在 4 864 m 处土壤毛管持水量显著大于($P < 0.05$)南坡的其他 2 个海拔,5 159 m 处土壤毛管持水量 0~10 cm 显著大于($P < 0.05$)10~20 cm 和 20~30 cm 土层。

2.5 各土壤物理性质指标间相关性

为研究加乌拉山土壤各项物理指标随海拔梯度变化的垂直分异特征及各项指标相互影响程度,对山麓北坡和南坡土壤的各项物理性质指标进行了相关性分析。由表 3 可知,在山麓北坡,海拔与容重呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数为-0.565,即随着海拔的上升土壤容重越小^[21]。土壤饱和含水量、土壤毛管持水量、土壤非毛管孔隙度与海拔之间的相关关系为极显著正相关($P < 0.01$),土壤含水量与海拔呈显著正相关($P < 0.05$)。随着海拔的升高,山麓北坡土壤物理性质有一定的规律性。

总孔隙度、土壤含水量、土壤通气性、土壤饱和含水量、土壤毛管持水量与土壤容重也呈极显著负相关($P < 0.01$),这与相关学者的多数研究结果相同^[22-23]。说明在该区域土壤受到环境的影响,土壤容重值整体较高,对研究区域土壤质量的影响较大。土壤的容重与孔隙度是反映土壤紧实程度的重要物理指标,随海拔的增加,在山麓北坡,降水量随之递增,植被群落物种组成多样化,微生物数量更加丰富,活跃程度更强,从而显著改善土壤的容重及孔隙度状况^[24]。

