

DOI: 10.5846/stxb201403310599

干珠扎布,段敏杰,郭亚奇,张伟娜,梁艳,高清竹,旦久罗布,白玛玉珍,西绕卓玛.喷灌对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响.生态学报, 2015, 35(22): - .

H. Ganjurjav, Duan M J, Guo Y Q, Zhang W N, Liang Y, Gao Q Z, DanJiu L B, BaiMa Y Z, Xirao Z M. Irrigation effects on alpine grassland productivity and its species diversity in Northern Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

## 喷灌对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响

干珠扎布<sup>1</sup>, 段敏杰<sup>2</sup>, 郭亚奇<sup>3</sup>, 张伟娜<sup>1</sup>, 梁 艳<sup>1</sup>, 高清竹<sup>1,\*</sup>, 旦久罗布<sup>4</sup>, 白玛玉珍<sup>4</sup>, 西绕卓玛<sup>4</sup>

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081

2 北京市园林科学研究院, 北京 100102

3 中国建筑设计咨询公司绿色建筑研究院, 中国建筑研究院建筑节能与新能源工程中心, 北京 100120

4 西藏自治区那曲地区草原站, 那曲 852100

**摘要:**通过 3 年(2008—2010)的藏北高寒草地喷灌试验,研究了不同喷灌量对草地群落生产力和物种多样性的影响。结果表明,丰水年灌溉对藏北高寒草地的影响较小;而在相对于干旱年份灌溉对高寒草地生产力和物种多样性影响显著。喷灌条件下高寒草地生物量显著提高,最高增幅出现在高水(GS)样地中,达到 116%。喷灌明显促进物种重要值提高,其中灌木和阔叶杂草比例增加趋势更为明显。不同喷灌条件下优势物种相对重要值均有不同程度的降低,高水处理降低幅度最大。物种多样性方面,喷灌措施能够明显促进高寒草地 Simpson 指数和 Shannon-weiner 指数增加( $P < 0.05$ ), E. Pielou 均匀度指数无显著变化( $P > 0.05$ )。Shannon-weiner 指数与生物量之间存在显著正相关关系( $P < 0.05$ )。综上所述,未来降水增多的气候条件可以减少干旱对高寒草地带来的负面影响,有利于提高草地生产力和维持草地物种多样性,促进高寒草地畜牧业健康发展。

**关键词:**灌溉, 生产力, 物种多样性, 高寒草地, 藏北地区

## Irrigation effects on alpine grassland productivity and its species diversity in Northern Tibet

H. Ganjurjav<sup>1</sup>, DUAN Minjie<sup>2</sup>, GUO Yaqi<sup>3</sup>, ZHANG Weina<sup>1</sup>, LIANG Yan<sup>1</sup>, GAO Qingzhu<sup>1,\*</sup>, DANJIU Luobu<sup>4</sup>, BAIMA Yuzhen<sup>4</sup>, XIRAO Zhuoma<sup>4</sup>

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory for Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

2 Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing 100102, China

3 China Building Design Consultants CO. (CBDC)/China Architecture design & Research Group (CAG), Beijing 100120, China

4 Nagqu Grassland Station, Nagqu, Tibet Autonomous Region, 852100, China

**Abstract:** Productivity and species diversity are important indicators of the service functions and basic factors of stability in grassland ecosystems. Precipitation is a main limiting factor of grassland productivity. There is a positive correlation between precipitation and productivity. Species diversity increases under precipitation enhancement; the water availability of the plant community has an important effect on community structure, composition, and species diversity. An increase in soil moisture content not only affects the grassland plant communities directly but also improves soil nutrient availability to promote plant growth. However, drought could lead to a series of negative effects on grassland ecosystems. Therefore,

**基金项目:**国家科技支撑课题(2012BAC01B02);国家自然科学基金项目(31170460);西藏那曲地区与中国农业科学院合作项目

**收稿日期:**2014-03-31; **网络出版日期:**2015-04-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoqzh@ami.ac.cn

moisture is an important factor for productivity and species diversity, and it even affects the stability and sustainability of grassland ecosystems.

Northern Tibet has low ecosystem stability, so external disturbances, such as climate change and human activities, easily result in variation in the pattern, process, and function of ecosystems. In recent years, Northern Tibet has experienced warming and increased precipitation. Increased precipitation will affect grassland productivity and species diversity, and will even influence animal husbandry. As a main measure of the adaptation strategy for climate change, irrigation could be a reasonable pathway to redistribute and make full use of increased precipitation.

