

# 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

李强<sup>1</sup>, 何国兴<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>1</sup>, 关文昊<sup>1</sup>, 乔欢欢<sup>1</sup>,  
张德罡<sup>1</sup>, 韩天虎<sup>2</sup>, 孙斌<sup>2</sup>, 潘冬荣<sup>2</sup>, 柳小妮<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,  
中—美草地畜牧业可持续发展研究中心,兰州 730070;2.甘肃省草原技术推广总站,兰州 730000)

**摘要:**为探究不同海拔和坡向下高寒草甸土壤“固—液—气”三相组成变化特征,以东祁连山高寒草甸为研究对象,分析了不同海拔(2 800,3 000,3 200,3 400,3 600,3 800,4 000 m)、坡向(阳坡、阴坡)高寒草甸的植被特征和土壤物理特征,结合植被指标拟合探讨高寒草甸“固—液—气”三相的最佳组成比例。结果表明:植被盖度、草层高度和地上生物量均随海拔升高呈先升高后降低,在海拔 3 200 m 处达最大值,同一海拔的阴坡植被盖度、草层高度、地上生物量均高于阳坡;土壤容重随海拔和坡向的变化规律与植被盖度相反,而土壤含水量、孔隙度和持水性变化规律与植被盖度类似;经方程拟合发现,土壤“固—液—气”三相比例为 31 : 33 : 36 时,高寒草甸生产力最优。综上所述,在海拔 3 200 m 处是东祁连山高寒草甸分布的典型区域,海拔和坡向是影响高寒草甸土壤物理质量和“固—液—气”三相组成的重要环境因子,且该区域高寒草甸土壤“固—液—气”最佳比例为 31 : 33 : 36。

**关键词:**东祁连山;高寒草甸;海拔;坡向;土壤“固—液—气”三相组成

**中图分类号:**S154.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2022)03-0195-06

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.028

## Response of Three-Phase Composition of Soil “Solid-Liquid-Gas” to Altitude and Slope Aspects in Alpine Meadow of the Eastern Qilian Mountains

LI Qiang<sup>1</sup>, HE Guoxing<sup>1</sup>, LIU Zhigang<sup>1</sup>, GUAN Wenhao<sup>1</sup>, QIAO Huanhuan<sup>1</sup>,  
ZHANG Degang<sup>1</sup>, HAN Tianhu<sup>2</sup>, SUN Bin<sup>2</sup>, PAN Donrong<sup>2</sup>, LIU Xiaoni<sup>1</sup>

(1.College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem of the Ministry of Education, Gansu Grassland Engineering Laboratory, Sino American Research Center of Grassland Animal Husbandry Sustainable Development, Lanzhou 730070; 2.Grassland Technology Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730000)

**Abstract:** In order to explore the variation characteristics of the three phase composition of soil “solid-liquid-gas” in alpine meadow at different altitudes and slope aspects, the alpine meadow in eastern Qilian Mountain was taken as the research object, and the vegetation characteristics and soil physical characteristics of alpine meadow at the different altitudes (2 800, 3 000, 3 200, 3 400, 3 600, 3 800 and 4 000 m) and aspects (sun slope, shady slope) were analyzed. Combined with vegetation index fitting, the optimal composition ratio of the “solid-liquid-gas” three phase of alpine meadow was explored. The results showed that the vegetation coverage, grass layer height and aboveground biomass increased first and then decreased with the increasing of altitude, and reached the maximum at 3 200 m. At the same altitude, the vegetation coverage, grass layer height and aboveground biomass on the shady slope were higher than those on the sunny slope. The variation law of soil bulk density with altitude and slope aspect was opposite to that of vegetation coverage, while the variation laws of soil water content, porosity and water holding capacity were similar to that of vegetation coverage. After equation fitting, the productivity of the alpine meadow was the best when the soil “solid-liquid-gas” three phase ratio was 31 : 33 : 36. In conclusion, 3 200 m was the central typical area of the distribution of alpine meadow in the eastern Qilian Mountains. The altitude and slope aspect were important envi-

收稿日期:2021-10-08

资助项目:甘肃省草原技术推广总站重点项目(XZ20191225);甘肃省农业财政项目(201647);甘肃省林业与草原局重点项目(GSLC-2020-5)

第一作者:李强(1990—),男,在读博士研究生,主要从事草地资源与生态研究。E-mail:1245524440@qq.com

通信作者:柳小妮(1969—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事草地资源与生态研究。E-mail:liuxn@gsau.edu.cn

ronmental factors affecting the soil physical quality of the alpine meadow and the “solid-liquid-gas” three-phase composition. The optimum ratio of “solid-liquid-gas” in meadow soil in this area was 31 : 33 : 36.

