

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0153

郭连云.三江源区高寒草原土壤湿度变化特征及与气候因子的关系.草业科学,2018,35(1):46-53.

Guo L Y. Alpine grassland soil moisture variation characteristics and its relationship with climate factors in Three River Source. Pratacultural Science, 2018, 35(1): 46-53.

## 三江源区高寒草原土壤湿度变化 特征及与气候因子的关系

郭连云

(青海省共和县气象局, 青海 共和 813099)

**摘要:**利用青海省三江源区兴海县牧业气象站 1999—2016 年高寒草原土壤湿度、牧草生育期资料,分析了高寒草原土壤湿度的年、季变化特征以及牧草生长季不同生育期土壤湿度的变化特征及与气候因子的关系。结果表明:高寒草原 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 土壤湿度均随年际延长呈增加趋势,春季除 40—50 cm 土层外,其他各层土壤湿度均随年际延长呈显著增加趋势( $P < 0.05$ )。高寒草原牧草生长季的土壤相对湿度随年际延长呈显著上升趋势( $P < 0.05$ ),且与生长季降水量之间呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。随着气候变化,牧草抽穗、开花、成熟和枯黄期的土壤相对湿度随年际延长呈显著增加趋势( $P < 0.05$ )。牧草抽穗期、枯黄和全生育期的土壤湿度与气温呈显著负相关关系( $P < 0.05$ )。高寒草原牧草生长季土壤湿度的增加有利于草地植被生长。

**关键词:**高寒草原;土壤湿度;三江源;气候因子;相关性;变化特征;趋势分析

中图分类号:S812.2

文献标志码:A

文章编号:1001-0629(2018)01-0046-08\*

### Alpine grassland soil moisture variation characteristics and its relationship with climate factors in Three River Source

Guo Lian-yun

(Gonghe Meteorological Bureau in Qinghai, Gonghe 813099, Qinghai, China)

**Abstract:** The data supporting this study were collected during 1999—2016 from the pastureland weather station of Xinghai County, Qinghai Province, at the Three River Source. They included soil moisture content and herbage growth period. We analyzed the changes of alpine meadow soil moisture characteristics, the soil moisture change characteristics at different stages, and their relationship with the herbage growth period. The results showed that the soil moisture content in each layer increased from 0—50 cm in the alpine grassland, the soil moisture was significantly increased trend of each layer in spring 0 to 40 cm, the soil moisture increase rate decrease with the increase of soil depth. Soil moisture content during growing seasons increased significantly from 1999—2016, and it correlated significantly with precipitations during the growing seasons. At the flowering stages, soil moisture content was significantly positively correlated with atmospheric temperature. Moreover, at the heading stages and throughout the whole growing season, they were significantly negatively correlated with atmospheric temperatures. The increase of soil moisture content in alpine meadow growth season is beneficial for grassland vegetation growth.

**Key words:** alpine grassland; soil moisture content; Three River Source; climatic factor; relativity; variation character; trend analysis

**Corresponding author:** Guo Lian-yun E-mail: glycloud@126.com

\* 收稿日期:2017-03-30 接受日期:2017-12-11

通信作者:郭连云(1969-),男,青海湟源人,高级工程师,本科,主要从事应用气象工作。E-mail: glycloud@126.com

草地作为陆地的重要生态系统,是生态环境的基础,也是畜牧业发展的重要基础和牧民赖以生存的基本生产资料<sup>[1-3]</sup>。土壤水分是影响青藏高原高寒草地生态过程、生态承载能力以及退化草地恢复和重建的关键因素之一<sup>[4]</sup>,同时,土壤水分对植物的生长期发育和产量的形成有直接作用<sup>[5]</sup>。对青藏高原多年冻土区高寒草地地上生物量影响最大的因子是土壤含水量<sup>[6]</sup>。土壤水分是主要生态因子之一,是对气候因子变化最敏感的反应指标,对于某一特定的区域而言,土壤结构、地形、植被等自然因素在一定的时期、季节内是相对稳定的,而气候因子的变化彼此间并非始终一致,因而气象因子变化对土壤湿度波动起着决定性作用<sup>[7-9]</sup>。