In this study, we conducted a growing season irrigation experiment in Northern Tibet (between 2008 and 2010) to simulate the precipitation enhancement in this area. We designed 4 irrigation gradients: CK (no irrigation), DS (low irrigation, plus 5% more than the ambient precipitation), ZS (moderate irrigation, plus 10% more than the ambient precipitation), and GS (high irrigation, plus 15% more than the ambient precipitation). We measured plant biomass, community composition, and species diversity under different amounts of irrigation. The results showed that irrigation had greater effects on alpine grassland productivity and species diversity in drought years than in wet years. Under the irrigation conditions, the grassland biomass increased significantly, and the highest increase was up to 116% in a high irrigation plot. Irrigation promoted the species importance values of alpine grasslands; in particular, the proportion of shrubs and broad-leaved forbs was increased. The proportion of dominant species decreased significantly under irrigation conditions, and the decrease was the highest in the high irrigation plot. The Simpson index and Shannon-Wiener index significantly increased under different amounts of irrigation ( $P < 0.05$ ). The E. Pielou evenness index was not significantly influenced by irrigation ( $P > 0.05$ ). There was a positive correlation between biomass and the Shannon-Wiener index ( $P < 0.05$ ). In short, we can project that grassland biomass and species diversity will increase under future precipitation enhancement; this will reduce the negative impact of drought in alpine grasslands and promote the sustainable development of animal husbandry in alpine grasslands.

**Key Words:** Irrigation; productivity; species diversity; alpine grassland; Northern Tibet.

生物多样性是全球变化的重点议题,而物种多样性作为生物多样性的主要研究层次备受关注。生产力与物种多样性是衡量草地生态系统服务功能的重要指标,是维持草地生态系统稳定发展的基础<sup>[1]</sup>。降水量是影响草地生产力的主要限制因子,降水量与生产力之间存在正相关关系<sup>[2,3]</sup>。降水量增加有利于草地群落内物种丰富度增加,群落水分有效性对于群落结构与组成和物种多样性具有重要的作用<sup>[4]</sup>。水分增加不仅对草地植物群落产生直接影响,还将通过增加土壤养分有效性间接促进植物生长发育<sup>[5]</sup>。而水分胁迫将会对草地生态系统产生一系列负面影响<sup>[6]</sup>。因此,水分条件对于维持草地生产力和物种多样性具有重要的作用,甚至影响草地生态系统的稳定性和可持续性。

藏北地区位于青藏高原腹地,西藏冈底斯山和念青唐古拉山以北的广阔地区,是我国多条江河的发源地,并且是我国主要的畜牧业基地之一<sup>[7]</sup>。藏北地区生态系统对气候变化和人类活动极其敏感。近年来,该地区气候发生了明显的变化,年平均温度升高幅度高于全国<sup>[8]</sup>。气候变化不仅影响全球温度,也将导致降水格局发生相应的变化;作为气候变化高敏感地区,藏北地区降水量将显著增加<sup>[9-11]</sup>。降水量的增加会导致草地生态系统土壤水分升高,进而影响草地生产力、群落物种组成、物种多样性等;这将导致草地生态系统结构与功能发生相应的改变<sup>[2,12]</sup>。草地灌溉作为主要的气候变化适应措施,可以模拟藏北地区未来降水增加,减少季节性干旱带来的负面影响<sup>[13]</sup>。本文开展藏北高寒草地生长季喷灌补水试验,探讨水分增加对草地生态系统生产力和物种多样性的影响,研究草地生产力与物种多样性之间的关系,有助于明确未来降水增多条件下高寒草地生态系统结构与功能的变化,确定气候变化对藏北高寒草地畜牧业带来的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地概况

试验区位于藏北地区安多县帕那镇,北纬 32°11',东经 91°41',海拔 4700 m。该地区是典型的亚寒带气候区,1966—2010 年,年平均气温为-2.6 °C,年平均降水量为 445 mm。2008—2010 年,试验区年均气温呈上升趋势,而降雨量呈逐渐减少的趋势(图 1)。该地区雨热同季,月平均温度在 5—9 月份高于 0 °C,90% 以上的降水也集中在该时段。2010 年较 2008 和 2009 年为相对干旱年份,年降水量为 417 mm;2008 和 2009 年为丰水年,降水量分别为 544 和 501 mm。2008—2010 年平均温度分别为-2.0 °C、-1.0 °C 和-1.1 °C;生长季(5—9 月)平均温度分别为 5.8 °C、6.4 °C 和 7.0 °C。试验区内,主要莎草科植物有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)和青藏苔草(*Carex moorcroftii*);早熟禾(*Poa pratensis*)和紫花针茅(*Stipa purpurea*)为主要的禾草类;主要的杂草类包括二裂萎陵菜(*Potentilla bifurca*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、小叶棘豆(*Oxytropis microphylla*)等。土壤类型为高寒草原土。样地于 2008 年开始围封灌溉。

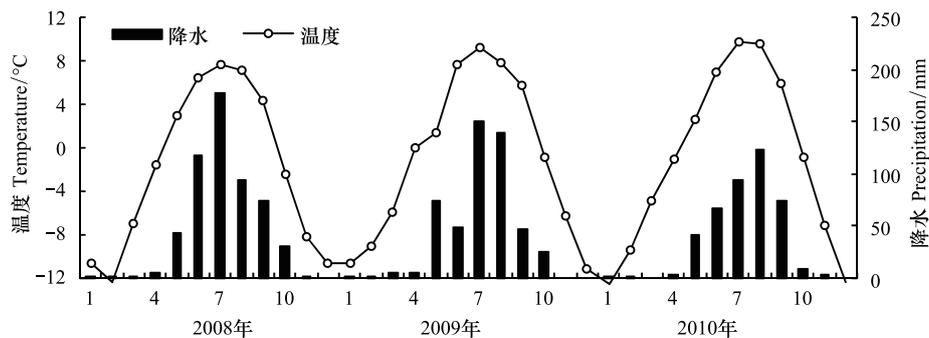


图 1 试验区年平均气温和年降水量(2008—2010)