**Keywords:** eastern Qilian Mountains; alpine meadow; altitude; slope aspect; three-phase composition of soil “solid-liquid-gas”

海拔和坡向是山地生态系统中重要的地形因子，因其对水热资源的再分派影响着植物和土壤理化性质的分布格局<sup>[1]</sup>。土壤物理质量是化学质量和生物学质量的基础<sup>[2]</sup>，主要包括土壤容重、土壤孔隙度、土壤水分等，即土壤的“固—液—气”三相，土壤容重可以评估土壤的紧实度，土壤孔隙分布能够影响土壤通气和水分渗透能力，土壤水分是植物生长关键生态因子<sup>[3]</sup>。因此，了解地形因子变化过程中土壤的“固—液—气”三相组成的变化规律，对评价土壤质量和改善土壤物理结构具有重要的生态学意义。

祁连山位于青藏高原的东部边缘，与蒙古高原和黄土高原相邻，是我国西北重要的生态安全屏障，也是全球气候变化最敏感和生态脆弱区之一<sup>〔4-5〕</sup>。高寒草甸是祁连山的主要草地类型之一，是高寒区主要的畜牧业生产基地，对草地畜牧业发展具有重要的意义，而且对祁连山地区的生态系统的稳定性起着举足轻重的作用<sup>〔6〕</sup>。目前，针对东祁连山高寒草甸开展了大量的科学研究<sup>〔7-12〕</sup>，但关于高寒草甸土壤“固—液—气”三相组成未见报道。探究在海拔和坡向变化的过程中，高寒草甸植被特征和土壤物理结构的变化特征对高寒草地的合理管理具有重要意义。因此，本

研究以东祁连山高寒草甸为研究对象，通过分析不同海拔和坡向下土壤“固—液—气”三相组成关系特征及其与植被特征之间的关系，确定高寒草甸土壤的最佳土壤“固—液—气”三相组成，以期为高寒草甸的合理管理和生态保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于甘肃省东祁连山金强河流域(102°26′31″—102°55′01″E, 37°07′23″—37°17′53″N)。该区域海拔 2 800~4 300 m, 年均气温 -0.1~0.6 ℃, 全年≥0 ℃的积温为 1 360 ℃, 年均降水量 446 mm, 降雨主要集中在 7—9 月, 年均蒸发量 1 483~1 614 mm, 气候寒冷潮湿, 水热同期, 平均相对湿度 55%, 年日照时间 2 600 h。草地类型为高寒草甸类, 土壤类型为亚高山草甸土、山地黑钙土、山地草甸土, 土壤含水量 50%~80%, 土壤 pH 为 6.94~8.17。

### 1.2 样地设置和样品采集

2020 年 7—8 月, 在东祁连山金强河流域选取 7 个不同海拔(2 800, 3 000, 3 200, 3 400, 3 600, 3 800, 4 000 m), 同一海拔设置 2 个不同坡向(阳坡、阴坡)样地, 每个样地选取 3 个 10 m×10 m 的采样区域(表 1)。

表 1 不同海拔和坡向高寒草甸样地基本情况

| 海拔/m | 坡向 | 地理坐标                    | 优势植物                                                                                                                             | 植被盖度/% |
|------|----|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 2800 | 阳坡 | 102°54′39″E, 37°08′48″N | 狗娃花( <i>Heteropappus hispidus</i> (Thunb.) Less.)、线叶嵩草( <i>Kobresiacapillifolia</i> Clarke)、冷蒿( <i>Artemisia frigida</i> Willd.) | 40~45  |
|      | 阴坡 | 102°55′01″E, 37°07′23″N | 线叶嵩草、萎陵菜( <i>Potentilla spp</i> L.)、蒾蓄豆( <i>Ruthenian Medic</i> L.)                                                              | 60~65  |
| 3000 | 阳坡 | 102°46′59″E, 37°12′36″N | 线叶嵩草、甘肃棘豆( <i>Oxytropis kansuensis</i> L.)、冷蒿                                                                                    | 65~70  |
|      | 阴坡 | 102°48′20″E, 37°10′14″N | 珠芽蓼( <i>Polygonum viviparum</i> L.)、线叶嵩草、甘肃棘豆( <i>Oxytropis kansuensis</i> L.)                                                   | 80~85  |
| 3200 | 阳坡 | 102°44′39″E, 37°13′39″N | 线叶嵩草、蒾蓄豆( <i>Melissilus ruthenicus</i> L.)、黄花蒿( <i>Artemisia annua</i> Linn.)                                                    | 75~80  |
|      | 阴坡 | 102°43′59″E, 37°11′26″N | 珠芽蓼、线叶嵩草、蒾蓄豆                                                                                                                     | 90~95  |
| 3400 | 阳坡 | 102°31′42″E, 37°15′54″N | 线叶嵩草、珠芽蓼、蒾蓄豆                                                                                                                     | 70~75  |
|      | 阴坡 | 102°37′35″E, 37°13′09″N | 线叶嵩草、草地早熟禾( <i>Poa annua</i> L.)、珠芽蓼                                                                                             | 75~80  |
| 3600 | 阳坡 | 102°27′44″E, 37°16′47″N | 珠芽蓼、萎陵菜、香青( <i>Anaphalis lactea</i> L.)                                                                                          | 65~70  |
|      | 阴坡 | 102°34′38″E, 37°13′03″N | 矮生嵩草( <i>Kobresia humilus</i> L.)、萎陵菜、珠芽蓼                                                                                        | 75~75  |
| 3800 | 阳坡 | 102°25′52″E, 37°17′38″N | 矮生嵩草、珠芽蓼、凤毛菊( <i>Saussurea spp</i> L.)                                                                                           | 55~60  |
|      | 阴坡 | 102°32′45″E, 37°12′57″N | 矮生嵩草、萎陵菜、珠芽蓼                                                                                                                     | 60~65  |
| 4000 | 阳坡 | 102°26′30″E, 37°17′54″N | 红景天( <i>Rhodiolarosea</i> Limn.)、矮生嵩草                                                                                            | 20~25  |
|      | 阴坡 | 102°32′18″E, 37°06′07″N | 红景天、矮生嵩草                                                                                                                         | 15~20  |

