

DOI: 10.11686/cyxb2020015

http://cyxb.magtech.com.cn

陆丰帅, 阿的鲁骥, 程云湘, 等. 祁连山高寒草原土壤水分与植被盖度的关系. 草业学报, 2020, 29(11): 23-32.

Lu F S, Ade L J, Cheng Y X, et al. Relationship between soil moisture and vegetation cover in Qilian Mountain alpine steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 23-32.

祁连山高寒草原土壤水分与植被盖度的关系

陆丰帅^{1,2}, 阿的鲁骥^{1,2}, 程云湘³, 侯扶江^{1,2*}

(1. 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 农业部草业创新重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 3. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 为了揭示高寒草原土壤水分与植被盖度的关系, 提高植被盖度与土壤水分快测的精度, 本研究在祁连山北麓中段高寒草原—甘肃马鹿冬季牧场, 设置放牧率分别为 1.00、1.45、2.45、3.45、4.85、6.90 AUM·hm⁻² 的 6 个样地, 通过逐月测定生长季植被盖度和土壤水分, 结合 Landsat5 多光谱影像与 SPOT2 全色影像融合而成的 SPOT-TM 影像, 分析土壤水分与植被盖度、归一化植被指数 (NDVI) 的关系, 并在此基础上, 确定植被盖度随土壤水分的变化阶段。除醉马草、银灰旋花、乳白黄耆外, 其他种群盖度对表层土壤水分均响应敏感, 在 3%~7% 至 17%~26% 的土壤水分范围内, 种群盖度随土壤水分的增加呈反比例函数递增趋势, 且增幅逐渐缩小; 群落盖度对表层土壤水分的响应敏感, 在 1.1%~10.0% 的土壤水分范围内, 群落盖度随土壤水分的增加亦呈反比例函数递增趋势, 并逐渐趋于饱和。研究结果对探讨干旱半干旱草原植被物种、种群、群落的抗旱性、水分利用效率具有一定意义, 为草原植被和土壤水分管理提供科学依据。

关键词: 种群; 群落演替; 不喜食牧草; 归一化植被指数; 放牧率

Relationship between soil moisture and vegetation cover in Qilian Mountain alpine steppe

LU Feng-shuai^{1,2}, ADE Lu-ji^{1,2}, CHENG Yun-xiang³, HOU Fu-jiang^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 3. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Abstract: This study investigated the relationship between soil moisture and vegetation cover in alpine steppe meadow in the Qilian Mountains with the aim of improving the precision of remote sensing estimates of soil moisture and vegetation cover. Six sample areas with different stocking rates of *Cervus elaphus kansuensis* (1.00, 1.45, 2.45, 3.45, 4.85, 6.90 AUM·ha⁻¹) in were set up, AUM means animal unit. Through comparing data from monthly field measurement of vegetation cover and soil moisture and SPOT-TM images combining Landsat5 multispectral images and SPOT2 panchromatic images, we analyzed the relationship between soil moisture, vegetation cover and normalized difference vegetation index (NDVI) and quantitatively explored the dynamics of seasonal change in vegetation cover and soil moisture in the sample areas in the Qilian Mountain alpine steppe. Except for *Achnatherum inebrians*, *Convolvulus ammannii* and *Stragalus leucocephalus*

收稿日期: 2020-01-17; 改回日期: 2020-04-28

基金项目: 祁连山山地—荒漠—绿洲系统耦合模式研究 (XDA20100102) 和长江学者和创新团队发展计划 (IRT_17R50) 资助。

作者简介: 陆丰帅 (1996-), 女, 山东沂水人, 在读硕士。E-mail: lufsh18@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: cyhoufj@lzu.edu.cn

lus, the response of population cover to surface soil moisture was relatively sensitive, with the population cover of species inversely proportional to soil moisture in the range between c. 5% and c. 25%. The response of plant community cover to surface soil moisture was also relatively sensitive. In the soil moisture range from 10.0% to 1.1%, the community cover increased in the inverse proportional function. The results are highly relevant to remote sensing monitoring of the drought resistance and water use efficiency of plant species, populations and communities in arid and semi-arid steppe grassland, and provide scientific data for vegetation and soil moisture management in steppe grasslands.

Key words: population; community succession; undesirable plant; NDVI; grazing rate

草原是我国面积最大的陆地生态系统类型^[1],水分是草原生态系统物质循环与能量流动的载体。植被与水分互作是生态系统的关键生态过程之一,土壤水分直接影响着草原植被盖度^[2],反过来,植被盖度也深刻地影响着草原土壤水分的时空格局^[3]。草层的拦截作用可以使降水缓慢渗至土壤,促进植物根部对土壤水分的吸收^[4]。植被覆盖增加浅层土壤的水分含量^[5],在科尔沁草原,植被盖度与土壤水分之间呈倒“V”型关系,土壤水分在28%的植被盖度下最高^[6];在祁连山高寒典型草原,甘肃臭草(*Melica przewalskyi*)种群盖度与上层土壤水分呈正态分布^[7]。利用遥感数据提取的归一化植被指数 NDVI 与植被盖度建立的回归模型,能够准确监测草原植被盖度的时空特征^[8-9],因此,将遥感多光谱影像和全色影像融合,生成高分辨率的多光谱影像,从中提取 NDVI,分别与实测的群落盖度、表层土壤水分进行相关性分析,有可能定量预测植被盖度与土壤水分,从而为便捷、准确地测定植被盖度或土壤水分提供基础,包括运用遥感和无人机技术测定土壤水分等,而且,定量分析草原植被盖度与土壤水分关系,明确植被盖度随土壤水分的阶段性变化,对于探索干旱半干旱草原植被物种的抗旱性、水分利用效率、土壤水分生态位具有一定意义。