众多研究<sup>[10-15]</sup>表明,干旱半干旱区自然降水是该区域土壤水分的主要补充源,自然降水的变化直接影响土壤水分的变化,从而影响植物水分利用策略,进而影响整个生态系统的结构和功能。地下生物量与土壤含水量有显著的正相关关系,在同样的温度条件下,土壤含水量是地下生物量的重要影响因素<sup>[16]</sup>;土层水分含量的好坏直接影响着植物的生长,而且间接影响植物分布并在一定程度上影响小气候的变化<sup>[17-18]</sup>。在旱作区土壤水分是作物所需水分的直接来源,是作物生长发育和产量形成的关键因素<sup>[19-21]</sup>。以往的研究大多集中在通过短期观测数据来揭示土壤水分的动态变化,本研究则侧重在利用长期观测的气象数据和土壤含水量数据来探讨高寒草原牧草生长季及各生育期间土壤湿度变化特征,同时研究高寒草原气候因子与土壤湿度之间的关系,以期揭示高寒草原土壤湿度变化规律,从而实现高寒草原土壤湿度的充分开发利用,为合理利用高寒草原土壤水资源及牧草的生产和决策提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄河上游“三江源”地区的兴海县,属于环湖牧区和青南牧区过渡的区域,99°01′—100°20′ E,34°48′—36°14′ N。全县总面积 121.86 万 hm<sup>2</sup>,平均海拔 4 300 m,全县地势西南高,东北低,境内地貌类型多样。草原面积 101.03 万 hm<sup>2</sup>,占全县总面积的 83%,可利用草地面积 93.6 万 hm<sup>2</sup>,占草地面积的 92.7%。气候具有显著的高原大陆性

气候特征,年平均气温 1.4 °C,气温极端最高 30.2 °C,极端最低 -31.5 °C,年降水量 353.2 mm,年日照时数 4 431.8 h,昼夜温差大,年平均大风日数 48.9 d,年平均沙尘暴日数 11.1 d,无霜期 44 d。草地类型为高寒草原天然草地,草本植物以西北针茅(*Stipa sareptana* var. *krylovii*),伴生冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、斜茎黄芪(*Astragalus adsurgens*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等,植被均匀,覆盖率在 60%以上。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置与资料来源** 样地位于兴海县子科滩镇高寒针茅草原,地理位置为 35°35′ N,99°59′ E,海拔 3 300 m,设立于 1999 年。样地面积为 50 m×50 m,每年 4 月至 9 月开始观测牧草发育并围栏封育禁牧,10 月至次年 3 月期间放牧。依据该草原优势牧草西北针茅的生长变化,按照中国气象局农业气象观测规范,观测牧草的返青、抽穗、开花、成熟、枯黄等 5 个生育期时间,在围栏草地牧草生长发育期取 4 个重复样方,每个样方面积 1 m×1 m,4—8 月份为牧草生长季节。选用兴海县农业气象观测站采集的 1999—2016 年 18 年土壤湿度资料,在春季土壤表层 0—10 cm 完全融化至土壤冻结深度≤10 cm 期间的每旬逢 8 日测定土壤湿度,采用土钻法分层取样,分别为 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm,共 5 个层次,各层均取 4 个重复,每层重复取样 4 次,然后用烘干法(105 °C)烘干称重,取其平均值为该层的土壤水分含量。测定方法是在天然牧草固定观测地段,从 4 月 8 日开始测定水分,测定时间间隔为 10 d,最后一次为 10 月 28 日,共测定 7 个月,采集 21 次。从距样地 2.5 km 处的兴海国家基准气候站获取同期的气温、降水、日照时数等观测资料。土壤相对湿度为土壤重量含水率占田间持水量的百分比。

土壤相对湿度 = [土壤重量含水率(%) / 田间持水率(%)] × 100%。

**1.2.2 计算分析方法** 采用线性气候倾向估计法<sup>[22]</sup>研究 1999—2016 年 18 年牧草生长季降水量及各生育期土壤相对湿度变化趋势。线性气候倾向估计法属于时间序列分析范畴,该方法是对资料的时间序列  $y(x)$ ,  $x=1, 2, 3, \dots, n$ , 以线性函数  $y(x) = a + bx$  来拟合,其中,  $a$  为常数,  $b$  为回归系数,用最小二乘法估计回归系数  $b$  和常数  $a$ 。其中  $b$  为气候倾

向率,单位为每年某要素单位。回归系数  $b$  的正负表示该资料序列随时间变化的方向,正值表示气象要素随时间变化有增多的趋势,负值则表示有减少的趋势。采用气候要素与年份的相关系数来确定变化是否显著。

利用相关分析法<sup>[23]</sup>计算牧草各生育和同期影响牧草生育期的土壤相对湿度及温度、降水和日照时数的相关系数,根据相关系数的大小,判断土壤相对湿度、温度、降水和日照时数等与牧草各生育期是否有明显相关关系。采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 进行数据整理、制图和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 高寒草地土壤湿度特征

**2.1.1 土壤湿度年变化特征** 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 土层土壤湿度均随年际呈增加趋势,且在 2009 年达到最高值(图 1)。最低值除 10—20、40—50 cm 分别出现在 2013、1999 年外,其余各层均出现在 2000 年。0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 各层土壤湿度最高值与最低值之差分别为 48.7%、34.6%、30.7%、26.8%、14.9%,可见随着土壤深度的增加其差值逐渐减少。0—50 cm 土壤湿度最高值与最低值的差值为

31.1%,变化幅度较大。18 年间 0—50 cm 土壤湿度总体呈现逐渐上升的变化趋势,将其变化趋势可以划分为两个阶段:第 1 阶段为 1999—2009 年,该阶段土壤湿度年均值在 62.3%~93.4% 之间波动,属于土壤湿度的较高阶段;第 2 阶段为 2000—2016 年,该阶段土壤湿度年均值在 67.6%~83.8% 之间波动,属于土壤湿度的较低阶段。各层土壤湿度的各阶段变化趋势和 0—50 cm 土壤湿度的基本一致。