每个采样区域按对角线设 3 个 50 cm×50 cm 的样方, 即 3 个重复。测定每个样方中植被的草层高度

(cm)、总盖度(%)及不同种植物的高度和分盖度, 然后分种采集地上生物量(齐地面刈割, 放入样品袋

中),称鲜重后,带回实验室于 105 ℃ 烘箱中杀青 2 h 后,60 ℃ 下恒重,称重。草样刈割后,采集表层 0—30 cm 土样,取 2 份土壤样品,一份用环刀取土壤样品测定土壤容重、含水量和孔隙度,另一份测定土壤养分。

1.3 土壤物理性质

土壤容重和含水率测定:采集原状土带回实验室,称重(鲜土+环刀重)为  $M_1$ ,放置在烘箱,105 ℃ 烘至恒重,称重(干土+环刀)为  $M_2$ ,将干土去掉环刀称重为  $M_3$ <sup>[13]</sup>。土壤容重和土壤含水量计算公式为:

$$\text{土壤容重 (g/cm}^3\text{)} = (M_2 - M_3) / 100 \tag{1}$$
$$\text{土壤含水量 (\%)} = (M_1 - M_2) / (M_2 - M_3) \times 100 \% \tag{2}$$

土壤毛管持水量、饱和持水量和田间持水量测定:参照《土壤物理性质测定方法》<sup>[13]</sup>,采集原状土带回实验室,将环刀有孔的一端垂直向下,放置在一铁盘(铁盘深度为 8~10 cm)中,向铁盘中缓慢加入蒸馏水,使蒸馏水缓慢的上升至环刀上沿,浸泡 12 h,浸泡过程中补加蒸馏水,称重( $M_4$ )测定为土壤饱和含水量;然后,将环刀(环刀方向不能倒转)转移至平铺的干砂砂盘上,放置 2 h,称重( $M_5$ )测定为毛管持水量;然后继续放置 24 h,称重( $M_6$ )测定为田间持水量;最后,将环刀转移至烘箱,105 ℃ 烘至恒重,称重( $M_7$ ),将干土去掉环刀称重( $M_8$ )。计算公式为:

$$\text{饱和持水量 (\%)} = (M_4 - M_7) / (M_7 - M_8) \times 100 \% \tag{3}$$
$$\text{毛管持水量 (\%)} = (M_5 - M_7) / (M_7 - M_8) \times 100 \% \tag{4}$$
$$\text{田间持水量 (\%)} = (M_6 - M_7) / (M_7 - M_8) \times 100 \% \tag{5}$$

土壤孔隙度计算公式为:

表 2 不同海拔和坡向下高寒草甸植被特征

| 海拔/m  | 植被盖度/%       |               | 草层高度/cm      |              | 地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> ) |                |
|-------|--------------|---------------|--------------|--------------|----------------------------|----------------|
|       | 阳坡           | 阴坡            | 阳坡           | 阴坡           | 阳坡                         | 阴坡             |
| 2800  | 46.67±2.89Bd | 66.67±2.89Ad  | 7.07±0.57Bc  | 8.11±0.57Ac  | 106.67±14.10Bc             | 142.13±18.11Ac |
| 3000  | 70.00±2.89Bb | 83.33±5.00Ab  | 8.95±0.51Ab  | 9.88±0.76Ab  | 186.67±13.28Bb             | 219.47±15.56Ab |
| 3200  | 80.00±5.00Ba | 96.67±2.89Aa  | 11.19±0.48Ba | 13.04±0.56Aa | 214.13±21.09Ba             | 307.60±32.56Aa |
| 3400  | 73.33±2.89Bb | 80.00±2.89Abc | 7.40±0.25Bc  | 9.70±0.49Ab  | 177.47±13.86Bb             | 200.27±14.62Ab |
| 3600  | 70.00±5.00Ab | 75.00±2.89Ac  | 5.40±0.59Bd  | 7.77±0.51Ac  | 113.74±9.23Bc              | 150.80±7.08Ac  |
| 3800  | 60.00±2.89Ac | 65.00±2.89Ad  | 4.68±0.19Be  | 6.96±1.06Ac  | 70.14±8.52Ad               | 78.937±15.60Ad |
| 4000  | 25.00±5.00Ae | 20.00±1.15Ae  | 3.66±0.08Bf  | 4.06±0.48Ad  | 56.14±21.53Ad              | 66.00±17.21Ad  |
| 海拔×坡向 | *            |               | NS           |              | *                          |                |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一坡向不同海拔间差异显著( $P<0.05$ );同行不同大写字母表示同一海拔不同坡向间差异显著( $P<0.05$ );NS表示无显著差异;\*和\*\*分别表示  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平差异显著。下同。