目前,植被抗旱性和水分利用效率的研究主要集中于植株个体的干旱模拟试验,如扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)在干旱胁迫下的生理响应^[10]、豆科牧草狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)的抗旱性评价^[11]、中间偃麦草(*Elytrigia intermedia*)随土壤水分变化的生理分析^[12],多为室内或野外模拟干旱环境下的控制性试验,而对草原植被种群、群落的抗旱性鲜有报道。草原植被以个体、种群和群落的形式共生与发展,植被与水分的关系受放牧等一系列因素的制约。为此,本研究在祁连山高寒草原开展野外试验,试图回答以下问题:1)高寒草原土壤水分与植被盖度之间的数量关系;2)这种关系的维持机制。以明确草原生态系统植被—土壤水分互作过程,为草原的水分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在甘肃省肃南裕固族自治县鹿场的冬季牧场开展相关试验(N 38.8°、E 99.6°,海拔 2850 m),地处祁连山北麓中段,年均温 3.6 °C,年均降水量 253 mm,70%以上集中于 6—9 月,年均蒸发量约 1800 mm,日照时数 3085 h。土壤为山地栗钙土。牧草生长期为 5—9 月,主要物种有紫花针茅(*Stipa purpurea*)、扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、赖草(*Leymus secalinus*)、波伐早熟禾(*Poa poophagorum*)、苔草(*Carex ateriima*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等,退化区域主要是醉马草(*Achnatherum inebrians*)和银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等。根据草原综合顺序分类法,草原类型属于寒温微干山地草原类^[13]。草地农业系统类型主要是天然草地—家畜生产系统^[14]。

1.2 样地设置与测定

甘肃马鹿(*Cervus elaphus kansuensis*)冬季牧场地势平坦开阔,于 1999 年 11 月—次年 2 月每天 8:30—16:30 进行放牧^[13]。以牧场入口为起点,在距离入口 50、350、650、950、1250、1550 m 处共设 6 个放牧强度的梯度样地,放牧率分别为 1.00、1.45、2.45、3.45、4.85、6.90 AUM·hm⁻²,一个家畜单位(animal unit, AUM)为一头成年母鹿(200 kg)带一只哺乳鹿羔^[14]。

在每个放牧率样地随机布设 5 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方,样方间隔 50 m 左右。调查每个样方的物种及其盖度和密度、群落盖度等^[15]。群落以优势种命名,以物种重要值判断优势种^[16]。于 1999 年 5—10 月中旬各测定一次植被种群盖度、群落盖度和土壤含水量,GPS 收集样方经纬度信息。用环刀法测定土壤容重、称重法测定土壤体积含水量^[16]。

1.3 归一化植被指数的提取

选取同期的美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration 美国国家航空和宇宙航行局)提供的研究区 30 m 空间分辨率的 Landsat5 多光谱影像以及法国 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales 法国国家太空研究中心)提供的 10 m 空间分辨率的 SPOT2 全色影像,用于提取归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)^[17],利用 ENVI 5.3 对影像进行处理,得到 10 m 分辨率的 SPOT-TM 融合影像,覆盖所有地面实测数据的采样点,从中提取植被指数 NDVI,具体处理步骤如下:

1)SPOT2 全色影像正射纠正。利用 ENVI Classic 5.3 自定义坐标系为北京 54 坐标系,该坐标系的投影类型为 Gauss Kruger (Transverse Mercator)。在 ENVI 5.3 中,以该坐标系为基准,在基准影像和待正射纠正 SPOT2 全色影像中手动寻找 10 个经纬度、海拔相同的控制点,对 SPOT2 全色影像进行正射纠正,消除卫星影像拍摄期间由于地形起伏、拍摄方位等原因带来的误差。

2)Landsat5 影像图像配准。研究区下载的 Landsat5 影像为 LPTS 格式的 L1T 级别,使用 WGS84 UTM 坐标系统,需要以正射纠正处理后的 SPOT2 全色影像为基准,配准该多光谱影像。为了两幅影像配准更加精确,本步骤中同样采用手动寻找控制点的方法,对 Landsat7 影像进行配准。

3)图像融合。将低分辨率的 Landsat5 多光谱影像与高分辨率的 SPOT2 全色影像融合,生成高分辨率的多光谱影像。首先需要将 Landsat5 多光谱影像转化为 BIL 文件格式,然后利用 NNDiffuse pan sharpening 融合方法进行处理。

4)快速大气纠正。将图像融合后的影像进行经纬度边界的裁剪,进行快速大气校正,消除大气中各因素对地物反射的影响,得到真实地面反射率。图像预处理后,从 SPOT-TM 融合影像中运用波段运算提取各点的 NDVI: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$, NIR 表示近红外波段, R 表示红外波段。

1.4 土壤水分与植被盖度的关系

根据植被盖度随土壤水分的变化,引入几个参数(图 1)。种群/群落盖度的土壤水分临界点(点 A),土壤水分超过这一临界值,种群/群落才能生长和发展,该点是种群/群落盖度的最低土壤水分阈值。种群/群落盖度的土壤水分饱和点(点 B),土壤水分接近这个值,种群/群落盖度的增长停滞,土壤水分超过这个阈值,种群盖度甚至逐渐降低(弧 DF),群落盖度不再增加(线 DE)。种群/群落盖度的土壤水分值域(线 AB),种群/群落盖度的土壤水分临界点与饱和点之间的差值反映种群/群落盖度所对应的土壤水分值域^[18]。饱和种群/群落盖度(点 C),在土壤水分允许的条件下,种群/群落盖度达到的最大值。