高寒草原 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm 土层土壤湿度的气候倾向率分别为  $0.60\% \cdot \text{年}^{-1}$ 、 $0.55\% \cdot \text{年}^{-1}$ 、 $0.54\% \cdot \text{年}^{-1}$ 、 $0.33\% \cdot \text{年}^{-1}$  和  $0.00\% \cdot \text{年}^{-1}$ ,各土层土壤湿度与年份的相关系数分别为  $0.303 (P > 0.10)$ 、 $0.335 (P > 0.10)$ 、 $0.310 (P > 0.10)$ 、 $0.222 (P > 0.10)$  和  $0.003 (P > 0.10)$ ,随着土壤深度的增加,其气候倾向率逐渐减小,到 40—50 cm 时气候倾向率无增无减,变化平稳(表 1)。而 0—50 cm 整层土壤湿度则以每年  $0.40\%$  的气候倾向率增加,土壤湿度与年份的相关系数为  $0.287 (P > 0.10)$ ,但增加趋势小于 0—10、10—20 和 20—30 cm 土壤湿度。虽然各土层土壤湿度随年际延长均呈增加趋势,但增加趋势均未通过显著性检验,说明各层土壤湿度随年际延长增加的趋势不明显。

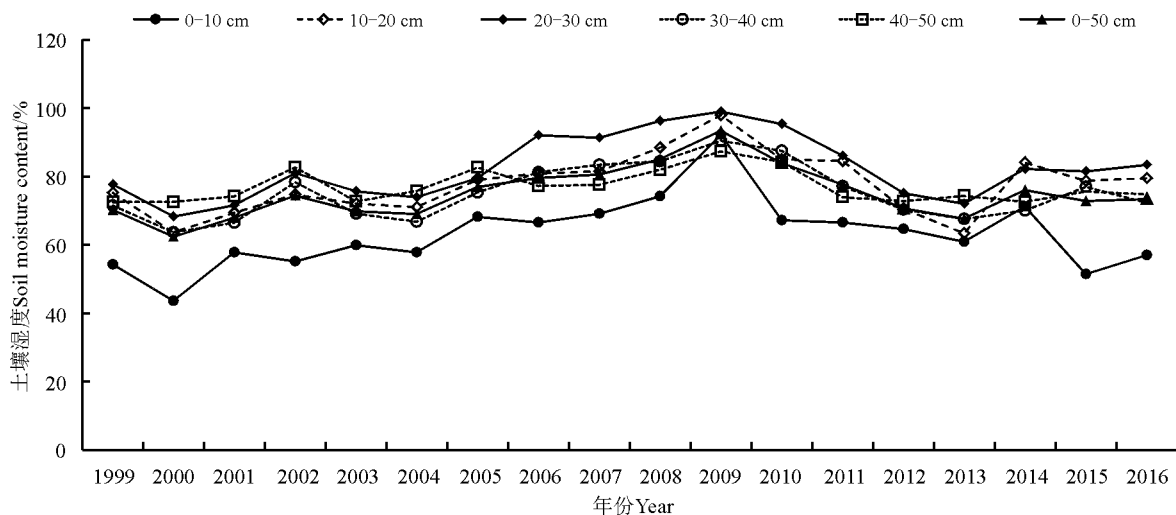


图 1 土壤湿度年变化趋势

Fig. 1 The annual trend of soil moisture content

**2.1.2 土壤湿度季节变化特征** 由于测定的是 3 月中旬至 11 月上旬解冻到封冻时段的土壤湿度,所以本研究只分析春、夏、秋季土壤湿度的变化。春季高寒草原 0—10、10—20、20—30、30—40 cm 各层土壤

湿度随年际延长均呈显著增加趋势,其气候倾向率在  $0.85\% \sim 1.21\% \cdot \text{年}^{-1}$ ,而 40—50 cm 土壤湿度的气候倾向率为  $0.46\% \cdot \text{年}^{-1} (P > 0.10)$ ,增加不显著(表 1)。春季土壤湿度与年变化一样随着土壤深度

的增加其气候倾向率总体呈逐渐减小趋势。而春季 0—50 cm 土壤湿度则以每年 0.88% 速率显著增加, 相关系数为 0.557 ( $P < 0.05$ )。

夏、秋两季中, 40—50 cm 土壤湿度均呈减少趋势, 但不显著 ( $P > 0.05$ ), 其中秋季的减少速度大于夏季。0—10、10—20、20—30、30—40 cm 各土层土壤湿度在夏、秋季均呈不显著的增加趋势, 其中各土层夏季的增加幅度表现为 0—10 > 20—30 > 10—20 > 30—40 cm; 秋季的增加幅度表现为 20—30 > 10—20 > 0—10 > 30—40 cm。