2.2 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤物理性质

由图 1 可知,随着海拔梯度的升高,土壤容重呈先降低后升高,阳坡和阴坡均在海拔 3 200 m 处达最大值(0.68,0.66 g/cm<sup>3</sup>);同一海拔梯度上,阴坡土壤

$$\text{非毛管孔隙度} = (\text{饱和持水量} - \text{毛管持水量}) \times \text{土壤容重} \tag{6}$$

$$\text{毛管孔隙度} = \text{毛管持水量} \times \text{土壤容重} \tag{7}$$

$$\text{总孔隙度} = \text{非毛管孔隙度} + \text{毛管孔隙度} \tag{8}$$

土壤“固—液—气”三相的计算:本文土壤“固—液—气”三相组成为体积比例,计算参考《土壤物理性质测定方法》<sup>[13]</sup>。计算公式为:

$$V_{\text{气相}} = (M_4 - M_1) / \rho_{\text{水}} \tag{9}$$

$$V_{\text{液相}} = (M_1 - M_2) / \rho_{\text{水}} \tag{10}$$

$$V_{\text{固相}} = 100 - V_{\text{气相}} - V_{\text{液相}} \tag{11}$$

式中: $\rho_{\text{水}}=1\text{ g/cm}^3$ 。

植被重要值(IV)计算公式<sup>[10]</sup>为:

$$IV = (A + B + C) / 3 \tag{12}$$

式中:IV 为重要值;A 为物种相对高度;B 为物种相对盖度;C 为物种相对生物量。

1.4 数据处理

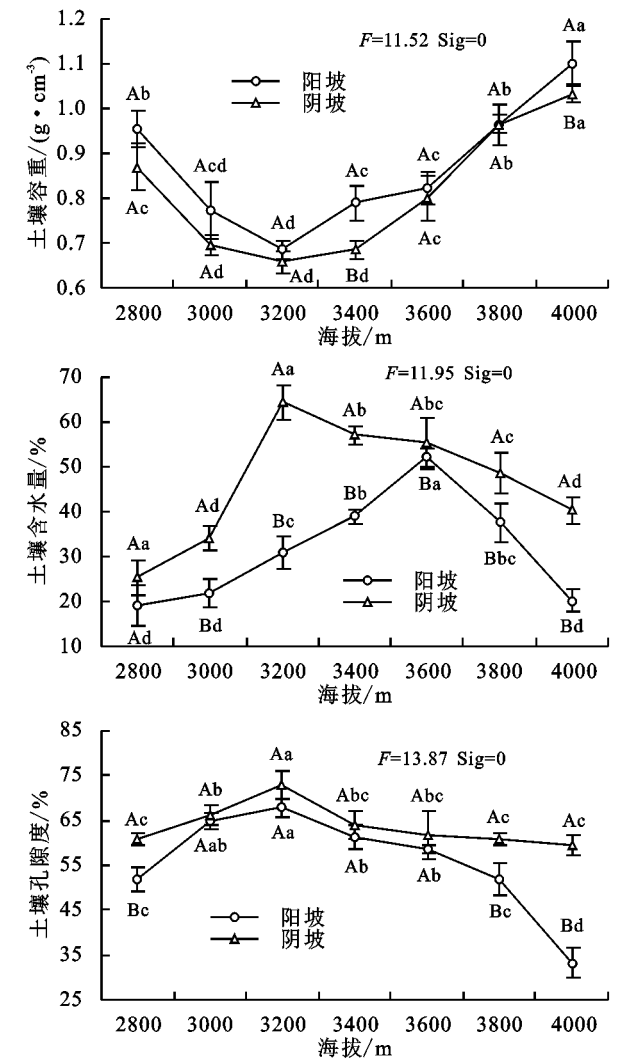
采用 Excel 2007 软件进行数据整理和绘图。在 SPSS 21.0 软件中用单因素方差分析和交互效应分析。相关性分析使用 SPSS 21.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同海拔和坡向下高寒草甸植被特征

由表 2 可知,随着海拔升高,植被盖度先升高后降低,阳坡和阴坡均在海拔 3 200 m 处达最大值(80.00%,96.67%);同一海拔,除了海拔 4 000 m 外,阴坡植被盖度均高于阳坡,且随着海拔升高,阴坡与阳坡植被盖度之间差异逐渐减小,海拔 2 800,3 000,3 200,3 400 m 的阴坡与阳坡植被总盖度之间差异显著( $P<0.05$ )。高寒草甸草层高度和地上生物量变化规律与植被盖度类似。

低,阳坡在海拔 3 600 m 处达最大值(52.18%),而阴坡在海拔 3 200 m 处达最大值(64.36%)。同一海拔,阴坡土壤含水量均高于阳坡,除海拔 3 600 m 外,其他海拔梯度阴坡与阳坡之间差异显著( $P<0.05$ )。土壤总孔隙度的变化规律与土壤含水量基本类似。



注:不同小写字母表示同一坡向不同海拔间差异显著( $P<0.05$ );  
不同大写字母表示同一海拔不同坡向间差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤物理性质