表 2 不同海拔及不同土层深度土壤物理性质特征

Table 2 Soil physical properties at different altitudes and soil depths

物理指标	土层深度/cm	北坡海拔/m			
		4 488	4 634	4 899	5 006
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0~10	1.46±0.01ab	1.59±0.07a	1.41±0.12abc	0.99±0.01d
	10~20	1.15±0.23bc	1.48±0.07ab	1.18±0.11abc	1.03±0.54c
	20~30	1.45±0.15ab	1.39±0.07ab	1.03±0.16c	1.02±0.05c
毛管孔隙度(%)	0~10	43.47±0.67dB	43.04±1.21d	44.32±1.29cdB	50.47±1.04bB
	10~20	67.47±17.20aA	44.75±1.18ab	50.80±3.78abAB	60.36±3.12abA
	20~30	42.29±2.78bB	41.21±1.69b	60.39±3.24aA	58.71±2.53aAB
非毛管孔隙度(%)	0~10	3.51±0.28bcA	4.80±1.22b	3.21±0.76bc	6.76±0.17aA
	10~20	2.71±0.39abA	2.62±0.12ab	3.44±0.38a	3.61±0.81aB
	20~30	1.63±0.13bB	3.28±0.77ab	3.56±0.26ab	4.52±1.09aAB
总孔隙度(%)	0~10	48.58±2.02bB	47.84±2.43b	47.53±2.02bB	57.23±0.79a
	10~20	70.17±16.81aA	47.38±1.27ab	51.25±2.39abB	63.97±3.93ab
	20~30	43.93±2.69bC	44.48±0.92b	63.95±3.00aA	63.23±2.11a
土壤含水量(%)	0~10	9.28±0.008cdB	10.44±0.007bcd	14.48±0.016b	20.42±0.017a
	10~20	19.67±0.142aA	8.81±0.017c	15.37±0.016b	16.96±0.021ab
	20~30	5.93±0.001bcB	7.79±0.019bc	16.55±0.014a	19.34±0.017a
土壤通气性(%)	0~10	33.65±2.69abB	29.18±4.68bc	24.11±1.15cB	31.70±1.99bcB
	10~20	40.21±2.25abA	32.94±4.38ab	33.19±2.65abAB	42.97±3.04aA
	20~30	40.22±2.31abA	36.14±0.32ab	44.87±5.12aA	40.00±4.34abAB
土壤饱和含水量(%)	0~10	33.29±1.05cAB	30.36±2.81c	34.56±4.77cB	57.77±0.66a
	10~20	41.66±3.37bcA	32.30±2.42bc	47.18±6.60abB	62.59±6.75a
	20~30	31.40±4.98cB	32.08±0.97c	68.55±16.60aA	64.02±4.91ab
土壤毛管持水量(%)	0~10	30.88±1.15bcB	27.26±1.92c	32.14±3.96bcC	50.94±0.85a
	10~20	39.24±3.19bcdA	30.51±2.29cd	44.15±6.09bcB	59.00±5.82a
	20~30	30.26±4.94cB	29.66±0.35c	65.34±15.91aA	58.08±3.95ab
物理指标	土层深度/cm	南坡海拔/m			
		4 688	4 864	5 159	
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0~10	1.41±0.04abc	1.25±0.36c	1.38±0.02bcB	
	10~20	1.50±0.08ab	1.24±0.11abc	1.54±0.03aA	
	20~30	1.50±0.10ab	1.20±0.06bc	1.55±0.04aA	
毛管孔隙度(%)	0~10	47.74±1.56bc	57.28±1.63aA	43.00±0.84d	
	10~20	46.62±3.01ab	55.40±3.05abAB	41.26±1.68b	
	20~30	47.24±0.89b	46.18±3.25bB	40.85±3.20b	
非毛管孔隙度(%)	0~10	3.02±0.56bc	4.22±0.22bcA	2.66±0.13c	
	10~20	2.45±0.56ab	2.69±0.26abB	1.82±0.37b	
	20~30	2.32±0.11ab	3.53±1.08abAB	1.96±0.31b	
总孔隙度(%)	0~10	50.76±1.18b	61.50±1.48aA	45.65±0.79b	
	10~20	49.07±3.16ab	58.09±3.32abAB	44.21±1.66b	
	20~30	49.56±0.84b	49.72±2.17bB	42.80±3.48b	
土壤含水量(%)	0~10	5.94±0.008d	13.64±0.016bc	9.18±0.013cd	
	10~20	5.71±0.004c	12.04±0.006b	6.11±0.003c	
	20~30	5.71±0.004c	9.92±0.014b	6.11±0.004bc	
土壤通气性(%)	0~10	38.55±3.18ab	41.86±1.06a	30.80±3.20bc	
	10~20	37.68±3.87ab	40.49±4.58ab	30.39±0.69b	
	20~30	40.35±1.31ab	39.70±3.85ab	32.36±2.54b	
土壤饱和含水量(%)	0~10	35.79±2.05c	50.10±1.90bA	33.77±1.27cA	
	10~20	30.78±4.12c	47.85±6.48abAB	26.89±0.76cB	
	20~30	29.50±4.29c	44.44±3.85bcB	25.55±1.73cB	
土壤毛管持水量(%)	0~10	34.48±1.97b	46.44±2.03a	30.17±1.27bcA	
	10~20	29.58±4.05cd	45.62±6.11ab	25.27±0.31dB	
	20~30	33.67±1.52c	38.31±1.56bc	27.73±1.72cB	

注:不同小写字母表示同一土层,不同海拔差异性显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一海拔,不同土层间差异性显著($P<0.05$),如土层间均不显著未标。

表 3 加乌拉山山麓北坡各样点土壤物理性质指标相关性

Table 3 Correlation of soil physical property indexes at different points on the northern slope of Jiawula Mountain

	海拔	容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	土壤含水量	土壤通气性	土壤饱和含水量
容重	-0.565 **							
毛管孔隙度	0.245	-0.755 **						
非毛管孔隙度	0.459 **	-0.351 *	-0.006					
总孔隙度	0.313	-0.801 **	0.987 **	0.144				
土壤含水量	0.416 *	-0.730 **	0.850 **	0.210	0.868 **			
土壤通气性	0.121	-0.580 **	0.533 **	0.078	0.550 **	0.109		
土壤饱和含水量	0.661 **	-0.882 **	0.603 **	0.385 *	0.658 **	0.506 **	0.685 **	
土壤毛管持水量	0.639 **	-0.870 **	0.620 **	0.299	0.660 **	0.496 **	0.697 **	0.994 **

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。表 4 同。

由表 4 可知,在山麓南坡,土壤毛管孔隙度、总孔隙度、土壤毛管持水量与海拔呈显著负相关($P < 0.05$)。总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤含水量与土壤容重呈极显著负相关($P < 0.01$),土壤通气性、土壤饱和含水量、土壤毛管持水量与土