### 2.2 牧草生长季土壤相对湿度和降水量的变化趋势及相互关系

兴海高寒草原牧草全生育期 0—50 cm 土壤相对湿度和降水量随年际延长的线性变化趋势如图 2 所示, 可见兴海高寒草原牧草生长季土壤相对湿度

以每年 0.51% 的线性速率增加, 土壤相对湿度与年份的相关系数为 0.380 ( $P > 0.10$ )。牧草生长季土壤相对湿度多年平均值为 75%, 最小值为 62%, 最高值为 91%, 18 年中有 9 年高于多年平均值, 2004—2009 年土壤相对湿度增加最快, 2010 年开始又急剧下降, 2013 年以后土壤相对湿度又呈现出增加趋势。牧草生长季降水量则以每年 3.5 mm ( $P > 0.10$ ) 的线性趋势呈不显著的增加趋势。牧草生长季降水量波动变化较大, 多年平均值是 326.5 mm, 2000 年为最少年 (205.8 mm), 2005 年为最多年 (441.2 mm), 最多年与最少年之间相差 2.14 倍, 年际间差异显著 ( $P < 0.05$ )。牧草生长季土壤相对湿度和降水量的年变化均呈增加趋势, 二者之间极显著相关 ( $P < 0.01$ )。可见, 自然降水是近 18 年来影响兴海县高寒草原牧草生长季土壤干湿程度的主要因素。

表 1 春、夏、秋季和年土壤湿度的年气候倾向率及其与年份间的相关系数 ( $n = 18$ )

Table 1 The climate tendency rate and the correlation coefficient of the soil moisture content in spring, summer, autumn, and throughout the year

土层 Soil layer	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		年 Year	
	倾向率 Tendency rate/%	相关系数 Coefficient	倾向率 Tendency rate/%	相关系数 Coefficient	倾向率 Tendency rate/%	相关系数 Coefficient	倾向率 Tendency rate/%	相关系数 Coefficient
0—10 cm	1.21	0.541**	0.51	0.232	0.12	0.062	0.60	0.303
10—20 cm	0.95	0.569**	0.48	0.255	0.26	0.104	0.55	0.335
20—30 cm	0.85	0.462*	0.49	0.260	0.27	0.122	0.54	0.310
30—40 cm	0.91	0.546**	0.08	0.047	0.11	0.057	0.33	0.222
40—50 cm	0.46	0.340	-0.01	0.001	-0.46	0.328	0.00	0.003
0—50 cm	0.88	0.557**	0.20	0.149	0.07	0.037	0.40	0.287

\* 和 \*\* 分别表示  $P < 0.10$ 、 $P < 0.05$  显著水平。

\* and \*\* indicate significance at 0.10 and 0.05 level, respectively.

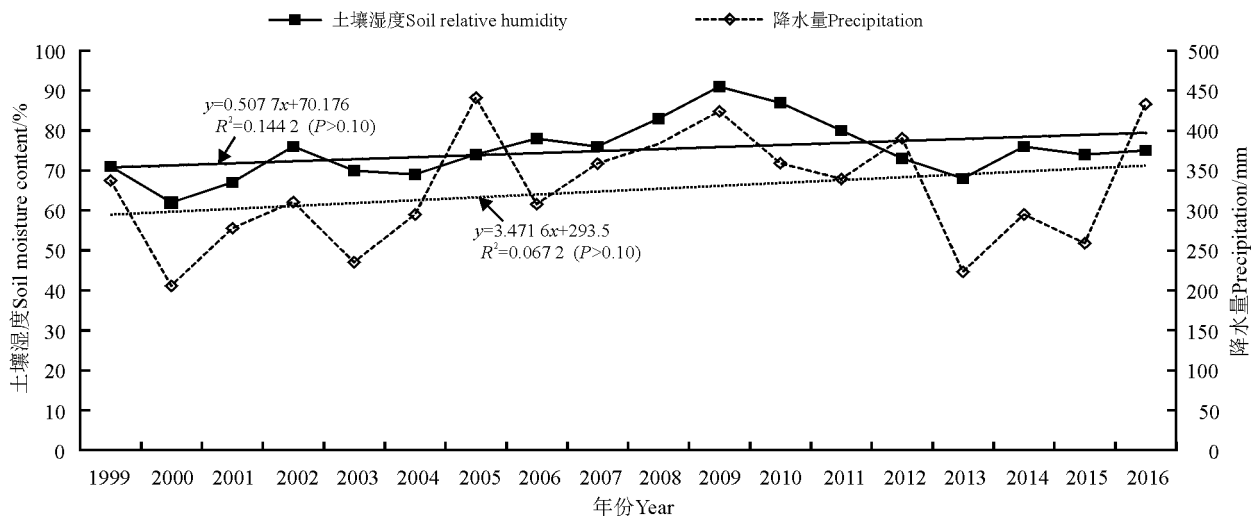


图 2 牧草全生育期土壤相对湿度和降水量的变化

Fig. 2 Change in of soil moisture content and soil relative humidity during the whole growing season of the pasture



