

黄土高原半干旱区云雾山封禁草原 30 年 植被恢复对气候变化的响应

程 杰¹, 呼天明^{1,*}, 程积民²

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 植被是区域气候与环境的综合反映, 研究特定地区草地植被与气候变化的关系, 寻找影响植被变化的关键因子, 是植被重建和生态环境恢复的前提。利用 1957—2008 年的气候数据和 1982—2008 年的植被定位监测资料, 分析了黄土高原半干旱区的宁夏云雾山植被动态变化规律及其与温度和降水的关系。结果表明: 51a 来, 该区年平均温度明显升高, 而年平均降水量总体呈减少趋势, 显示黄土高原地区气候暖干化趋势明显。统计分析表明, 研究区年平均温度对植被的重要值年际变化有极显著影响 ($P < 0.01$), 而年降水量与植被的重要值呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 表明气候持续干旱化对该区植被的生长有较大影响, 该区降水的多寡是直接影响植被生长优劣的决定性因子, 改善区域水分状况和封禁是推进植被恢复与重建的主要措施。

关键词: 黄土高原; 半干旱区; 云雾山; 植被重要值; 气候变化

Responses of vegetation restoration to climate change during the past 30 years in enclosed grassland of Yunwu Mountain in semi-arid region of the Loess Plateau

CHENG Jie¹, HU Tianming^{1,*}, CHENG Jimin²

1 College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract: Vegetation is a complex reflection of regional climate and environment. Determining the relationship between grassland and climate changes and the key factor effecting on vegetation change plays an important role on vegetation and ecological environment restoration. In this study, the climate data (rainfall and temperature) during 1957—2008, and vegetation data during 1982—2008 were analyzed to evaluate the relationship between vegetation change and temperature and rainfall in semi-arid grassland of Yunwu Mountain in Ningxia in the Loess Plateau. The results showed that: During 1957—2008, an upward trend in annual average temperature, and a downward trend of annual rainfall volume indicated that climate in the Loess Plateau evidently trends warm and dry. Statistical analysis showed that annual average temperature took significantly ($P < 0.01$) impact on variation of vegetation importance value, and there is an evidently ($P < 0.01$) positive correlation between annual rainfall and vegetation importance value. Overall, consistently drying climate has a serious effect on vegetation growth, and rainfall volume is a key factor effecting on vegetation growth in that region. Therefore, improving regional water condition and enclosing grassland are efficient ways to accelerate vegetation restoration and re-vegetation in semi-arid region of the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; semi-arid region; Yunwu Mountain; vegetation importance value; climate change

黄土高原地区大部分处于干旱半干旱区, 自然降水稀少, 土壤水分不足, 天然植被退化严重, 物种多样性

基金项目: 陕西省科技厅资助项目 (2008K02-03); 中国科学院重要方向资助项目 (KZCX2-YW-441, KZCX2-YW-149); 国家重点基础研究发展计划 973 资助项目 (2007CB106803); 国家自然科学基金重点资助项目 (40730631); 农业部“现代农业产业技术体系建设专项”资金资助

收稿日期: 2009-08-25; **修订日期:** 2009-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hutianming@126.com

锐减,植被生产力低下;人工植被种植面积大,土壤干层形成明显,自然更新能力差,生态环境非常脆弱,在气候和人为多重因素的干扰和作用下,极易引起生态严重退化,且在严酷的自然条件下很难逆转和恢复,成为全球气候变化的敏感区域,气候变化和人类活动是引起植被退化与土壤演变的 2 个重要因素,气候变化也是引发地表覆盖变化的主要原因之一^[1],目前,植被指数的动态变化及其对气候变化的响应受到广泛关注^[2-3]。尤其定量描述区域尺度上植被演变动态及其与气候因子的相互关系是全球变化研究的重要内容^[4-7]。而地表植被指数在一定程度上能表征地表覆盖状况,诸多学者利用时间序列,结合同期温度和降水资料,研究了中国主要植被类型的变化及其对气候变化的响应^[8-9]。近 50a 来,黄土高原半干旱区多次出现干旱、暴雨、沙尘暴和低温等气候变化异常年份,必然对植被和土壤的发展产生重要影响,尤其是气候变暖和持续干旱严重影响天然植被的生长与自然分布。然而,黄土高原植被生长、演替、分布状况及其与气候因子之间的关系研究,在农业和林业领域有一定进展,但对草地长期封禁保护与气候的变化关系研究报导较少,特别是半干旱区 30 年草地恢复对气候变化的响应研究均属空白。因此,研究该区域植被恢复对气候变化的响应过程,寻找影响区域植被生长和分布的主导因子,对促进同类型区植被恢复和重建具有重要的科学价值。