Fig. 1 Mean annual air temperature and annual precipitation in experimental area

### 1.2 实验设计

采用输水带喷头对高寒草地进行灌溉。样地大小为 1.0 hm<sup>2</sup>,对照区(CK)、低水区(DS)、中水区(ZS)和高水区(GS)各 0.25 hm<sup>2</sup>。灌溉区内设置 3 条喷灌带,每条喷灌带安装两个喷头,共计 6 个喷头。每年 6—9 月,对草地进行 10 次喷灌,灌溉时间间隔为 10 d;灌水量分别为 6 m<sup>3</sup>/次(DS)、12 m<sup>3</sup>/次(ZS)和 18 m<sup>3</sup>/次(GS),整个生长季灌水量分别为 60 m<sup>3</sup>(DS)、120 m<sup>3</sup>(ZS)和 180 m<sup>3</sup>(GS),相当于增加降水量 24 mm(DS)、48 mm(ZS)和 72 mm(GS),大约是年平均降水量的 5%(DS)、10%(ZS)和 15%(GS)。

### 1.3 观测方法

生长季 6—9 月,采用标准收获法在面积为 0.5 m×0.5 m 的样方内,每月进行 1—2 次地上生物量测定,每个处理区设置 6 个样方。首先记录样方内所有物种的高度、盖度和频度等,之后将植物齐地面剪下装入信封内,带回实验室后置于 105 °C 烘箱中杀青 0.5 h,以 70 °C 恒温烘干至恒重,称干重。

### 1.4 数据计算

物种多样性采用 Shannon-Weiner 指数、Simpson 指数和 E. Pielou 均匀度指数表示,计算公式如下<sup>[14,15]</sup>:

重要值( $IV$ ) = (相对盖度 + 相对高度 + 相对频度) / 3

相对重要值( $P_i$ ) =  $IV / \sum IV$

Shannon-Weiner 指数  $H = -\sum P_i \lg(P_i)$

Simpson 指数  $D = 1 / \sum P_i^2$

E. Pielou 均匀度指数  $E = H / \ln S$

式中, $IV$  为重要值, $P_i$  为相对重要值, $H$  为 Shannon-Weiner 多样性指数, $D$  为 Simpson 指数, $E$  为 E. Pielou 均匀

度指数,  $S$  为群落内出现的物种数。

### 1.5 数据分析

采用 Access 2010 和 Excel 2010 对数据进行初步整理和计算。利用 IBM SPSS Statistics 19 软件中的单因素方差分析 (One Way ANOVA)、多因素方差分析 (Multi Way ANOVA) 重复测量方差分析 (Repeated Measures ANOVA) 对生物量和生物多样性数据进行差异显著性检验。采用回归分析方法 (Regression Analysis) 对生物量和物种多样性进行相关性分析。

## 2 研究结果

### 2.1 灌溉对草地地上生物量的影响

藏北高寒草地生物量存在显著的年际变化和季节变化 (图 2)。CK 样地年最高生物量从 2008 年的  $41.7 \text{ g/m}^2$  上升至 2010 年的  $94.7 \text{ g/m}^2$ 。在灌溉条件下生物量的变化趋势与 CK 相同, 均是逐年升高 (图 2a)。相比于 2008 年, 2010 年 DS 处理最高生物量增加 1.9 倍; ZS 的增幅与之接近; 而 GS 处理中更是增加了 2.5 倍。在不同处理间, 灌溉处理均显著高于对照。其中增幅最高年份为 2010 年, DS、ZS 和 GS 处理中年最高生物量的增幅分别达到 56.9%、52.0% 和 116.4%。不同灌溉条件下年最高生物量大小顺序为  $\text{GS} > \text{ZS} \approx \text{DS} > \text{CK}$ 。

除年际变化外, 藏北高寒草地地上生物量呈显著的季节变化规律。以 2010 年为例, 6 月草地生物量相对较低, CK 处理中只有  $21.2 \text{ g/m}^2$ ; 进入 7 月, 随着温度升高和降水增多, 草地植物生长迅速; 8 月达到最高值  $94.7 \text{ g/m}^2$ ; 9 月份有所下降。灌溉对草地生物量季节变化规律无显著影响, 均为 8 月达到最高值。6 月, 只有 GS 处理中草地生物量明显高于 CK ( $P < 0.05$ ), 其他处理无显著升高。7—9 月, 灌溉处理生物量均显著高于对照; 但各灌溉处理间的显著性关系无明显规律 (图 2b)。