### 2.3 牧草不同生育期土壤相对湿度的变化趋势

高寒草原牧草返青期土壤相对湿度以每年 0.77% 的线性趋势增加,其土壤相对湿度与年份的相关系数为 0.315 ( $P > 0.10$ )。成熟和枯黄期的土壤相对湿度分别以每年 1.06% 和 1.70% 的线性速率增加,土壤相对湿度和年份的相关系数分别为 0.567 ( $P < 0.05$ )、0.482 ( $P < 0.05$ ),可见其随年际的增加趋势是显著的。而抽穗和开花期的土壤相对湿度分别以每年 1.26% 和 1.42% 的线性趋势增加,其土壤相对湿度与年份的相关系数分别为 0.609 ( $P < 0.01$ ) 和 0.651 ( $P < 0.01$ ),可见抽穗和开花期土壤相对湿度随年际延长均呈极显著增加趋势(图 3)。牧草各发育期中,以枯黄期土壤相对湿度的线性增加速率最大,返青期土壤相对湿度的线性增加速率最小。

各发育期土壤相对湿度的大小依次为枯黄期 > 开花期 > 抽穗期 > 成熟期 > 返青期。

兴海高寒草原牧草返青至枯黄期各生育期的平均土壤相对湿度在 71%~79%,变化幅度依次是:返青期在 58%~93%,抽穗期在 61%~89%,开花期在 60%~96%,成熟期在 58%~96%,枯黄期在 57%~109%。从变化幅度可见,牧草枯黄期间的土壤相对湿度最大,开花和成熟期其次,返青和抽穗期间的土壤相对湿度最小。

### 2.4 高寒草原牧草不同生育期土壤湿度与气候因子的相关性分析

对高寒草原 1999—2016 年牧草生长季土壤湿度与降水、气温、日照等气候因子进行相关性分析(表 2),结果表明,气温与牧草抽穗期 ( $P < 0.10$ )、枯黄

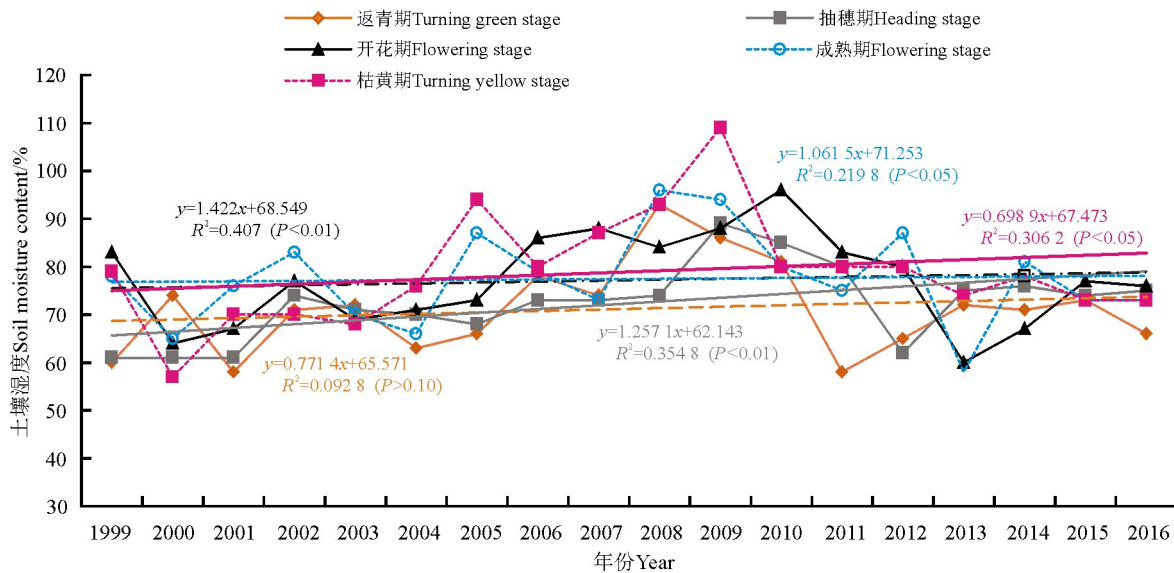


图 3 牧草不同生育期土壤相对湿度变化

Fig. 3 Change in soil moisture content during different growth periods

表 2 土壤湿度与气候因子相关系数 ( $n = 18$ )

Table 2 Correlation of soil moisture content with climate factors

项目 Item	返青期 Turning green stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage	枯黄期 Turning yellow stage	全生育期 Whole growing season
气温 Temperature	0.09	-0.467*	0.338	0.193	-0.465*	-0.584**
降水量 Precipitation	-0.132	0.526***	0.498**	0.604***	0.114	0.649***
日照时数 Sunshine hours	-0.143	-0.098	0.011	0.042	-0.454*	-0.306

\*、\*\* 和 \*\*\* 分别表示  $P < 0.10$ 、 $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著水平。

\*、\*\* and \*\*\* indicate significance at the 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively.