1 自然概况

云雾山草原自然保护区建于 1982 年,位于宁夏固原东北部,E106°24'—106°28',N36°13'—36°19',属典型的暖温带干旱半干旱季风气候,四季分明,季节交替明显;海拔 1800—2100 m,气候干燥,雨量少而集中,蒸发强烈;冬寒长,夏热短,温差大,日照长,光能丰富;冬春季风多,无霜期较短。年均气温 6—7℃,最热月 7 月,气温在 22—25℃ 之间,最冷月 1 月,平均最低气温 -14℃。保护区最大的降水量为 599 mm(1970 年),日最大降水量约为 48mm,年均降水量 411.5mm,降水量较小的冬季占全年降水量的 2.6%,是一年中降水量最少的季节;春季占全年降水量的 17.8%,因而冬春季节为干旱季节;夏秋季节占全年降水量的 79.6%,是雨量集中的季节,蒸发量 1330—1640mm。草原保护区有种子植物 51 科、131 属、186 种,主要是以草本植物为主,且多为旱生和中旱生,建群种主要有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、大针茅(*S. grandis*),优势种为百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、星毛萎陵菜(*Potentilla acaulis*)等,而在保护区的 42 个群丛中,以本氏针茅为主的群丛占 35.7%。

2 研究方法

试验自 1982—2008 年,在每年的 4—10 月份及每月的 20—25 日,选择保护完整、生长良好的典型样地,采用定期调查与长期定位监测相结合的方法布设样方,每一样方面积为 1m × 1m,每次重复 6 次,测定地上生物量及其重要值。另外,从 1993—2008 年在同一条件下,对封禁草地和未封禁草地禾本科植物本氏针茅、豆科植物达乌里胡枝子(*Lespedeza davuica*)、菊科植物阿尔太狗娃花(*Heteropappus altatias*)、瑞香科植物百里香群落的露水凝结量进行测定,样方数为 20 个。

生物量测定:在各样地随机选择 3 个 1 m²的样方采用齐地面刈割法收获牧草,装入布袋置于(65 ± 5)℃ 的烘箱,烘至恒重,进行测产。

盖度测定:采用样方法设计 10cm × 10cm 的 100 个等距离网格,测定每一网格内牧草的分盖度,计算总盖度。

高度测定:在测定样方内随机选择植物,对样方内密度在 10 株以上的植株,测定 10 株自然高度,取平均值。对样方内密度不足 10 株的物种,全部测定取平均值。如有生殖枝,测其生殖枝自然高度,取平均值。

多度测定:统计在 1 m²样方内各种植物的株数,按科属分类记录。

物种丰富度测定:记录在 1 m²样方内所有植物的种数。

露水凝结量测定:采用 2 种方法,一种是对距地面生长高度在 20cm 以上的植物,用直径为 50cm 的漏斗形特制金属板,水平放置在距地面不同高度处收集露水。另一种是对 20cm 以下的低丛生植物,采用滤纸吸湿称重法,每年在植物生长季节测定,每月测定 3d,每次选择晴天自 19:00 至翌日 08:00 利用电子天平(精确到 0.01 g)进行称重,每 2h 称重 1 次,重复 6 次。

气象数据 1957—1981 年来自固原气象局日观测基本气候资料,1982—2008 年为固原生态站定位测定数据,植被、土壤水分等数据为样地实际调查测定数据。

数据处理采用 DPS 和 SPSS 13.0 进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 植物优势种分布对降水 and 气温的响应