用反比例函数 $y = \beta_0 + \beta_1/x$ 拟合植被盖度与土壤水分的关系,随着 x 值的增加, y 值呈现递增趋势,但递增的幅度逐渐缩小,即植被盖度随着土壤水分的上升而增加的过程(图 1); x 值达到一定时, y 值趋于饱和,即饱和种群/群落盖度(图 1),对应的 x 值即种群/群落盖度的土壤水分饱和点(图 1)。根据拟合公式计算各参数值:种群/群落盖度为 0 时,计算种群/群落盖度的土壤水分临界点;随着土壤水分的增加,种群/群落盖度出现增幅减少的趋势,当增加值约为自身的 1% 时,将该种群/群落盖度值作为饱和种群/群落盖度,对应的土壤含水量作为种群/群落盖度的土壤水分饱和点。

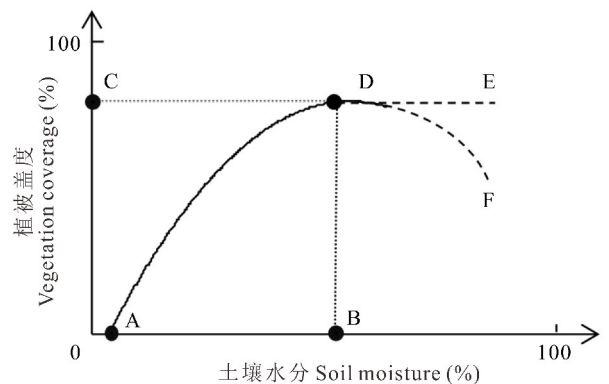


图 1 植被盖度随土壤水分的变化示意图

Fig. 1 Variation schematic diagram of vegetation coverage with soil moisture

1.5 数据分析

采用 Conoco 4.5 对 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 土壤含水量与各物种盖度进行了冗余分析 (redundancy analysis, RDA), 利用 SPSS 20.0 分别对植被盖度、土壤含水量、归一化植被指数 NDVI 进行相关性统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤水分与种群盖度、群落盖度的 RDA 分析

RDA 结果表明, 群落盖度与 0~10 cm 土壤含水量的相关性最强, 且随着土层深度的增加, 相关性逐渐减弱; 除醉马草、银灰旋花、乳白黄耆 (*Stragalus leucocephalus*) 之外, 紫花针茅、赖草、波伐早熟禾、阿尔泰狗娃花、紫花棘豆 (*Oxytropis subfalcata*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、扁穗冰草、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*)、灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*) 的种群盖度均与 0~10 cm、10~20 cm 土壤含水量的相关性较强, 其次是苔草、二裂委陵菜、虬果芥 (*Torularia humilis*), 随着土层深度的增加, 相关性逐渐减弱 (图 2)。

2.2 种群盖度与土壤水分的关系

随着 0~10 cm 土壤含水量的增加, 生长季内紫花针茅、扁穗冰草、赖草、波伐早熟禾、阿尔泰狗娃花、紫花棘豆、冷蒿、垂穗披碱草、星毛委陵菜、灰绿藜的种群盖度变化可用反比例函数拟合 (图 3), 二者极显著正相关 ($P < 0.001$)。种群盖度的土壤水分临界点由大到小依次为灰绿藜 > 阿尔泰狗娃花 > 紫花针茅 > 赖草 > 星毛委陵菜 > 紫花棘豆 > 冷蒿、波伐早熟禾 > 垂穗披碱草 > 扁穗冰草; 种群盖度的土壤水分饱和点由大到小依次为灰绿藜 > 紫花针茅 > 星毛委陵菜 > 赖草、波伐早熟禾、阿尔泰狗娃花、紫花棘豆、冷蒿 > 垂穗披碱草 > 扁穗冰草。种群盖度的土壤水分值域大小依次为灰绿藜、紫花针茅、星毛委陵菜、冷蒿、波伐早熟禾、紫花棘豆、赖草、垂穗披碱草、阿尔泰狗娃花、扁穗冰草。饱和种群盖度由大到小依次为紫花针茅 > 赖草 > 扁穗冰草 > 波伐早熟禾 > 灰绿藜 > 阿尔泰狗娃花 > 星毛委陵菜、冷蒿 > 垂穗披碱草 > 紫花棘豆 (表 1)。

2.3 群落盖度与土壤水分的关系

群落盖度随 0~10 cm 表层土壤水分的增加呈反比例函数递增趋势 (图 4), 群落盖度的土壤水分临界点为 1.1%, 低于此值群落盖度为 0, 群落盖度的土壤水分饱和点、饱和群落盖度分别为 10.0%、70.5%, 随着表层土壤水分的改变, 群落盖度发生优势种群之间的演替。

对群落盖度进行聚类分析, 其明显聚合为 5 类, 分别为醉马草 + 银灰旋花群落、紫花针茅 + 醉马草群落、紫花针茅 + 醉马草 + 赖草群落、紫花针茅 + 赖草群落、紫花针茅群落, 表层土壤水分分别为 0~7.5%、7.5%~10.0%、10.0%~18.5%、18.5%~23.5%、23.5%~30.0%。据此, 将群落演替划分为 5 个阶段 (图 4): 第 1 阶段, 醉马草、银灰旋花抗旱能力强, 表层土壤水分对二者盖度胁迫较小。第 2 阶段紫花针茅盖度大大增加, 优势物种醉马草和银灰旋花分别演替为紫花针茅和醉马草。第 3 阶段为优势种群丰富度最高的阶段。第 4 阶段, 醉马