表 3 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤的持水特征

| 海拔/m  | 饱和持水量/%       |               | 毛管持水量/%       |               | 田间持水量/%      |              |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
|       | 阳坡            | 阴坡            | 阳坡            | 阴坡            | 阳坡           | 阴坡           |
| 2800  | 55.25±6.52Bc  | 72.39±5.52Ad  | 48.67±5.94Bc  | 65.34±5.05Ad  | 45.07±5.01Bd | 63.58±4.63Ac |
| 3000  | 84.13±7.21Bab | 104.67±6.46Ab | 77.37±5.04Bab | 90.17±5.34Ab  | 73.10±4.29Ba | 80.86±4.82Ab |
| 3200  | 96.12±7.03Ba  | 116.11±6.65Aa | 88.56±6.35Ba  | 101.34±3.54Aa | 81.25±5.24Ba | 95.87±6.52Aa |
| 3400  | 82.32±5.37Bb  | 99.95±3.62Ab  | 78.69±6.80Bab | 93.57±3.15Ab  | 68.73±2.78Bb | 77.47±3.44Ab |
| 3600  | 72.28±5.42Bb  | 82.95±4.21Ac  | 68.47±5.33Ab  | 75.81±4.41Ac  | 61.96±3.22Ac | 68.92±4.77Ac |
| 3800  | 45.88±7.68Ac  | 59.79±7.60Ae  | 41.26±5.33Bc  | 56.68±6.64Ae  | 33.94±4.43Be | 51.75±6.16Ad |
| 4000  | 35.06±4.12Bd  | 54.51±6.74Ae  | 32.97±4.22Bd  | 50.52±5.47Ae  | 26.14±4.04Be | 47.50±3.63Ae |
| 海拔×坡向 | NS            |               | NS            |               | NS           |              |

随着海拔的升高,除海拔 4 000 m 外,阳坡和阴坡土壤气相比比例均先升高后降低,阳坡和阴坡土壤气相

2.3 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤持水性特征

随着海拔的升高,土壤饱和持水量先升高后降低,阳坡和阴坡在海拔 3 200 m 处达最大(96.12%, 116.11%);同一海拔梯度上,阴坡土壤饱和持水量均高于阳坡,除海拔 3 800 m 梯度外,其他海拔梯度阴坡与阳坡土壤饱和持水量之间均差异显著( $P<0.05$ )。土壤毛管持水量和田间持水量的变化规律与土壤饱和持水量变化基本类似(表 3)。

2.4 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤“固—液—气”三相组成

土壤“固—液—气”三相变化组成对了解土壤物理性质具有重要的意义。由图 2 可知,随着海拔梯度的升高,阳坡和阴坡土壤固相比比例均呈先降低后升高的变化趋势,阴坡和阳坡的固相比比例均在海拔 3 200 m 处达最小值(34.21%, 23.52%),阳坡和阴坡土壤固相比比例依次为 4 000 m>3 800 m>2 800 m>3 600 m>3 400 m>3 000 m>3 200 m;同一海拔,阴坡土壤固相比比例均明显低于阳坡,就不同坡向而言,阳坡和阴坡土壤固相比比例依次为 39.13% 和 34.13%。

随着海拔梯度的升高,除海拔 3 600 m 阴坡处理外,阳坡和阴坡土壤液相比比例均呈升高后降低的变化趋势,阳坡土壤液相比比例在海拔 3 600 m 达最大值(42.92%),而阴坡土壤液相比比例在海拔 3 800 m 处达最大(46.92%),阳坡土壤液相比比例依次为 3 600 m>3 800 m>3 400 m>4 000 m>3 200 m>2 800 m>3 000 m,阴坡土壤液相比比例依次为 3 800 m>3 600 m>3 200 m>4 000 m>3 400 m>3 000 m>2 800 m;同一海拔,海拔 3 600 m 以下阳坡土壤液相比比例低于阴坡,而海拔 3 600 m 以上阳坡土壤液相比比例高于阴坡,就不同坡向而言,阳坡和阴坡土壤液相比比例依次为 32.04%和 37.15%。

比例均在海拔 3 000 m 达最大(48.12%, 49.15%),阳坡土壤气相比比例依次为 3 000 m>3 200 m>2 800 m>

3 400 m>3 600 m>4 000 m>3 800 m,阴坡土壤气相比例依次为 3 000 m>2 800 m>3 200 m>3 400 m>3 600 m>4 000 m>3 800 m;同一海拔,海拔 3 200,

3 400,3 600 m 阳坡土壤气相比例高于阴坡,其他海拔处理阳坡土壤气相比例低于阴坡,就不同坡向而言,阳坡和阴坡土壤气相比例依次为 28.82%和 28.72%。