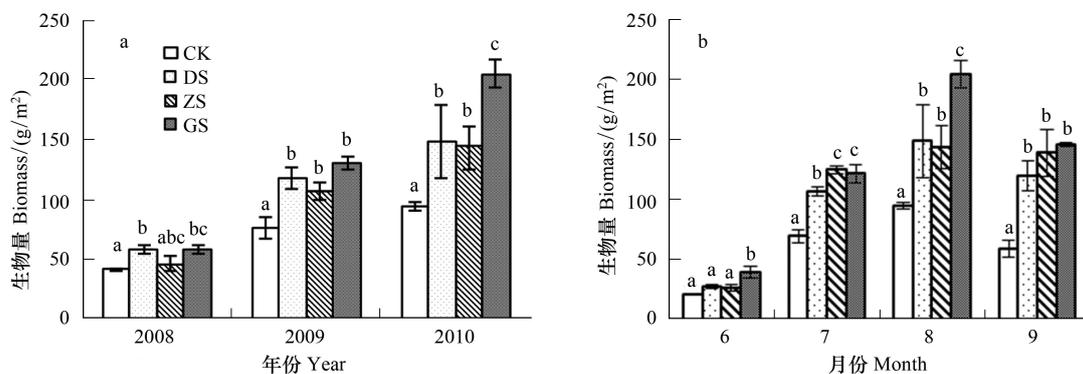


图 2 不同灌溉条件下高寒草地生物量年际 (2008—2010) 和季节变化 (2010 年)。

Fig. 2 Annual (2008—2010) and seasonal (2010) variation of alpine grassland biomass under different irrigation conditions

a: 年际变化, b: 2010 年季节变化; 不同小写字母代表相同时间内不同处理间差异显著; CK: 对照 (no irrigation), DS: 低水 (low irrigation), ZS: 中水 (moderate irrigation), GS: 高水 (high irrigation)

对不同灌溉条件下藏北高寒草地生物量进行显著性分析 (表 1), 发现草地生物量在不同处理、年份和月份之间均有显著性差异 ( $P < 0.001$ ); 处理和年、处理和月之间存在交互作用; 不同年份和不同月份之间也存在交互作用; 而处理、年和月三者之间无明显的交互影响 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2 灌溉对草地群落物种组成及其重要值的影响

灌溉对藏北高寒草地物种组成具有明显的影响。以 2010 年样地内群落物种组成为例 (表 2), 灌溉条件下样地中出现了 CK 中未出现的物种, 如白花枝子 (*Dracocephalum heterophyllum*)、独行菜 (*Lepidium apetalum*)、肉果草 (*Lancea tibetica*) 和短穗兔耳草 (*Lagotis glauca*) 等; 而在 CK 中出现的猪毛菜 (*Salsola collina*) 并未在灌溉处理中出现。不同灌溉量条件下物种组成也有差异, 总体上表现为 ZS 和 GS 处理的物种数多于 DS。物种重要值方面, 多数物种的重要值在灌溉条件下均有所提高, 如羊茅 (*Festuca ovina*)、垫状点地

梅 (*Androsa cetapete*)、唐松草 (*Thalictrum aquilegifolium*) 等; 也有部分植物重要值有下降的趋势, 如矮小蓝钟花 (*Cyananthus incanus*) 等; 而灌溉对高山嵩草、早熟禾等物种的重要值并无明显的影响。不同灌溉强度下, 多数物种重要值随着灌溉量的增加而升高, 但藏黄芪 (*Astragalus tibetanus*) 却与之相反, 其物种重要值随着灌溉量的增加而降低。总体而言, 高寒草地物种重要值在灌溉条件下均明显升高, 升高幅度分别达到 11% (DS)、24% (ZS) 和 57% (GS)。

在藏北高寒草地以禾草类植物紫花针茅、早熟禾和银洽草 (*Koeleria argentea*), 莎草科植物高山嵩草, 杂草类植物二裂萎陵菜、矮火绒草、小叶棘豆为主, 以上植物重要值之和在整个群落中所占比例达到 62%。而在灌溉条件下, 上述物种重要值之和明显降低, 分别占整个群落物种重要值的 49% (DS)、44% (ZS) 和 40% (GS)。在灌溉条件下, 莎草科物种重要值所占比例无明显变化, 而禾本科植物比例减少, 杂类草相对重要值明显增加; 这主要取决于金露梅 (*Potentilla fruticosa*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*) 和唐松草等植物相对重要值的增加。与 CK 相比, DS 处理莎草和禾草的重要值有所降低, 杂草重要值明显升高; 而 ZS 和 GS 处理中各植物类群重要值均显著提高。较高的灌水量有利于高寒草地各植物类群的生长, 对杂类草的促进作用尤为明显。

表 2 不同灌溉条件下高寒草地群落物种组成及其重要值 (2010 年)

Table 2 Species composition and their importance values of alpine grassland plant communities under different irrigation treatments in 2010