期( $P < 0.10$ )和全生育期( $P < 0.05$ )土壤湿度之间呈负相关关系。降水量与牧草抽穗期、开花期土壤相对湿度均呈显著正相关关系( $P < 0.05$ );成熟期和全生育期土壤相对湿度与降水量均为极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。枯黄期土壤相对湿度与日照时数呈负相关关系( $P < 0.10$ )。

### 3 讨论

进入春季,随着气温回升,当气温达到牧草萌芽返青的界限温度时,牧草开始萌芽返青,土壤水分自上而下融化,因此该阶段土壤湿度与气温之间表现为正相关关系。该阶段尽管气温回升快,但自然降水很少(仅为年降水量的 3.5%),因此土壤湿度不但不增加,反而增大了土壤水分的蒸发消耗,造成土壤湿度降低。这是因为土壤水分的可利用性是牧草返青的决定因素,但作为区域土壤水分唯一来源的降水主要集中在植物生长季,非生长季几乎无降水,返青期的早晚受控于生长季降水<sup>[24]</sup>。到 6 月上中旬时,进入牧草抽穗期,由于气温回升快,植物生长速度加快,植被盖度扩大,导致耗水量增加,此阶段该地易出现少雨时段,造成不能有效补偿土壤水分,土壤湿度不升反降,因此表现出该时期气温与土壤湿度之间呈显著负相关关系,而降水量与土壤湿度之间显著正相关。至 7 月中旬时,牧草为开花期,由于此阶段为当地主汛期,降水过程及降水量明显增多,有效补充了土壤水分,土壤湿度较高,水热条件满足牧草的生长发育及光合作用,表现出气温和降水因子与土壤湿度之间显著正相关。土壤水分的有效性是草原植被的重要限制因子,尤其区域植被多

以浅根植物为主,更加剧了种间水分的竞争。在牧草生长旺盛期,也难以满足植物群落的需求,加之区域雨热同期,反应出土壤湿度和温度、降水显著正相关<sup>[25]</sup>。8 月中旬为牧草的成熟期,此阶段温度高、降水量多,虽然相应的植物蒸腾和土壤蒸发量也较大,但由于土壤浅层水分容易得到有效补给,土壤水分较高,表现出此阶段土壤湿度与降水量具有显著的正相关关系。9 月上中旬时牧草进入枯黄期,大部分植物由于完成了整个生育周期而基本停止生长,此时土壤水分的消耗主要以土壤蒸发为主<sup>[26]</sup>,无论是土壤湿度与降水正相关关系,还是土壤湿度与温度、日照时数之间负相关关系均不显著,由于受到前期降水的缓慢累积,降水对土壤湿度影响较小。气温与牧草全生育期土壤湿度显著负相关,表明牧草生长季温度升高会加大土壤蒸发、作物蒸腾,从而降低土壤含水量。由此可见,降水季节分配是土壤水分季节波动的主要影响因素<sup>[27-28]</sup>。由于近年来三江源大部分地区生长季降水量增加,整体气候适宜程度呈上升趋势,有利于草地植被生长<sup>[29]</sup>。

### 4 结论

1)高寒草原 0—50 cm 各层土壤湿度随年际延长均呈增加趋势,牧草生长季降水量波动变化是导致土壤湿度的升降变化的主要原因。2)高寒草原牧草生长季的土壤湿度随年际延长呈显著增加趋势,且与降水量之间呈极显著正相关关系。3)气温与牧草抽穗期、枯黄期和全生育期的土壤湿度呈显著负相关关系。降水量与牧草抽穗期、开花期、成熟期和全生育期的土壤湿度均呈显著正相关关系。

### 参考文献 References:

- [1] 泽让东科,文勇立,艾鹭,赵洪文,陈有军.放牧对青藏高原高寒草地土壤和生物量的影响.草业科学,2016,33(10):1975-1980. Tserang Donko Mipam, Wen Y L, Ai Y, Zhao H W, Chen Y J. Impact of different grazing intensity on soil physical properties and plant biomass in Qinghai-Tibet Plateau alpine meadow ecosystem. Pratacultural Science, 2016, 33(10): 1975-1980. (in Chinese)
- [2] 韦惠兰,祁应军.基于遥感监测的青藏高原草地退化及其人文驱动力分析.草业科学,2016,33(12):2576-2586. Wei H L, Qi Y J. Analysis of grassland degradation of the Tibet Plateau and human driving forces based on remote sensing. Pratacultural Science, 2016, 33(12): 2576-2586. (in Chinese)
- [3] 刘彩红,李红梅,张调风.气候变暖背景下青南牧区畜牧业生产关键期变化特征及预估研究.草业科学,2015,32(8):1352-1362. Liu C H, Li H M, Zhang T F. Influence of climate warming on change characteristic of husbandry production critical period in Northeastern Qinghai during 1961—2013. Pratacultural Science, 2015, 32(8): 1352-1362. (in Chinese)
- [4] 于格,鲁春霞,谢高地.基于 RS 和 GIS 的青藏高原草地生态系统土壤水分保持功能及其经济价值评估:以生长季为例.山地学报,2006,24(4):498-503.