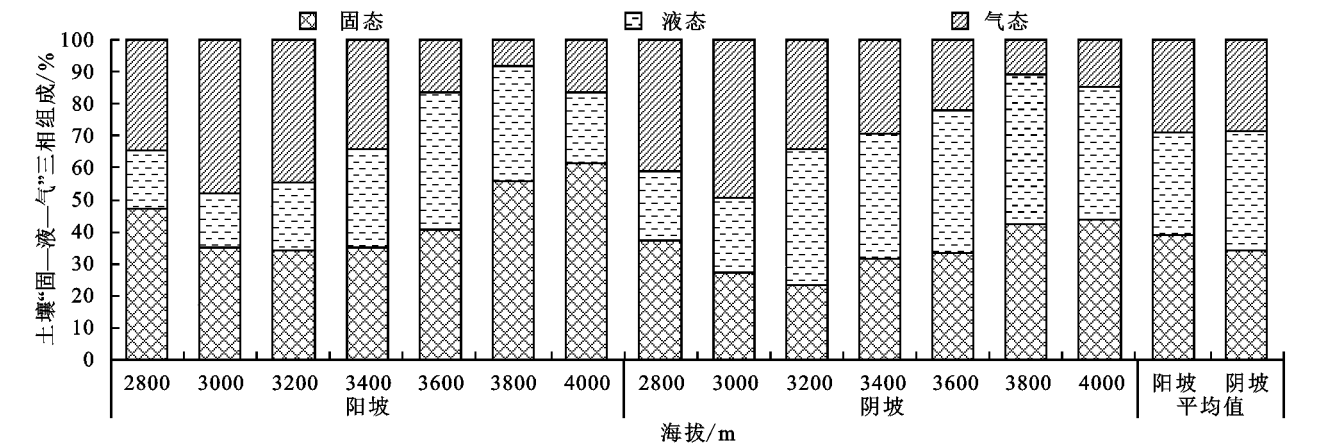


图2 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤“固—液—气”三相组成关系

2.5 高寒草甸土壤最佳“固—液—气”三相比例

为寻求高寒草甸土壤最佳“固—液—气”三相比例,以高寒草甸植被重要值 IV 为自变量,以“固—液—气”三相比例值为因变量进行拟合分析。由图 3 可知,随着植被重要值 IV 增大,“固—液—气”3 个拟合方程相交形成一个闭合区域,即为高寒草甸植物生长土壤最适“固—液—气”三相比例范围。经拟合方程分解结果可知,土壤固相比例为 27.18%~34.88%,土壤液相比例为 28.51%~38.08%,土壤气相比例为 35.23%~44.69%。综上,高寒草甸土壤“固—液—气”三相的最佳比例为 31.03 : 33.30 : 35.67,约为 31 : 33 : 36。

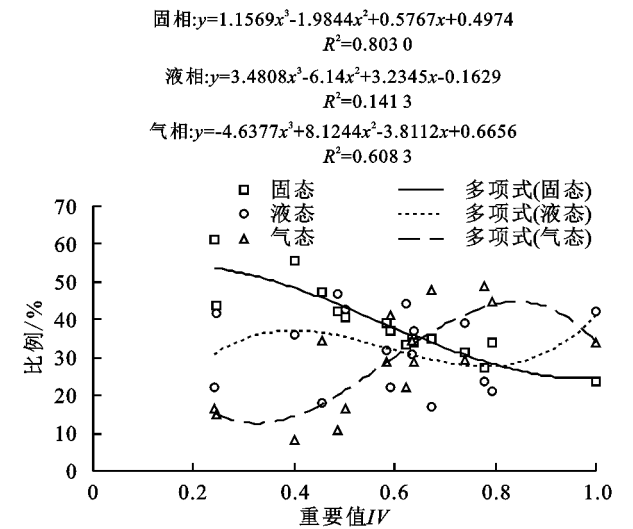


图3 高寒草甸土壤“固—液—气”三相组成与植被重要值的关系

3 讨论

3.1 植被特征

草地植被特征是草地生产、生态稳定性调控研究的基础<sup>[14]</sup>。海拔是影响高寒草甸植物分布和生长的重要因子,而海拔变化导致水热条件的改变,进而影

响植物群落结构组成差异<sup>[16]</sup>。同一海拔,坡向对水热条件进行二次分配,进一步细化了植物群落的异质性分布。金章利等<sup>[16]</sup>研究发现,不同海拔草地植被总盖度、草层高度、地上生物量和地下生物量连续 3 年均呈现中海拔>低海拔>高海拔;王彦龙等<sup>[17]</sup>研究表明,长江源区高寒草甸地上生物量呈现阴坡大于阳坡的变化趋势。本研究发现,随着海拔的升高,植被总盖度、草层高度、地上生物量先升高后降低,均在海拔 3 200 m 处达最大;同一海拔,植被盖度、草层高度、地上生物量基本呈阴坡高于阳坡,这与 Busch 等<sup>[15]</sup>研究结果一致。即海拔 3 200 m 为东祁连山高寒草甸的典型和中心分布生长区。随着海拔的升高,阴坡与阳坡的植被盖度、草层高度、地上生物量差异逐渐减少,这是由于随着海拔的升高,坡向对水热再分派减弱的缘故。植被重要值 IV 是对植被高度、盖度和地上生物量的综合,其随海拔和坡向的变化规律与植被盖度类似。