植物类群 Plant group	物种 Species	CK	DS	ZS	GS
莎草类 Sedges	高山嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i> C.B. Clarke	0.57	0.58	0.58	0.56
	青藏苔草 <i>Carex moorcroftii</i> Falc ex Boott.	0.07	—	0.19	0.29
禾草类 Grasses	鹅观草 <i>Roegneria tsukushiensis</i> (Honda) B. Rong Lu, C. Yen & J. L. Yang.	0.36	0.48	0.53	0.48
	羊茅 <i>Festuca ovina</i> Linn.	0.09	0.08	0.46	0.52
	银洽草 <i>Koeleria argentea</i> Griseb	0.56	0.08	0.23	0.63
	早熟禾 <i>Poa pratensis</i> Linn.	0.53	0.54	0.43	0.52
	紫花针茅 <i>Stipa purpurea</i> Griseb.	0.60	0.69	0.68	0.67
杂草类 Forbs	白花枝子 <i>Dracocephalum heterophyllum</i> Benth.	—	—	0.18	0.18
	白亮独活 <i>Heracleum candicans</i> Wall Ex DC.	0.20	0.22	0.06	0.42
	翠雀 <i>Dephinium grandiflorum</i> Linn.	0.22	—	0.19	0.20
	垫状点地梅 <i>Androsa cetapete</i> Maxim.	0.16	0.16	0.36	0.36
	独行菜 <i>Lepidium apetalum</i> Willdenow.	—	0.06	0.15	—
	星状凤毛菊 <i>Saussurea stella</i> Maxim.	0.10	0.44	0.23	0.42
	藏黄芪 <i>Astragalus tibetanus</i> Benth.	0.19	0.38	0.02	0.06
	矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i> (Hook. F. et Thoms. ) Hand-Mazz.	0.42	0.41	0.40	0.41
	小叶棘豆 <i>Oxytropis microphylla</i> (Pal. l) DC.	0.47	0.41	0.42	0.43
	金莲花 <i>Trollius chinensis</i> Bunge	—	—	—	0.06
金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	0.07	—	0.43	0.41	

表 1 不同灌溉条件下高寒草地地上生物量年际和季节变化显著性

Table 1 The significant differences of annual and seasonal variation of alpine grassland biomass under different irrigation conditions

模型 Model	F 值 F value	显著性 Sig.
处理 Treatment	18.267	<0.001
年 Year	101.640	<0.001
月 Month	107.975	<0.001
处理 * 年 Treatment * Year	4.936	<0.001
处理 * 月 Treatment * Month	3.653	0.001
年 * 月 Year * Month	14.527	<0.001
处理 * 年 * 月 Treatment * Year * Month	1.310	0.248

续表

植物类群 Plant group	物种 Species	CK	DS	ZS	GS
	矮小蓝钟花 <i>Cyananthus incanus</i> Hook. F. et Thoms. var. <i>parvus</i> Marq.	0.23	—	—	0.19
	龙胆 <i>Gentiana scabra</i> Bunge	0.08	—	—	—
	马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i> Linn.	—	—	0.05	—
	柔茎马先蒿 <i>Pedicularis elliotii</i> T soong.	—	—	0.08	0.26
	高原毛茛 <i>Ranunculus tangutica</i> (Maxim.) Ovcz	0.06	—	0.05	0.36
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> H and. -Mazz.	0.05	0.40	0.18	0.52
	肉果草 <i>Lancea tibetica</i> Hook. .f. et Thoms	—	0.37	0.06	0.18
	唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i> Linn. var. <i>sibiricum</i> Regel et Tiling	0.06	0.40	0.44	0.22
	短穗兔耳草 <i>Lagotis glauca</i> Maxim.	—	0.06	0.21	—
	垫状驼绒藜 <i>Ceratoides compacta</i> (Losinsk.) Tsien et C.G.Ma	—	0.05	0.06	0.03
	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> Linn.	0.45	0.43	0.42	0.44
	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	0.19	—	—	—
	高山紫菀 <i>Aster alpinus</i> Linn.	0.07	0.20	0.05	0.25

注:“—”代表此物种在该处理中未出现;CK:对照(no irrigation),DS:低水(low irrigation),ZS:中水(moderate irrigation),GS:高水(high irrigation)

不同植物类群物种相对重要值存在明显的年际变化(图3)。2008年,CK样地中莎草所占比例为19%,到2010年下降为11%;DS和ZS处理中莎草的比例2009年高于2008和2010年;GS处理变化趋势与CK相同;总体而言,在藏北高寒草地中莎草科物种比例低于20%。禾本科植物在CK和DS群落中所占比例在3年内一直维持在30%左右;ZS处理中禾草比例在3年内有所下降;GS处理中呈现增加的趋势;不同处理中禾草所占比例均为30%—40%之间。在藏北高寒草地生态系统中杂类草所占比例最高,各处理中均高于50%。CK处理中杂草所占比例无明显年际变化;而各灌溉处理年际波动较大,达到10%左右。