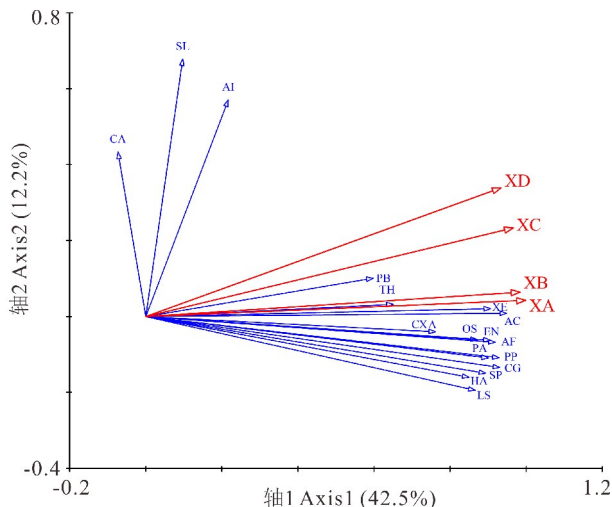


图 2 各层土壤水分与种群盖度、群落盖度的 RDA 分析

Fig. 2 RDA analysis of population, community coverage and soil moisture in each layer

SP: 紫花针茅 *S. purpurea*; AI: 醉马草 *A. inebrians*; PB: 二裂委陵菜 *P. bifurca*; LS: 赖草 *L. secalinus*; PP: 波伐早熟禾 *P. poophagorum*; HA: 阿尔泰狗娃花 *H. altaicus*; OS: 紫花棘豆 *O. subfalcata*; AF: 冷蒿 *A. frigida*; AC: 扁穗冰草 *A. cristatum*; EN: 垂穗披碱草 *E. nutans*; CXA: 苔草 *C. ateriima*; CA: 银灰旋花 *C. ammannii*; PA: 星毛委陵菜 *P. acaulis*; SL: 乳白黄耆 *S. leucocephalus*; CG: 灰绿藜 *C. glaucum*; TH: 虬果芥 *T. humilis*; XE: 群落盖度 Community coverage; XA, XB, XC, XD: 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm 土壤含水量 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm soil moisture.

草不再是优势种群。第 5 阶段为紫花针茅单优势群落。醉马草种群在演替的前 3 个阶段占优势,说明冬季牧场因放牧过重整体退化,不喜食牧草醉马草适应土壤水分条件。

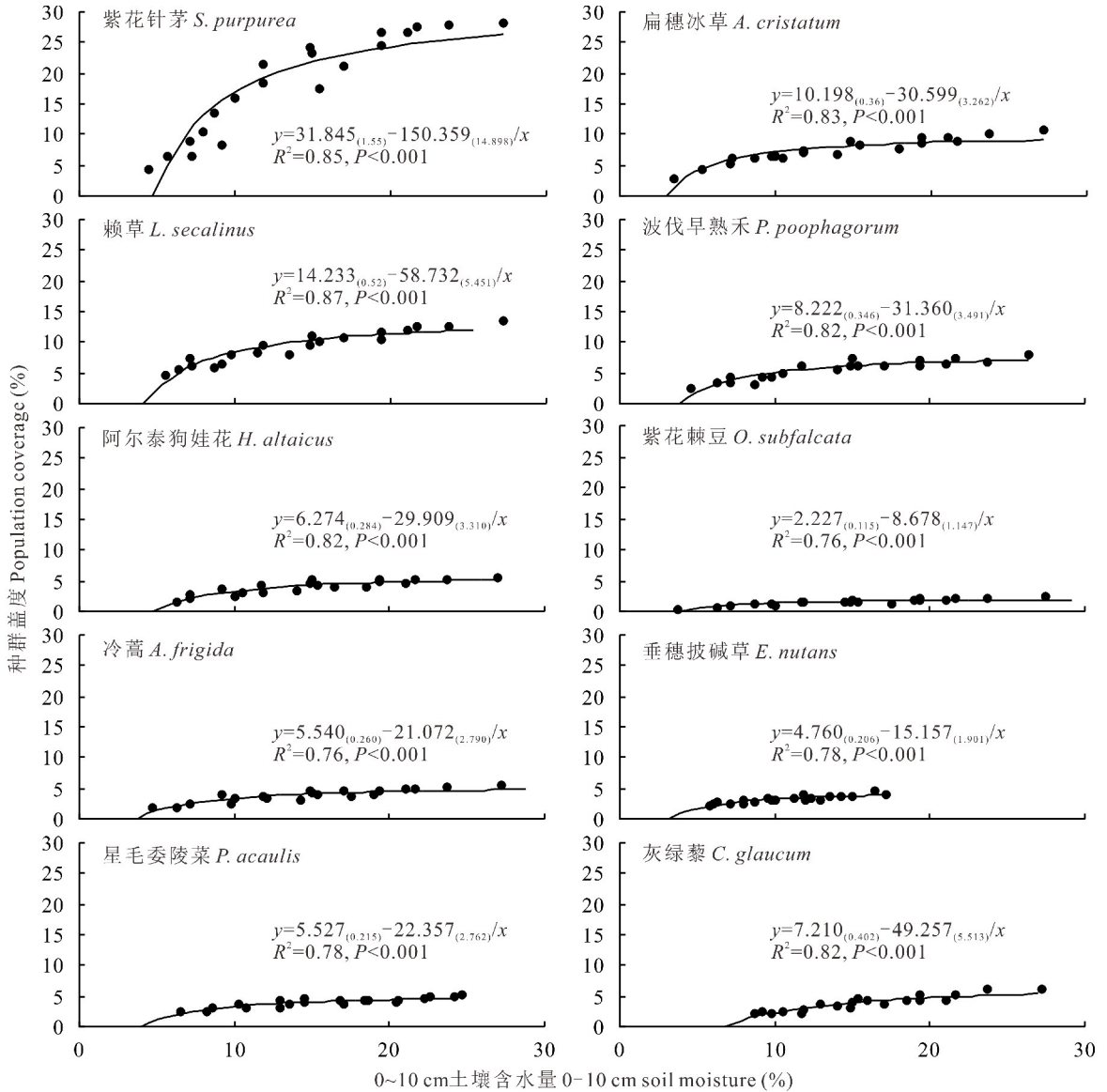


图 3 0~10 cm 土壤含水量与种群盖度的关系

Fig. 3 Relationship between 0-10 cm soil moisture and population coverage

下标为模型系数的标准误差。下同。The standard error of the model coefficient is indicated by subscript. The same below.