- Yu G, Lu C X, Xie G D. Water holding capacity of grassland ecosystem and their economic valuation in Qinghai-Tibetan plateau based on RS and GIS. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(4): 498-503. (in Chinese)
- [5] 邓国伦, 邓振镛, 万信, 方德彪. 陇东黄土高原土壤贮水量对小麦产量影响的研究. *气象科技*, 1998(1): 56-60.  
Den G L, Den Z Y, Wan X, Fang D B. The research on the effects of soil pondage to wheat production in Longdong Loess Plateau. *Meteorological Science and Technology*, 1998(1): 56-60. (in Chinese)
- [6] 陈生云, 赵林, 秦大河, 岳广阳, 任贾文, 李元寿, 赵拥华. 青藏高原多年冻土区高寒草地生物量与环境因子关系的初步分析. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 405-414.  
Chen S Y, Zhao L, Qin D H, Yue G Y, Ren J W, Li Y S, Zhao Y H. A preliminary study of the relationships between alpine grassland biomass and environmental factors in the permafrost regions of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 405-414. (in Chinese)
- [7] 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下生物量与降水量关系的模型探讨. *草原生态系统研究(第2集)*. 北京: 科学出版社, 1988: 20-25.  
Chen Z Z, Huang D H, Zhang H F. A Study on the Model of Interrelation Between Underground Biomass and Precipitation of *Aneurolepidium chinensis* and *Stipa grandis* Grassland in Inner Mongolia Region//. *Research on Grassland Ecosystem(II)*. Beijing: Science Press, 1988: 20-25. (in Chinese)
- [8] 薛晓萍, 王新, 张丽娟, 尤军, 张璇, 周治国, 陈兵林. 基于支持向量机方法建立土壤湿度预测模型的探讨. *土壤通报*, 2007, 38(3): 427-433.  
Xu X P, Wang X, Zhang L J, You J, Zhang X, Zhou Z G, Chen B L. Prediction model of soil moisture based on support vector machines. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 427-433. (in Chinese)
- [9] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱山地土壤水分动态变化. *山地学报*, 2003, 21(2): 149-156.  
He Q H, He Y H, Bao W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 149-156. (in Chinese)
- [10] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 陈文海, 陶树望. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 563-568.  
Ma Z G, Fu Z B, Xie L, Chen W H, Tao S W. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(4): 563-568. (in Chinese)
- [11] 张桂珍, 高凯, 张丽娟. 扎鲁特旗山地草地土壤含水量动态与气候因子的关系. *草业科学*, 2015, 32(9): 1399-1404.  
Zhang G Z, Gao K, Zhang L J. Dynamic change of soil moisture and their relationship with climatic factors in the Jarud Banner of Inner Mongolia. *Pratacultural Science*, 2015, 32(9): 1399-1404. (in Chinese)
- [12] 朱雅娟, 吴波, 卢琦. 干旱区对降水变化响应的研究进展. *林业科学研究*, 2012, 25(1): 100-106.  
Zhu Y J, Wu B, Lu Q. Progress in the study on response of arid zones. *Forest Research*, 2012, 25(1): 100-106. (in Chinese)
- [13] 李兴华, 陈素华, 韩芳. 干旱对内蒙古草地牧草返青期的影响. *草业科学*, 2013, 30(3): 452-456.  
Li X H, Cheng S H, Han F. Effects of drought on grassland turning green period in Inner Mongolia. *Pratacultural Science*, 2013, 30(3): 452-456. (in Chinese)
- [14] 展秀丽, 严平. 青海湖不同沙漠化治理区土壤含水量动态变化研究. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50(1): 131-139.  
Zhan X L, Yan P. Research on dynamic change of the soil water content in the desertification combating areas around Qinghai Lake. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2015, 50(1): 131-139. (in Chinese)
- [15] 魏永林, 许存平, 张盛魁. 气候变化对海北地区天然草地生物量及生态环境影响. *草业科学*, 2008, 25(3): 22-26.  
Wei Y L, Xu C P, Zhang S K. Effects of climatic changes on biomass and eco-environments of natural grassland in Haibei region of Qinghai Province. *Pratacultural Science*, 2008, 25(3): 22-26. (in Chinese)
- [16] 马星星, 鄢燕, 鲁旭阳, 王小丹. 藏北高寒草地地下生物量特征及其与土壤水分的关系. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 189-195.  
Ma X X, Yan Y, Lu X Y, Wang X D. Dynamics of belowground biomass and its relationship with soil moisture in alpine grassland on the north Tibetan Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 189-195. (in Chinese)
- [17] 苟晓伟, 常生华, 程云湘, 侯扶江. 中国北方草原生物量年际动态. *草业科学*, 2016, 33(4): 739-747.  
Gou X W, Chang S H, Cheng Y X, Hou F J. Annual dynamics of productivity in rangeland across climatic factors over last 30 years in northern China. *Pratacultural Science*, 2016, 33(4): 739-747. (in Chinese)
- [18] 徐海量, 宁郁东, 胡玉昆. 巴音布鲁克高寒草地牧草产量与水热关系初步探讨. *草业科学*, 2005, 22(3): 14-17.