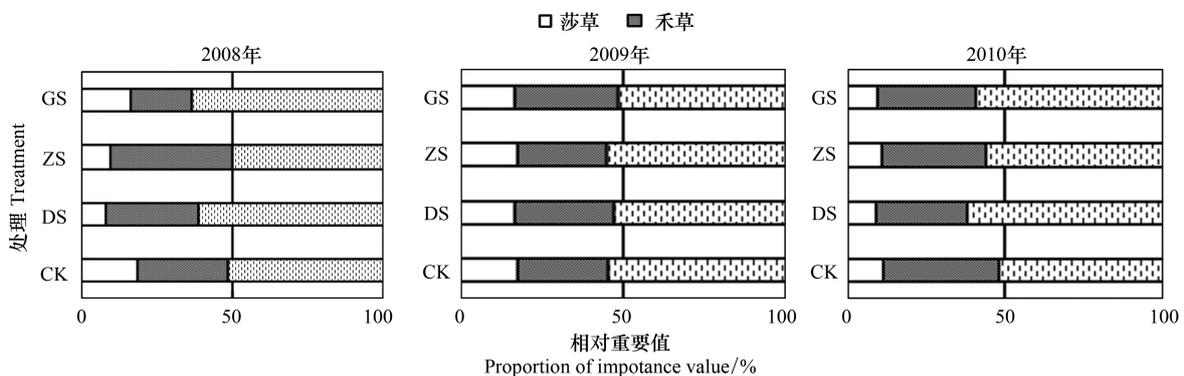


图3 不同灌溉条件下藏北高寒草地物种相对重要值年际变化

Fig. 3 Annual variation of the Pi in alpine grassland under different irrigation conditions

### 2.3 灌溉对草地物种多样性的影响

藏北高寒草地物种多样性对不同灌溉措施具有明显的响应(图4)。2008年,各处理中物种多样性均无明显差异。2009年,Simpson指数和Shannon-weiner指数在DS和GS处理中显著降低,ZS处理中无明显变化;E. Pielou均匀度指数在GS处理中显著降低;2010年,随着灌溉量的增加,Simpson指数和Shannon-weiner指数显著升高,GS处理显著高于其他处理;灌溉对E. Pielou均匀度指数无显著影响( $P > 0.05$ )。总体而言,灌溉对高寒草地物种多样性的影响存在年际波动性,无明显的规律可循。

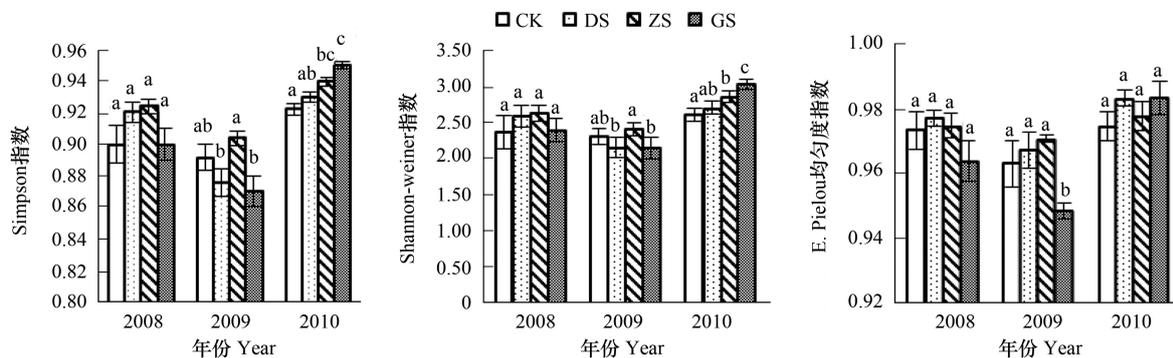


图4 不同灌溉量对高寒草地物种多样性的影响

Fig. 4 Variation of plant diversity of alpine grassland community under different irrigation conditions

a; Simpson index; b; Shannon-weiner index; c; E. Pielou evenness index

藏北高寒草地地上生物量可以解释 Shannon-weiner 指数的变化,两者间存在显著正相关( $P < 0.05$ ,图5);生物量与 Simpson 指数和 E. Pielou 均匀度指数之间无显著相关性( $P > 0.05$ )。尽管两者之间存在相关性,但生物量并非是决定物种多样性的唯一因素,生物量只能解释 33%的物种多样性变化,因此草地生物量并不能作为判断物种多样性多寡的唯一依据。

### 3 讨论

水分是影响草地类型分布、物种组成以及生产力的主要因素<sup>[16]</sup>。在全球气候变化条件下,降水格局发生改变,必将对草地生产力和群落结构产生影响,从而导致草地生态系统结构与功能发生相应的变化。在青藏高原地区,由于其特殊的环境条件,导致草地生态系统对水热因子变化更为敏感<sup>[17]</sup>。水分增加往往对草地生态系统产生正效应,灌溉或降水增加条件下草地生产力将显著提高<sup>[18-20]</sup>。本文中,不同喷灌量均对藏北高寒草地地上生物量具有促进作用,并且随着喷灌量增加以及喷灌年限的延长,该作用愈加明显。范永刚等<sup>[21]</sup>研究表明灌溉措施对新疆巴音布鲁克草原生物量具有明显的促进作用,显著高于自由放牧和围封禁牧样地。高天明等<sup>[22]</sup>发现作为退化草地恢复措施,灌溉不仅对草地生物量具有促进作用,并且能够提高土壤肥力和改善土壤种子库;对不同灌溉量而言,并非灌溉量越大越有利于草地植物生长,适当的灌溉量不仅能够增加草地生物量,并且能有效节约水资源;而灌溉量过高不利于种子萌发。水分添加有助于草地生产力提高,因此从生产力的角度出发,认为未来降水增多有利于维持草地畜牧业健康有序发展<sup>[11]</sup>。