2.4 NDVI 与群落盖度、表层土壤水分的关系

整个植被生长季,高寒典型草原的 NDVI 的范围为 0~0.5,NDVI 与群落盖度极显著正相关($P < 0.001$),随着 NDVI 的增加,群落盖度呈逐渐上升趋势(图 5)。表层土壤含水量与 NDVI 极显著正相关($P < 0.001$),随着 NDVI 的增加,表层土壤水分呈逐渐上升趋势。群落盖度对 NDVI 的响应大于表层土壤水分对 NDVI 的响应。

3 讨论

3.1 植被盖度与土壤水分的关系

降水是草原土壤水分的主要来源,0~20 cm 土壤含水量对蒸发的响应最大^[19],研究区域植被根系主要分布在 0~10 cm 土层,因此 0~10 cm 表层土壤含水量对于植被盖度的相对影响最大。群落盖度、多数种群的盖度与

表 1 种群盖度随土壤水分变化的相关参数

Table 1 The parameters of population coverage with the change of soil moisture

植物种群 Population	种群盖度的土壤水分临界点 The critical point of soil moisture of population coverage (%)	种群盖度的土壤水分饱和点 The saturation point of soil moisture of population coverage (%)	种群盖度的土壤水分值域 The range of soil moisture of population coverage (%)	饱和种群盖度 Saturation population coverage (%)
紫花针茅 <i>S. purpurea</i>	4.7	21	16.3	31.5
扁穗冰草 <i>A. cristatum</i>	3.0	17	14.0	10.1
赖草 <i>L. secalinus</i>	4.1	19	14.9	14.1
波伐早熟禾 <i>P. poophagorum</i>	3.8	19	15.2	8.2
阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	4.8	19	14.2	6.3
紫花棘豆 <i>O. subfalcata</i>	3.9	19	15.1	2.2
冷蒿 <i>A. frigida</i>	3.8	19	15.2	5.5
垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	3.2	18	14.8	4.8
星毛委陵菜 <i>P. acaulis</i>	4.0	20	16.0	5.5
灰绿藜 <i>C. glaucum</i>	6.8	26	19.2	7.2

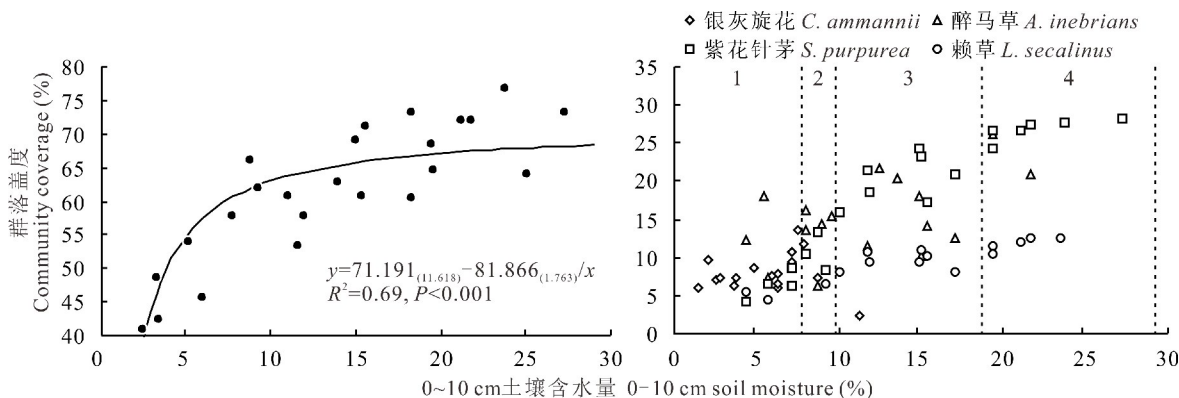


图 4 0~10 cm 土壤含水量与群落盖度的关系与群落演替

Fig. 4 Relationship between 0-10 cm soil moisture and community coverage and community succession

表层土壤含水量呈极显著正相关关系 ($P < 0.001$), 可能是土壤水分的供给使植被地上部分保持一定体积的膨压^[20], 土壤有效水分是影响群落功能性状的主导因子^[21], 植被盖度的空间异质性也会引起土壤水分的空间异质性^[22]。本研究中, NDVI 可以较好地指示群落盖度, 其与表层土壤含水量的相关关系较好地说明了这一点。醉马草、银灰旋花、乳白黄耆盖度与表层土壤水分相关不显著, 原因可能是不同植被区域具有相应的土壤水分有效性和水分承载能力^[23], 具体原因包括两个方面, 一方面, 醉马草、银灰旋花、乳白黄耆较为耐旱。醉马草为芨芨草属多年生植物, 相比于雨水较多的