壤容重也呈极显著负相关($P < 0.01$)。土壤毛管孔隙度同总孔隙度、土壤含水量、土壤通气性、土壤饱和含水量、土壤毛管持水量呈极显著正相关($P < 0.01$)。非毛管孔隙度同总孔隙度、土壤含水量、土壤饱和含水量呈极显著正相关($P < 0.01$)。

表 4 加乌拉山山麓南坡各样点土壤物理性质指标相关性

Table 4 Correlation of soil physical property indexes at different points on the southern slope of Jiawula Mountain

	海拔	容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	土壤含水量	土壤通气性	土壤饱和含水量
容重	0.153							
毛管孔隙度	-0.442 *	-0.610 **						
非毛管孔隙度	-0.258	-0.566 **	0.367					
总孔隙度	-0.446 *	-0.755 **	0.922 **	0.632 **				
土壤含水量	0.055	-0.661 **	0.595 **	0.534 **	0.673 **			
土壤通气性	-0.575 **	-0.631 **	0.704 **	0.309	0.752 **	0.171		
土壤饱和含水量	-0.251	-0.959 **	0.741 **	0.590 **	0.864 **	0.733 **	0.680 **	
土壤毛管持水量	-0.402 *	-0.850 **	0.862 **	0.455 *	0.890 **	0.676 **	0.749 **	0.930 **

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)不同海拔不同土层土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、土壤含水量、土壤饱和含水量和土壤毛管持水量的变化范围分别为 0.99~1.59 g/cm³、40.85%~67.47%、1.63%~6.76%、42.80%~70.17%、5.71%~20.42%、25.55%~68.55%、25.27%~65.34%。

(2)各土壤物理性质指标间相关性分析可知,在山麓北坡,海拔与容重呈极显著负相关,海拔与土壤饱和含水量、土壤毛管持水量、土壤非毛管孔隙度的相关关系为极显著正相关($P < 0.01$);土壤容重与总孔隙度、土壤含水量、土壤通气性、土壤饱和含水量、土壤毛管持水量也呈极显著负相关($P < 0.01$)。在山麓南坡,土壤毛管孔隙度、总孔隙度、土壤毛管持水量与海拔呈显著负相关($P < 0.05$),总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤含水量与土壤容重呈极显著负相关($P < 0.01$)。

(3)整体上 0~10 cm 土层土壤物理性质基本优于 10~20 cm 和 20~30 cm,综合各海拔土壤物理性质表明,北坡随着海拔升高,土壤各项物理指标越好,而南坡则相反。

3.2 讨论

山地海拔垂直梯度变化大,气候和生态环境差异明显。本研究中北坡海拔 5 006 m 的土壤样品较其他海拔的各项物理指标较优,可能的原因是随着海拔的升高温度下降,空气中水分凝结降水,土壤持水量增加,该海拔区域草甸生长较好,植物的根系和穿插作用使得土壤孔隙度增大,含水量增加。南坡海拔 5 159 m 是荒漠草原地带,在光照充足的条件下,表层土壤温度较高,蒸发量大,导致土壤含水量低,加之高海拔降水较多,但植被覆盖度太低,会导致水土流失的发生,所以在南坡海拔 5 159 m 土壤各项物理指标较差。因此,坡向的差异会影响水热条件的再分配,同时水热条件的差异决定植被覆盖度的高低,植被又是改良土壤物理性质的重要原因。

加乌拉山区域表层土壤物理性质基本好于深层

土壤,这是因为区域内的植被根系主要分布在0~15 cm,同时常年的枯落物积累,有机质增多,地表土层孔隙度和含水量大,表层土壤的保水蓄水能力增强影响的结果^[25-26]。在北坡区域,整体坡度较缓,随着海拔升高,立地类型由高寒草地→稀疏灌木→高寒草甸转变。区域内随海拔的升高,降水量增多,植被盖度增加,地表植被的根系也越来越发达,从而改良土壤物理性质,如土壤含水量增加、土壤容重减小、土壤孔隙度和土壤持水量高等。南坡区域由于地形坡度较陡,植被盖度较低,表层土壤受到冻融侵蚀作用,地表物质疏松,在雨季的时候,反而更容易引起水土流失,出现了和山麓北坡相反的结果。

参考文献:

- [1] 王政权,王庆成.森林土壤物理性质的空间异质性研究[J].生态学报,2000(6):945-950.
WANG Z Q, WANG Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests[J]. Acta Ecologic Sinica, 2000(6):945-950. (in Chinese)
- [2] 汤萃文,苏研科,王国亚,等.甘肃迭部扎尕那地区山地土壤过程的垂直分带性研究[J].冰川冻土,2013,35(1):84-92.
TANG C W, SU Y K, WANG G Y, et al. Vertical zonation of alpine soil processes in Zhagana area of Diebu, Gansu Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1):84-92. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 孙海燕,万书波,李林,等.贺兰山西坡不同海拔梯度土壤活性有机碳分布特征及影响因子[J].水土保持学报,2014,28(4):194-199,205.
SUN H Y, WAN S B, LI L, et al. Distribution characteristics and Influencing factors of soil active organic carbon at different elevations on West slope of Helan Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4):194-199, 205. (in Chinese)
- [5] 魏强,凌雷,王多锋,等.不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J].西北林学院学报,2019,34(4):26-35.
WEI Q, LING L, WANG D F, et al. Soil physicochemical properties of three main forest communities at different altitudes in Xinglong Mountain of Gansu Province. [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4):26-35. (in Chinese)
- [6] 任启文,王鑫,李联地,等.小五台山不同海拔土壤理化性质垂直变化规律[J].水土保持学报,2019,33(1):241-247.
REN Q W, WANG X, LI L D, et al. Vertical variation of soil physical and chemical properties at different altitudes in Xiaowutai Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1):241-247. (in Chinese)
- [7] 何方方,何飞,吴宗达,等.岷江冷杉原始林土壤物理性质的海拔梯度变化[J].西北师范大学学报:自然科学版,2015,51(5):92-98.
HE F Y, HE F, WU Z D, et al. Change of soil physical properties along elevation gradients in *Abies faxoniana* natural forest [J]. Journal of Northwest Normal University: Natural Science, 2015, 51(5):92-98. (in Chinese)
- [8] 张鹏,李小熊,姚甜甜,等.藏东横断山区业拉山背风坡土壤理化性质垂直地带性分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(8):111-118.
ZHANG P, LI X X, YAO T T, et al. Vertical zonation of soil physical and chemical properties in the leeward slope of the Yela Mountain in the Hengduan Mountain area in Eastern Tibet[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2020, 48(8):111-118. (in Chinese)
- [9] 万丹,梁博,聂晓刚,等.西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性[J].生态学报,2018,38(3):1065-1074.
WAN D, LIANG B, NIE X G, et al. Research on vertical zonation of soil physical properties in Sygera Mountain, Tibet[J]. Acta Ecologic Sinica, 2018, 38(3):1065-1074. (in Chinese)
- [10] 石运杰,蔡葵,吴文春,等.基于地形特征分异的土地利用分布研究——以珠穆朗玛峰国家级自然保护区为例[J].水土保持研究,2021,28(2):394-400.
SHI Y J, CAI K, WU W C, et al. Research on land use distribution based on topographic differentiation——a case study of Qomolangma National Nature Reserve[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2):394-400. (in Chinese)
- [11] 魏新,郑小锋,张硕新.秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究[J].西北林学院学报,2014,29(3):9-14.
WEI X, ZHENG X F, ZHANG S X. Forest soil physicochemical properties along different altitudinal gradients at Huoditang in the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3):9-14. (in Chinese)
- [12] 张志伟,尹惠妍,周尧治,等.不同设置年限沙障对沙漠土壤理化性质的影响[J].西北林学院学报,2020,35(5):68-77.
ZHANG Z W, YIN H Y, ZHOU Y Z, et al. Effects of sand barriers with different ages on physicochemical properties of desert soil[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5):68-77. (in Chinese)
- [13] 杜军,等.西藏自治区县级气候区划[M].北京:气象出版社,2011:60-63.
- [14] 国家林业局.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999:1-108.
- [15] 吴强.川西北高山/亚高山主要森林土壤水土保持功能研究[D].雅安:四川农业大学,2017.
- [16] 柴华,何念鹏.中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J].生态学报,2016,36(13):3903-3910.
CHAI H, HE N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale[J]. Acta Ecologic Sinica, 2016, 36(13):3903-3910. (in Chinese)
- [17] 李宗超,胡霞.小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J].土壤学报,2015,52(1):242-248.
- [18] 马维伟,王辉,王修华,等.甘南杂海不同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2012,26(4):194-198,220.
MA W W, WANG H, WANG X H, et al. Soil physical characteristics and water conservation function for four main wetland types in Gahai of Ganna[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4):194-198, 220. (in Chinese)