3.2 土壤物理性质

土壤的物理性质不仅是衡量土壤肥力的重要指标<sup>[18]</sup>,而且还是土壤质量评价的基础<sup>[19]</sup>。海拔和坡向能够通过改变环境因子(气温、年降雨量、年积温、植被群落组成)促使土壤形状发生变化<sup>[18]</sup>。刘西刚等<sup>[18]</sup>研究发现,土壤容重、饱和含水率、自然含水率、孔隙度均随海拔升高先升高后降低,而土壤容重随海拔升高逐渐降低;吕宸等<sup>[12]</sup>研究发现,半阴坡土壤容重大于半阳坡,土壤总孔隙度、自然贮水量、最大持水量、毛管持水量和最小持水量与土壤容重相反。本研究发现,土壤容重随海拔的升高先降低后升高,含水量、总孔隙度、持水性均先升高后降低;同一海拔,阴坡土壤容重均低于阳坡,阴坡土壤含水量、总孔隙、持

水性度高于阳坡,这与 Javid 等<sup>[20]</sup> 研究结果类似。由于研究区高寒草甸主要分布在 2 800~4 000 m,随着海拔的升高,草地植被盖度增加,同时,气温下降,潜在蒸发量减少,冰雪融化进一步促使土壤含水量上升,草地植被根系活性增强,土壤容重降低而总孔隙度增加,良性循环促进了土壤持水性的增加;当海拔超过 3 400 m 后,低气温不利于植物的生长,冰雪融化水较少,土壤水分逐渐下降,导致植被盖度下降和植物根系活力减缓,促使土壤孔隙度减小而容重增大,同时土壤的持水性变差<sup>[21]</sup>。同一海拔,阳坡接收到的太阳辐射显著高于阴坡,而太阳辐射是决定土壤蒸发、温度、碳和氮循环的主要因素<sup>[22-23]</sup>。

### 3.3 土壤“固—液—气”三相组成

土壤“固—液—气”三相比例的变化,对揭示土壤水、肥、气的关系、土壤肥力及土壤的形成和发生学具有重要的生态学意义<sup>[24-25]</sup>。在土壤物理结构中,合理的土壤“固—液—气”三相组成是植物生长发育的关键和基础。若土壤固相过高,则土壤紧实不利于养分循环和微生物活动,若土壤固相过低,则土壤疏松无法固定植物生长;土壤液相即水分含量是植物生长和养分吸收循环的动力所在,土壤气相的高低决定土壤微生物和酶活性<sup>[25]</sup>。因此,合理的土壤“固—液—气”三相组成是植物生长发育及其草地生产力高低的基础。本研究发现,随着海拔的升高,土壤固相比比例均呈先降低后升高,液相和气相比比例均升高后降低;同一海拔,阴坡土壤固相比比例均明显低于阳坡,海拔 3 600 m 以下阳坡土壤液相比比例低于阴坡,海拔 3 200~3 600 m 阳坡土壤气相比比例高于阴坡。由于海拔和坡向的变化导致太阳辐射量和蒸腾速率的差异,导致土壤水分变化改变了土壤液相的组成比例,进一步改变土壤固相和气相的比例。因此,在高寒草甸山地生态系统中,海拔和坡向等地形因子通过影响土壤水热,影响着土壤“固—液—气”三相组成,同时,不同水热条件下的植被盖度和草层高度的差异性进一步影响着土壤“固—液—气”三相组成,即土壤“固—液—气”三相组成不仅仅受海拔和坡向等地形因子的影响,还受植被盖度和草层高度的影响。本研究将植被特征的重要值与土壤“固—液—气”三相比例进行拟合分析发现,高寒草甸土壤“固—液—气”三相比例的最适值应接近于 31 : 33 : 36,此比例的高寒草甸草地植被特征较好。

## 4 结论

本研究发现,东祁连山高寒草甸植被特征和土壤物理性质随着地形因子海拔和坡向的演变成规律性

变化,在海拔 3 200 m 处是东祁连山高寒草甸分布的中心典型区域,且该区域土壤“固—液—气”最佳比例为 31 : 33 : 36,而海拔和坡向是影响高寒草甸土壤物理质量和“固—液—气”三相组成的主要环境因子。

### 参考文献:

- [1] 李慧,高志强,薛建福.夏闲期耕作对旱地麦田土壤物理质量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2018,38(2):15-21.
- [2] 祁泽伟,张慧苹,李娜娜,等.不同秋耕措施对黄土高原春玉米田土壤物理质量的影响[J].土壤,2021,53(4):826-832.
- [3] 刘玉祯,刘文亨,董全民,等.坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响[J].草地学报,2021,29(6):1166-1173.
- [4] 李强,柳小妮,张德昱,等.祁连山自然保护区不同草地类型地上生物量和土壤微量元素特征分析[J].草原与草坪,2021,41(3):48-56.
- [5] Li Q, Yang J Y, Liu X N, et al. Soil fertility evaluation and spatial distribution of grasslands in Qilian Mountains Nature Reserve of eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J].Peer J,2021(9):e10986.
- [6] Fang Y P, Zhao C, Ding Y J, et al. Impacts of snow disaster on meat production and adaptation: An empirical analysis in the yellow river source region [J].Sustainability Science,2016,11(2):249-260.
- [7] 张玉琪,吴玉鑫,李强,等.东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤氮素与团聚体特征及关系研究[J].草地学报,2021,29(10):2286-2293.
- [8] 李红琴,吴夏璐,张法伟,等.高寒草甸冬季牧场土壤持水能力对草地封育的响应[J].中国草地学报,2021,43(8):1-8.
- [9] 马海霞.不同利用方式和坡位变化对高寒草甸保水固土的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
- [10] 孟泽昕.不同海拔高度青藏高原高寒草地生态系统多功能性评估[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [11] 申新山,魏志玲,向宇宸,等.不同海拔梯度高寒草甸土基本理化指标及氮素的变化动态[J].中国水土保持,2020(10):57-59.
- [12] 吕宸,龚伟,车明轩,等.海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):219-225,243.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1987.
- [14] Chen H Y H, Biswas S R, Sobey T M, et al. Reclamation strategies for mined forest soils and overstory drive under story vegetation [J].Journal of Applied Ecology,2018,55(2):926-936.