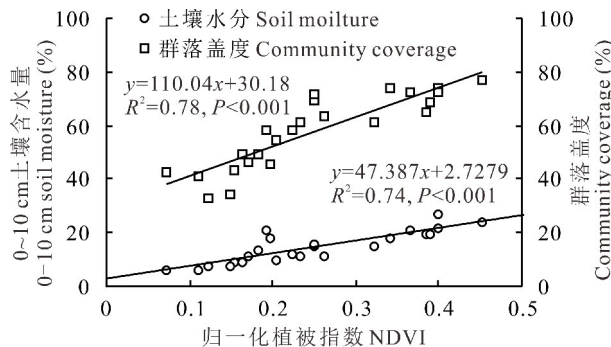


图 5 NDVI 与 0~10 cm 土壤含水量和群落盖度的关系

Fig. 5 Relationship between NDVI, 0-10 cm soil moisture and community coverage

年份, 醉马草在干旱年份生长更为茂密, 且更适宜沙质土壤环境^[24]。银灰旋花属典型旱生兼性盐生植物, 草原退化和盐碱化后, 银灰旋花种群在群落生态空间中逐渐上升为主要的种群。乳白黄耆为草原常见的植物种, 更适

宜在干旱半干旱地区生长。再者,醉马草有毒^[25],银灰旋花、乳白黄耆也是家畜不喜食牧草^[26],家畜的选择性采食使得群落中可食牧草减少^[27],相应的醉马草、银灰旋花、乳白黄耆等不食牧草种群对生态空间的侵占程度逐渐增加,而家畜践踏、排泄过度也会阻止地表水的下渗,使得表层土壤水分下降^[25,28]。

3.2 植被盖度与土壤水分关系的维持机制

草原植被种群/群落盖度随着土壤水分的变化是一个连续的过程,具体分为 3 个阶段(图 1)。

种群/群落盖度的发生。只有超过种群/群落盖度的土壤水分临界点,植被才能生存和发展。一般地,种群盖度的土壤水分临界点越低,种群的抗旱性越强^[29]。研究发现,扁穗冰草、垂穗披碱草、波伐早熟禾、冷蒿种群盖度的土壤水分临界点相对较低,且这些种群抗旱性较强,灰绿藜、阿尔泰狗娃花、紫花针茅种群盖度的土壤水分临界点相对较高,说明这些种群抗旱性较弱。种群的抗旱性建立在植株个体的抗旱性、种内与种间关系之上,与此相关的生态过程和利用管理综合制约着种群的抗旱性,进而影响种群的时空动态^[13]。

种群/群落盖度渐趋饱和。土壤水分达到种群/群落盖度的土壤水分饱和点时,植被盖度随土壤水分的生长停滞,达到饱和种群/群落盖度。一般地,在干旱生境中生长的植物具有较高的水分利用效率^[30],即种群/群落盖度的土壤水分饱和点越低,植被对土壤水分的利用效率越高。研究发现,垂穗披碱草、扁穗冰草种群盖度的土壤水分饱和点相对较低,这些种群对土壤水分的利用效率较高,灰绿藜、紫花针茅、星毛委陵菜种群盖度的土壤水分饱和点相对较高,这些种群对土壤水分的利用效率较低。土壤含水量处于一定值域内能够使植被充分利用,植物光合生理过程对土壤水分的需求存在不同水平的阈值^[31],如旱柳(*Salix matsudana*)叶片水分利用效率及光合响应参数具有明显的水分临界效应^[32],种群盖度的土壤水分值域越大,说明种群适应水分的生态位越宽^[18]。研究发现,灰绿藜、紫花针茅、星毛委陵菜种群盖度的土壤水分值域相对较大,这些种群适应水分的生态位较宽,垂穗披碱草、阿尔泰狗娃花、扁穗冰草种群盖度的土壤水分值域相对较小,这些种群适应水分的生态位较窄;紫花针茅、赖草、扁穗冰草的饱和种群盖度相对较大,这些种群具有潜在较高的生态竞争力,冷蒿、垂穗披碱草、紫花棘豆的饱和种群盖度相对较小,这些种群潜在的生态竞争力较弱。各种群盖度的土壤水分临界点相差较小,均处于 3%~7%;除灰绿藜外,各种群盖度的土壤水分饱和点相差较小,均处于 17%~21%,说明同一草原类型下种群对土壤水分的适应能力具有共性^[33],紫花针茅、赖草的饱和种群盖度相对较大,因此在土壤水分充足的条件下,紫花针茅、赖草成为群落盖度演替阶段的主要优势种群。

种群盖度下降,群落盖度不再增加/减少。土壤水分超过种群/群落盖度的土壤水分饱和点后,会对种群盖度产生胁迫,产生种群更替现象,种群更替推动群落演替,群落盖度不再增加/减少,不同湿润度(K)的草原,其饱和群落盖度差异明显。根据综合顺序分类法,K 值可以将草原分为 6 个湿润度等级^[33],当 K 值为 1.5~2.0 时,草原为草甸、冻原类型,其饱和群落盖度可达 100%。植被盖度随土壤水分变化的概念图中(图 1),左侧实线为随着表层土壤水分的增加,种群/群落盖度从开始发生到趋于饱和的过程,这一部分经本次试验分析得以证实;右侧虚线为随着表层土壤水分持续增加,种群盖度开始受到水分胁迫逐渐下降、群落盖度不再增加/减少的过程,这一部分变化过程需进一步研究证实。

3.3 土壤水分与群落演替的关系

群落对土壤水分的响应应具有明显的阶段性,通过耐旱性不同的种群更替推动群落演替。种群盖度是群落盖度的基础,群落盖度的增加主要依赖于几个优势种群盖度的变化,在一个种群盖度达到最大值以后,群落盖度的变化取决于优势种群的替代,即群落演替^[34]。因此,在土壤水分梯度上,优势种群表现出规律性变化,表层土壤水分是群落演替的主要推动因子。醉马草、银灰旋花种群是群落盖度演替第一阶段的优势种群,而第一阶段表层土壤水分最低,说明在优势种群中,醉马草与银灰旋花抗旱性较强。醉马草种群贯穿于群落盖度演替的前 3 个阶段,紫花针茅种群贯穿于群落盖度演替的后 4 个阶段,说明醉马草种群与紫花针茅种群相比,受土壤水分干旱胁迫较小,二者均具有表层土壤水分的强适应性。