- CHAI Y X, ZHU N, HAN H J. Dust removal effect of urban tree species in Harbin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, Sept. 2002, 13(9): 1121-1126. (in Chinese)
- [18] 康博文, 刘建军, 王得祥, 等. 陕西 20 种主要绿化树种滞尘能力的研究[J]. 陕西林业科技, 2003, (4): 54-56.
- [19] FREER-SMITH P H, EL-KHATIB A A, TAYLOR G. Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species[J]. Water Air and Soil Pollution, 2004, 155(1-4): 173-187.
- [20] NOWAK D J, HIRABAYASHI S, BODINE A, *et al.* Modeled PM₁₀ removal by trees in ten US cities and associated health effects[J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 395-402.
- [21] TERZAGHI E, WILD E, ZACCHELLO U, *et al.* Forest filter effect: role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and associated PAHs[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74: 378-384.
- [22] 房瑶瑶, 王兵, 牛香. 4 种树叶表面颗粒物洗脱特征与其微观形态的关系[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 8(44): 121-126.
- FANG Y Y, WANG B, NIU X. Relationship between leaf micro-morphology and particulate matter wash-off characteristics of four tree species [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2016, 8(44): 121-126. (in Chinese)
- [23] 王会霞, 石摇辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化[J]. 生态学报, 2013, 35(6): 1696-1705.
- WANG H X, SHI Y H, WANG Y H. Dynamic changes of dust retention on plant leaf surface in typical weather[J]. Journal of Ecology, 2013, 35(6): 1696-1705. (in Chinese)
- [24] 张维康, 王兵, 牛香. 北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞尘能力[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2381-2388.
- [25] 谢延翠, 赵明, 何静, 等. 不同径阶云杉林和油松林滞尘能力研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 17-22.
- XIE Y C, ZHAO M, HE J, *et al.* Dust-retaining ability of *Pinus wilsonii* and *Pinus tabulaeformis* forests with different diameter classes[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 17-22. (in Chinese)
- [26] 杜克勤, 刘胜兰, 张杰, 等. 绿化树木带滞尘能力的测定与探讨[J]. 环境污染与防治, 1998, 20(3): 47-48.
- [27] 王兵, 王晓燕, 牛香, 等. 北京市常见落叶树种叶片滞尘空气颗粒物功能[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2005-2009.
- [28] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Effective tree species for local air-quality management[J]. Journal of Arboriculture, 2000, 26(1): 12-19.
- [29] POWE N A, WILLIS K G. Mortality and morbidity benefits of air pollution (SO₂ and PM₁₀) absorption attributable to woodland in Britain[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70(2): 119-128.

(上接第 75 页)

- [19] 雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 297-308.
- [20] 苏敬媛. 黄土高原典型流域土壤水分时空变异及其养分特征对不同植被类型的响应[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [21] 秦嘉海, 张勇, 赵芸晨, 等. 祁连山黑河上游不同退化草地土壤理化性质及养分和酶活性的变化规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 335-346.
- QIN J H, ZHANG Y, ZHAO Y C, *et al.* Soil physicochemical properties and variations of nutrients and enzyme activity in the degrading grasslands in the upper reaches of the Heihe River, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 335-346. (in Chinese)
- [22] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2006(11): 3685-3695.
- ZHANG X B, SHANGGUAN Z P. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(11): 3685-3695. (in Chinese)
- [23] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125-130, 137.
- LIN M Y, ZHANG J J, WANG C X, *et al.* Effects of land use types on soil physical properties in Loess Plateau of Western Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 125-130, 137. (in Chinese)
- [24] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰自然保护区台兰河上游不同海拔灌木土壤理化性质研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1288-1295.
- MA G F, MANSUR · Sabit, ZHANG X Q. Physicochemical properties of surface soil under different shrubs at various altitudes in upstream of Tailan River in Mount Tuomuer[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1288-1295. (in Chinese)
- [25] 时雷雷, 骆土寿, 许涵, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 285-293.
- SHI L L, LUO S S, XU H, *et al.* The fine scale spatial heterogeneity of soil physical properties in a primary tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China[J]. Forest Research, 2012, 25(3): 285-293. (in Chinese)
- [26] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2008(7): 2070-2076.