- [9] 兰献敏,冉海燕,陈仕红,等.贵州甘蓝田杂草种类调查[J].农技服务,2021,38(7):122-124,127.
- [10] 徐伟东,黎菊,陆强,等.浙北稻麦连作区水直播稻田杂草群落组成及多样性差异[J].生态与农村环境学报,2021,37(1):57-64.
- [11] Rakotomanga D, Lacoma M, Dorel M, et al. Cover crops combined with soil tillage impact the spontaneous species density, richness and diversity in banana cover cropping systems [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41(3): 1-11.
- [12] Roser R, Sans F X, Mayer J, et al. Long-term farming systems and last crop sown shape the species and functional composition of the arable weed seedbank [J]. *Applied Vegetation Science*, 2020, 23(3): 428-440.
- [13] Levins R. Evolution in changing environments: Some theoretical explorations [J]. *Monographs in Population Biology*, 1968, 19(7): 659-660.
- [14] 闫好原,许明,曾新德,等.石羊河下游裸果木群落生态位特征研究[J].西北林学院学报,2020,35(6):89-95.
- [15] 翁华,魏有海,郭良芝,等.青海省春麦田杂草种类组成及群落特征[J].作物杂志,2013(3):116-120.
- [16] 王虎琴,孙国俊,王哲明,等.茅山丘陵地区茶园秋季杂草种群生态位研究[J].蚕桑茶叶通讯,2016(3):22-26.
- [17] 邓贤兰,曹裕松,梁琴,等.井冈山山顶矮林乔木层优势种的生态位研究[J].植物资源与环境学报,2016, 25(1):88-93.
- [18] 李双建,王小武,付开赞,等.新疆玉米田间杂草组成及群落结构分析[J].杂草学报,2019,37(4):6-16.
- [19] 朱德煌,刘金福,洪伟,等.戴云山黄山松群落主要树种更新生态位研究[J].热带亚热带植物学报,2012, 20(6):561-565.
- [20] 董冬,许小天,周志翔,等.安徽九华山风景区古树群落主要种群生态位的动态变化[J].生态学杂志,2019, 38(5):1292-1304.
- [21] 李婷婷,容丽,王梦洁,等.黔中喀斯特次生林主要物种的生态位及种间联结性动态变化[J].热带亚热带植物学报,2021,29(1):9-19.
- [22] 尼玛曲珍,方江平,郑维列,等.西藏林芝地区油菜田杂草群落动态及生态位[J].生态学杂志,2015, 34(5): 134-138.
- (上接第 200 页)
- [15] Busch V, Klaus V H, Penone C, et al. Nutrient stoichiometry and land use rather than species richness determine plant functional diversity [J]. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(1): 601-616.
- [16] 金章利,刘高鹏,周明涛,等.喀斯特山地草地群落多样性海拔特征及土壤理化性质特征[J].生态环境学报, 2019, 28(4): 661-668.
- [17] 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.
- [18] 刘西刚,王勇辉,焦黎,等.夏尔希里自然保护区草地表层土壤理化性质与海拔高度的关系[J].生态与农村环境学报,2019, 35(6): 773-780.
- [19] 马国飞,满苏尔·沙比提,靳万贵.天山南坡台兰河上游草地土壤理化性质与海拔的关系研究[J].土壤通报,2017, 48(3): 597-603.
- [20] Javid A D, Sundarapandian S. Altitudinal variation of soil organic carbon stocks in temperate forests of Kashmir Himalayas, India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(2): e11.
- [21] Shamsheer A, Hussain I, Hussain S, et al. Effect of altitude on forest soil properties at Northern Karakoram [J]. *Eurasian Soil Science*, 2019, 52(10): 1159-1169.
- [22] Ai Z M, He L R, Xin Q, et al. Aspect affects the non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of *Artemisia sanctorum* on the Loess Plateau in China [J]. *Catena*, 2017, 152: 9-17.
- [23] Zhou X J, Ke T, Li S G, et al. Induced biological soil crusts and soil properties varied between aspect, aspect gradient and plant canopy in the Hobq desert of China [J]. *Catena*, 2020, 190: e104559.
- [24] 吴建国.高产麦田土壤固、液、气三相变化初步测定[J].河南农林科技,1981(1):9-11.
- [25] 牛钰杰.青藏高原东缘高寒草地裂缝分布、发生机理及生态学效应研究[D].兰州:甘肃农业大学,2020.