明确草原植被种群/群落的抗旱性、水分利用效率、土壤水分生态位及土壤水分适应性,可为草原节水管理提供科学依据。

参考文献 References:

- [1] Shen H H, Zhu Y K, Zhao X, *et al.* Analysis of current grassland resources in China. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(2): 139–154.
沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 中国草地资源的现状分析. *科学通报*, 2016, 61(2): 139–154.
- [2] Hu J, Lü Y H, Zhang K, *et al.* The differences of water conservation function under typical vegetation types in the Pailugou Catchment, Qilian Mountain, Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3338–3349.
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. *生态学报*, 2016, 36(11): 3338–3349.
- [3] Wang J Q, Han L, Liu W Y, *et al.* Variable relationship of soil moisture and spatial pattern along desert oasis transition zone in the Tarim River middle reaches basin. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(1): 1–10.
王家强, 韩路, 柳维扬, 等. 塔里木河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间格局变化关系研究. *西北林学院学报*, 2018, 33(1): 1–10.
- [4] Zhang J X, Zhang B, Zhang H, *et al.* Landscape pattern change and soil erosion research—Take malian river basin in Loess Plateau as an example. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1513–1525.
张建香, 张勃, 张华, 等. 黄土高原的景观格局变化与水土流失研究——以黄土高原马莲河流域为例. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1513–1525.
- [5] Xie H H, Fan J, Hao M D, *et al.* Effects of soil surface mulching on the water use of artificial grassland in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(2): 172–176, 182.
谢慧慧, 樊军, 郝明德, 等. 地表覆盖对黄土高原水蚀风蚀交错区人工草地水分利用的影响. *草地学报*, 2010, 18(2): 172–176, 182.
- [6] Wang M M, Liu X P, Li Y L, *et al.* Soil moisture dynamic under different plant coverages in sandy grassland during growing season. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(5): 54–61.
王明明, 刘新平, 李玉霖, 等. 不同植被盖度沙质草地生长季土壤水分动态. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 54–61.
- [7] Shi L L, Zhao C Z, Fan J P, *et al.* Spatial patterns of soil moisture and vegetation coverage in *Melica przewalskyi* patches in degraded alpine grassland of Qilian Mountains, Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 285–291.
史丽丽, 赵成章, 樊洁平, 等. 祁连山地甘肃臭草斑块土壤水分与植被盖度空间格局. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 285–291.
- [8] Wu J, Liu M S, Li W T. Research on vegetation coverage information extraction technologies for arid and semiarid area. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(9): 92–97.
吴见, 刘民士, 李伟涛. 干旱半干旱区植被盖度信息提取技术研究. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 92–97.
- [9] Chen J J, Yi S H, Ren S L, *et al.* Retrieval of fractional vegetation cover of alpine grassland and the efficiency of remote sensing retrieval in the upper of Shule River Basin. *Pratacultural Science*, 2014, 31(1): 56–65.
陈建军, 宜树华, 任世龙, 等. 疏勒河上游高寒草地植被盖度反演及精度评价. *草业科学*, 2014, 31(1): 56–65.
- [10] Jin J Y, Zhang W H, Yuan L. Physiological responses of three forages to drought stress and evaluation of their drought resistance. *Acta Prataculturalae Sinica*, 2015, 24(10): 157–165.
靳军英, 张卫华, 袁玲. 三种牧草对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价. *草业学报*, 2015, 24(10): 157–165.
- [11] Luo D, Wang M J, Li Y H, *et al.* Four legumes response to simulated drought in the stages of seed germination and seedling growth and drought resistance assessment. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(2): 224–230.
罗冬, 王明玖, 李元恒, 等. 四种豆科牧草种子萌发和幼苗生长对干旱的响应及抗旱性评价. *生态环境学报*, 2015, 24(2): 224–230.
- [12] Su R G G, Sun T J, Wu J Y, *et al.* Effect of drought stress on characteristics of drought resistance of grasses during seedling stage. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(3): 56–60.
苏日古嘎, 孙铁军, 武菊英, 等. 干旱胁迫对禾草苗期抗旱性特征的影响. *中国草地学报*, 2007, 29(3): 56–60.
- [13] Hu J Q, Chen X J, Hou F J. The response of plant community characteristics of alpine steppe to the winter grazing of Gansu Wapiti. *Pratacultural Science*, 2016, 33(6): 1028–1034.
胡俊奇, 陈先江, 侯扶江. 高寒草原群落特征对甘肃马鹿冬季放牧的响应. *草业科学*, 2016, 33(6): 1028–1034.
- [14] Zhang Y, Chen X J, Cheng Y X, *et al.* Effects of stocking rates on functional group diversity and forage quality in rangeland of Qilian Mountain China. *Journal of Environmental Biology*, 2015, 36(4): 713–719.
- [15] Hou F J, Li G, Yang F G. Grazing behavior of Gansu Wapiti (*Cervus elaphus kansuensis*) in summer & winter on the alpine grasslands of Qilianshan Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1807–1815.
侯扶江, 李广, 杨逢刚. 甘肃马鹿夏冬季在祁连山高山草地的放牧行为. *生态学报*, 2003, 23(9): 1807–1815.
- [16] Chai L R, Sun Y, Wang H, *et al.* Effect of yak grazing intensity on characteristics of plant communities and forage quality in