物种重要值是评价物种在生物群落中相对作用的综合性指标,通过重要值可以确定物种在群落中的地位,了解各物种相互关系<sup>[23,24]</sup>。本研究中,灌溉明显促进各类植物重要值,对杂类草的促进作用尤为明显,杂草相对重要值明显增加;其最主要原因为以金露梅为主的灌木植物和蒲公英、肉果草等阔叶植物比例增加所致。由于灌溉导致土壤含水量增加,改善土壤环境,从而使吸水性较强的喜湿植物大量增加,有可能促使以多年生草本为主的草地向灌丛方向发生演替,加速草地灌丛化。王长庭等<sup>[25]</sup>研究表明,增加降水 20%对高寒草甸禾草类植物无明显影响,而增加降水 40%条件下禾草比例显著降低。沈振西等<sup>[26]</sup>认为增减降雨对矮嵩草草甸各类植物均无显著影响,但在缺水年份耐旱的禾草比例增加,而根系较浅的杂草受水分胁迫影响较大,从而导致其生长受限。这也是本研究中相对于旱年份(2010年),在灌溉条件下对水分变化相对敏感的杂草比

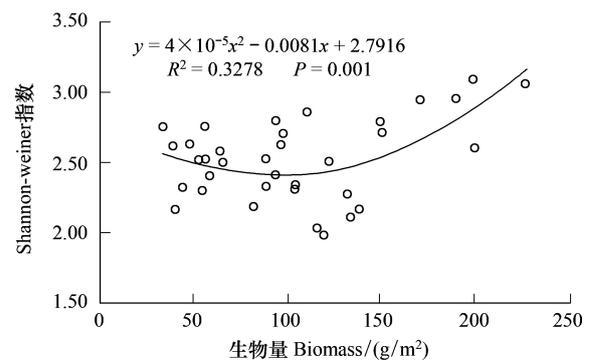


图5 藏北高寒草地地上生物量与物种多样性之间的关系

Fig. 5 Correlation between biomass and species diversity in alpine grassland

例有明显提高的原因。本研究中,灌溉条件下优势物种比例呈降低趋势,这与 Kardol 等<sup>[27]</sup>在美国弃耕地的研究结果相反,其原因可能是由于该区域降水量相比于藏北地区较为充沛,无水分胁迫所致。喷灌对高寒草地各类物种生长均有促进作用,有利于草地生态系统稳定和草地畜牧业发展;但其优势物种比例降低,杂草比例增加所造成的影响具有不确定性,应进一步研究探讨。

物种多样性可以促进生态系统稳定性,有助于生态系统良性运转,保障其组织和功能<sup>[28]</sup>。草地生态系统中,物种多样性可以反映草地基况,有助于整个草地生态系统的稳定健康发展<sup>[29]</sup>。降水格局显著影响藏北高寒草地物种多样性分布,降水增加有利于物种多样性升高<sup>[30]</sup>。赵哈林等<sup>[31]</sup>的研究结果也表明气候的暖湿化趋势利于物种多样性增加。本研究中,丰水年高寒草地物种多样性受水分添加的影响较小;干旱年份中喷灌措施明显增加物种多样性,并且随着喷灌量的增加其效应愈加明显。目前,物种多样性与生物量之间的关系尚无明确的定论,其原因为每个生态系统所处的环境以及其自身的组成和功能组织均存在差异性,并且人类活动和气候因素也是影响两者之间关系的关键因素<sup>[32]</sup>。本文研究发现生物量与生物多样性之间存在正相关关系,但生物量仅能解释 33% 的物种多样性变异,因此生物量并不能作为确定生态系统物种多样性的唯一因素。