- Xu H L, Ning Y D, Hu Y K. The primary discussion the relationship between the forage yields in alpine grassland and temperature and rainfall in Bayinbuluk. *Pratacultural Science*, 2005, 22(3): 14-17. (in Chinese)
- [19] 郭连云, 吴让, 汪青春, 蓟尚玛. 气候变化对三江源兴海县草地气候生产潜力的影响. *中国草地学报*, 2008, 30(2): 5-10.  
Guo L Y, Wu R, Wang Q C, Ji S M. Influence of climate change on grassland productivity to in Xinghai County in the Source Regions of Yangtze River. *Chinese Jouranal of Grassland*, 2008, 30(2): 5-10. (in Chinese)
- [20] 王宁珍, 张谋草, 黄斌, 马长青. 陇东地区土壤水分变化与玉米产量的关系探讨. *中国农学通报*, 2009, 25(21): 320-323.  
Wang N Z, Zhang M C, Huang B, Ma C Q. Relationship discussion between soil moisture change with maize yield in east of Gansu Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(21): 320-323. (in Chinese)
- [21] 李乃杰, 宜树华, 秦彧, 任世龙, 陈建军. 翻耕对半干旱区高寒草甸地表水热条件的影响. *草业科学*, 2012, 29(6): 883-888.  
Li N J, Yi S H, Qin Y, Ren S L, Chen J J. Effects of tillage on surface moisture and temperature of alpine meadow. *Pratacultural Science*, 2012, 29(6): 883-888. (in Chinese)
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 36-39.  
Wei F Y. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology*. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 36-39. (in Chinese)
- [23] 荣廷昭, 李晚忱. 田间试验与统计分析. 成都: 四川大学出版社, 2001: 148-203.  
Rong T Z, Li W C. *Field Experiment Designs and Statistics*. Chengdu: Sichuan University Press, 2001. 148-203. (in Chinese)
- [24] 朱宝文, 侯俊岭, 严德行, 宋理明, 郑有飞. 草甸化草原优势牧草冷地早熟禾生长发育对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2012, 31(6): 1525-1532.  
Zhu B W, Hou J L, Yan D X, Song L M, Zheng Y F. Effects of climate change on *Poa crymophila* phenology in alpine meadow grassland in northern region of Qinghai Lake, Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(6): 1525-1532. (in Chinese)
- [25] 张继强, 陈文业, 赵明, 李广宇, 魏强, 康建军, 朱丽, 陈彬, 王芳. 高寒草甸次生裸地的植物群落特征及土壤水分的季节变化. *草业科学*, 2013, 30(4): 495-500.  
Zhang J Q, Chen W Y, Zhao M, Li G Y, Wei Q, Kang J J, Zhu L, Chen B, Wang F. A study on community characteristics and soil moisture variation in alpine meadow secondary bare land. *Pratacultural Science*, 2013, 30(4): 495-500. (in Chinese)
- [26] 闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 袁立敏. 固沙植被土壤水分动态及其对降雨的响应. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 87-89.  
Yan D R, Huang H G, Hu X L, Yuan L M. Soil water dynamics of sand fixation vegetations and the responses to precipitation. *Journal of Arid Land Resource and Enviroment*, 2016, 30(4): 87-89. (in Chinese)
- [27] 王文, 蒋文兰, 谢忠奎, 张德罡, 宫旭胤, 冠江涛. 黄土丘陵地区唐古特白刺根际土壤水分与根系分布研究. *草业学报*, 2013, 22(1): 20-28.  
Wang W, Jiang W L, Xie Z K, Zhang D G, Gong X Y, Kou J T. Study on soil water in rhizosphere and root system distribution of *Nitraria tangutorum* on Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinca*, 2013, 22(1): 20-28. (in Chinese)
- [28] 张志南, 武高林, 王冬, 邓蕾, 郝红敏, 杨政, 上官周平. 黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系. *草业学报*, 2014, 23(6): 313-319.  
Zhang Z N, Wu G L, Wang D, Deng L, Hao H M, Yang Z, Shangguan Z P. Plant community structure and soil moisture in the semi-arid natural grassland of Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinca*, 2014, 23(6): 313-319. (in Chinese)
- [29] 钱拴, 伏洋, PAN F F. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1439-1445.  
Quan S, Fu Y, Pan F F. Climate change trend in growing season and there sponse to grassland in the three-river head waters. *Science in China; Series D*, 2010, 40(10): 1439-1445. (in Chinese)

(责任编辑 苟燕妮)