- Gannan Alpine Meadow. *Pratacultural Science*, 2018, 35(1): 18–26.
- 柴林荣, 孙义, 王宏, 等. 牦牛放牧强度对甘南高寒草甸群落特征与牧草品质的影响. *草业科学*, 2018, 35(1): 18–26.
- [17] Sun Z H, Liu Z C, Lei Y P. The variations of NDVI and the relation with climate in hilly and gully region of Northern Yan'an. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 533–540.
- [18] Li W L, Li Z Z, Wang G, *et al.* Analysis on water utility of artificial sand fixing plants and its numerical simulation of the procedure of niche fitness in Shapotou Area. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, (6): 1012–1017.
- 李文龙, 李自珍, 王刚, 等. 沙坡头地区人工固沙植物水分利用及其生态位适宜度过程数值模拟分析. *西北植物学报*, 2004, (6): 1012–1017.
- [19] Huang D Q, Yu L, Zhang Y S, *et al.* Influence of meteorological factors on the dynamic changes of soil moisture of natural grassland in the northern slopes of the Mountains Qilian. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(3): 233–239.
- 黄德青, 于兰, 张耀生, 等. 气象因子对祁连山北坡天然草地土壤水分动态变化的影响. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(3): 233–239.
- [20] Zhao X J, Tian K, Yue H T. Growth stress of *Scirpus tabernaemontani* of dominant plant in plateau wetland lakeshore to water level fluctuating. *Guihaia*, 2015, 35(3): 303–308.
- 赵湘江, 田昆, 岳海涛. 水位变化对高原湿地湖滨带优势植物水葱的生长胁迫. *广西植物*, 2015, 35(3): 303–308.
- [21] Wang X, Yang L, Zhao Q, *et al.* Spatial heterogeneity and environmental drivers of grassland community functional traits in the semi-arid loess small watershed. *Pratacultural Science*, 2019, 36(9): 2201–2211.
- 王鑫, 杨磊, 赵倩, 等. 半干旱黄土小流域草地群落功能性状空间异质性及环境驱动. *草业科学*, 2019, 36(9): 2201–2211.
- [22] Zhao M Y, Zhao W W, Liu Y X. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: A case study in the Loess Hilly-gully area. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4625–4632.
- 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子——以黄土丘陵沟壑区为例. *生态学报*, 2015, 35(14): 4625–4632.
- [23] Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982–2013. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 534–543.
- 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982–2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析. *地理学报*, 2019, 74(3): 534–543.
- [24] Wei H L, Sun Z J, Jin G L, *et al.* Effect of water stress simulated by PEG on seed germination of *Achnatherum inebrians* (Hance) Keng. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(26): 22–26.
- 位海玲, 孙宗玖, 靳瑰丽, 等. PEG 模拟水分胁迫对新疆醉马草种子萌发的影响. *中国农学通报*, 2014, 30(26): 22–26.
- [25] Shen G S, Zhang M H, Xia Q, *et al.* Influence of deer grazing on plant community structure and species diversity. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2009, 30(3): 86–90.
- 沈广爽, 张明海, 夏茜, 等. 放牧鹿科动物对植物群落结构及物种多样性的影响. *家畜生态学报*, 2009, 30(3): 86–90.
- [26] Wu Z, Peng Z C, Hou F J. Response of main plant population pattern to winter grazing in alpine steppe of the Qilian Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 8010–8020.
- 武哲, 彭泽晨, 侯扶江. 祁连山高寒草原主要植物种群格局对冬季放牧的响应. *生态学报*, 2019, 39(21): 8010–8020.
- [27] Dong Q M, Zhao X Q, Ma Y S, *et al.* Influence of grazing on biomass, growth ratio and compensatory effect of different plant groups in *Kobresia parva* meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2640–2650.
- 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 放牧对小嵩草草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响. *生态学报*, 2012, 32(9): 2640–2650.
- [28] Ding X H, Gong L, Wang D B, *et al.* Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mogolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4722–4730.
- 丁小慧, 官立, 王东波, 等. 放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响. *生态学报*, 2012, 32(15): 4722–4730.
- [29] Li Y, Wang Q, Liu G Y, *et al.* Responses of four ground cover plants to drought stress and the comprehensive evaluation on drought resistance capacity. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(6): 9–15.
- 李艳, 王庆, 刘国宇, 等. 4 种地被植物干旱胁迫下的生理响应及抗旱性评价. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(6): 9–15.
- [30] Hu H G, Zhang Z M, Wu S C, *et al.* Advance of research on water use efficiency of plant and its mechanism. *Water Saving Irrigation*, 2013, (3): 11–15.
- 胡化广, 张振铭, 吴生才, 等. 植物水分利用效率及其机理研究进展. *节水灌溉*, 2013, (3): 11–15.

- [31] Xia J B. Critical responses of photosynthetic efficiency in *Campsis radicans* (L.) to soil water and light intensities. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(77): 17748–17754.
- [32] Xia J B, Zhang S Y, Zhao Z G, *et al.* Critical effect of photosynthetic efficiency in *Salix matsudana* to soil moisture and its threshold grade in shell ridge island. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(9): 851–860.
夏江宝, 张淑勇, 赵自国, 等. 贝壳堤岛旱柳光合效率的土壤水分临界效应及其阈值分级. *植物生态学报*, 2013, 37(9): 851–860.
- [33] Liang T G, Feng Q S, Huang X D, *et al.* Review in the study of comprehensive sequential classification system of grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(5): 252–258.
梁天刚, 冯琦胜, 黄晓东, 等. 草原综合顺序分类系统研究进展. *草业学报*, 2011, 20(5): 252–258.
- [34] Wen L, Song T Q, Du H, *et al.* The succession characteristics and its driving mechanism of plant community in karst region, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5822–5833.
文丽, 宋同清, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制. *生态学报*, 2015, 35(17): 5822–5833.