#### 4 结论

本文综合研究表明,在干旱年份,喷灌对藏北高寒草地生产力和物种多样性影响显著,而丰水年份其影响较小。喷灌明显促进藏北高寒草地生物量积累;增加灌木和阔叶杂草比例;促进物种多样性升高。物种多样性和生物量之间存在显著相关关系,生物量升高促进物种多样性增加。未来降水增多可以减少干旱对高寒草地带来的不利影响,有助于提高草地生产力和维持草地物种多样性,有利于高寒草地畜牧业健康发展。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379 ( 6567 ): 718-720.
- [ 2 ] Ma W H, Yang Y H, He J S, Zeng H, Fang J Y. Above-and belowground biomass in relation to environmental factors in temperate grasslands, Inner Mongolia. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2008, 51 ( 3 ): 263-270.
- [ 3 ] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 施慧秋. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响. *植物生态学报*, 2010, 34 ( 10 ): 1155-1164.
- [ 4 ] Yang H J, Wu M Y, Liu W X, Zhang Z, Zhang N L, Wan S Q. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 17 ( 1 ): 452-465.
- [ 5 ] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 涂文霞, 张青青. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响. *植物生态学报*, 2014, 38 ( 2 ): 167-177.
- [ 6 ] Xia J Y, Niu S L, Wan S Q. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two *hydrologically* contrasting growing seasons in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15 ( 6 ): 1544-1556.
- [ 7 ] 高清竹, 江村旺扎, 李玉娥, 万运帆. 藏北地区草地退化遥感监测与生态功能区划. 北京: 气象出版社, 2006: 1-11.
- [ 8 ] Piao S L, Fang J Y, Ji W, Guo Q H, Ke J H, Tao S. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15 ( 2 ): 219-226.
- [ 9 ] Gao Q Z, Li Y, Wan Y F, Qin X B, Jiangcun W Z, Liu Y H. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet. *Climatic Change*. 2009, 97 ( 3-4 ): 515-528.
- [ 10 ] 杨凯, 林而达, 高清竹, 万运帆, 江村旺扎, 王宝山, 李文福. 气候变化对藏北地区草地生产力的影响模拟. *生态学杂志*, 2010, 29 ( 7 ): 1469-1476.
- [ 11 ] 张核真, 路红亚, 洪健昌, 马鹏飞. 藏西北地区气候变化及其对草地畜牧业的影响. *干旱区研究*, 2013, 30 ( 2 ): 308-314.
- [ 12 ] 高述保. 民勤荒漠灌丛草地植物群落动态与降水量的关系研究. *草业科学*, 2007, 24 ( 7 ): 25-29.
- [ 13 ] Gao Q Z, Li Y, Xu H M, Wan Y F, Jiangcun W Z. Adaptation strategies of climate variability impacts on alpine grassland ecosystems in Tibetan Plateau. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2014, 19 ( 2 ): 199-209.
- [ 14 ] 段敏杰, 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 郭亚奇, 旦久罗布, 洛桑加措. 放牧对藏北紫花针茅高寒草原植物群落特征的影响. *生态学报*, 2010, 30 ( 14 ): 3892-3900.

- [15] 宋成刚,张法伟,刘吉宏,孙建文,王建雷,李英年.青海湖东北岸草甸化草原植物群落特征及多样性分析.草业科学,2011,28(7):1352-1356.
- [16] Weltzin JF, Loik ME, Schwinning S, Williams DG, Fay PA, Haddad BM, Harte J, Huxman TE, Knapp AK, Lin GH, Pockman WT, Shaw MR, Small EE, Smith MD, Smith SD, Tissue DT, Zak JC. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [17] 张文江,高志强.青藏高原中东部植被覆盖对水热条件的响应研究.地理科学进展,2005,24(5):13-22.
- [18] 蒋德明,周全来,阿拉木萨,唐毅,押田敏雄.科尔沁沙地植被生产力对模拟增加降水和氮沉降的响应.生态学杂志,2011,30(6):1070-1074.
- [19] 刘安花,李凤霞,薛晓娟,颜亮东,李英年,张法伟.灌溉对高寒草原植被群落的影响试验.安徽农业科学,2008,36(25):11073-11075.
- [20] 王长庭,王启基,沈振西,景增春,王文颖.高寒矮嵩草草甸群落植物多样性和初级生产力对模拟降水的响应.西北植物学报,2003,23(10):1713-1718.
- [21] 范永刚,胡玉昆,李凯辉,于建梅,王鑫.不同干扰对高寒草原群落物种多样性和生物量的影响.干旱区研究,2008,25(4):531-536.
- [22] 高天明,张瑞强,刘昭,郝瑞.灌溉对退化草地的恢复作用.节水灌溉,2009,(8):26-28.
- [23] 何兴东,高玉葆,刘惠芬.重要值的改进及其在羊草群落分类中的应用.植物研究,2004,24(4):466-472.
- [24] 贺山峰,蒋德明,李晓兰,阿拉木萨.小叶锦鸡儿固沙群落草本种群重要值与生态位的研究.干旱区资源与环境,2007,21(10):150-155.
- [25] 王长庭,王启基,沈振西,彭红春,李海英.模拟降水对高寒矮嵩草草甸群落影响的初步研究.草业学报,2003,12(2):25-29.
- [26] 沈振西,周兴民,陈佐忠,周华坤.高寒矮嵩草草甸植物类群对模拟降水和施氮的响应.植物生态学报,2002,26(3):288-294.
- [27] Kardol P, Campy C E, Souza L, Norby R J, Weltzin J F, Classen A T. Climate change effects on plant biomass alter dominance patterns and community evenness in an experimental old-field ecosystem. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2676-2687.
- [28] Tilman D. Causes, consequences and ethics of biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783):208-211.
- [29] 郑淑华,郭慧清,赵萌莉,韩国栋,王堃.草甸草原草地基况与生物多样性关系的研究.中国草地学报,2007,29(4):9-14.
- [30] 武建双,李晓佳,沈振西,张宪洲,石培礼,余成群,王景升,周宇庭.藏北高寒草地样带物种多样性沿降水梯度的分布格局.草业学报,2012,21(3):17-25.
- [31] 赵哈林,大黑俊哉,李玉霖,左小安,黄刚,周瑞莲.人类放牧活动与气候变化对科尔沁沙质草地植物多样性的影响.草业学报,2008,17(5):1-8.
- [32] Vance-Chalcraft H D, Willig M, Cox S B, Lugo A E, Scatena F N. Relationship between aboveground biomass and multiple measures of biodiversity in subtropical forest of Puerto Rico. *Biotropica*, 2010, 42(3): 290-299.