3.1.1 降水和气温变化

50a 来黄土高原半干旱区的宁夏云雾山年降水量总体上呈现出明显减少的趋势(图 1),降幅为 7.9 mm/10 a,51a 降水量共减少 40.31 mm,降水量的阶段性变化趋势明显;从图 1 看出,降雨量距平的变化过程分为 3 个阶段,20 世纪 60 年代中后期和 80 年代中期为两个多雨时段,据有关资料记载(固原县志)该地区以本氏针茅为优势种的草原植被生长旺盛;70 年代至 80 年代后期和 90 年代中后期,降雨量呈波浪式增减阶段,增减差异较大,从总体分析,一直至今为降水量偏少时段,此阶段为草原植被破坏最严重的时期;尤其在近 10a 来(1999—2008 年)平均降水量仅为 392.85mm,比 51a 平均值(440.71 mm)减少 47.86 mm,下降 12.2%,草原植被的破坏已达到极限,为此,国家在西部实施了退耕还林还草政策,但由于生态环境极度脆弱,植被的局部恢复治理成效虽然非常显著,而生态环境整体恶化的趋势还未得到遏制,使局部已恢复的植被受周边脆弱环境的影响,植物蒸腾与大气环流很难形成有效降雨。致使目前该区处于 50 年代后的相对少雨时段,降水减少趋势非常明显,如果降水量按照此种趋势继续降低,干旱现象便从而加剧,将不利于该区植被的恢复生长。

50a 来,黄土高原半干旱区的宁夏云雾山年平均温度呈现明显上升趋势(图 2),其变化幅度为 5.0—8.4℃。1984 年达最低点,为 5.0℃,1997—1998 年发生了近百年最强的厄尔尼诺现象^[10],受其影响,1995 年最高,达到 8.4℃。1985—2007 年(23a)比 1957—1984 年(27a),23a 平均温度上升了约 0.9℃,增温幅度为 0.4℃/10 a。资料表明,在我国东部,近 50a 平均温度上升了约 1.9℃,增温幅度为 0.38℃/10 a^[11],表明该区属于全球变暖的响应区域,并且增温幅度大于全国同期平均水平^[11]。黄土高原半干旱区宁夏云雾山气温的变化 51a 平均为 6.7℃,其变化可分为两个阶段,1957—1985 年距平均值呈下降趋势;1986—2007 年距平均值呈上升趋势。随着气候的干旱化,天然草原植被的建群种和优势种也相应出现了变化,在典型草原地带以本氏针茅为优势种集中连片分布的面积已明显缩小,在宁夏固原地区万亩以上的天然草地由 20 世纪 60 年代达 260 处,到 80 年代中后期受人为破坏和气候变化的多重影响减少到不足百处,同时,还出现森林草原地带的植物,例如绣线菊(*Spiraea* sp),大披针苔草(*Carex Lanceolata*)等,大针茅也由 70 年代的偶见种已发展到目前的优势种,还有原本是在荒漠草原生长的狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、短花针茅(*S. breviflora*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)等目前已大量进入典型草原地带,常与优势种本氏针茅伴生。

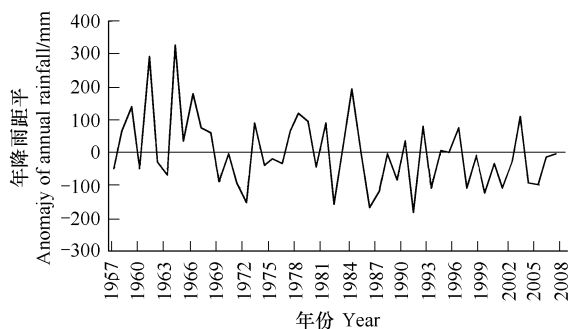


图 1 黄土高原半干旱区云雾山 51a 降雨量距平变化

Fig. 1 Variation of anomaly of Annual rainfall of Yunwu Mountain in semi-arid of the Loess Plateau in the past 51 years

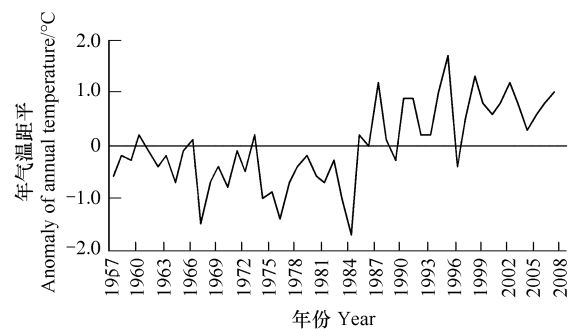


图 2 黄土高原半干旱区云雾山 51a 气温距平变化

Fig. 2 Variation of anomaly temperature of Yunwu Mountain in semi-arid of the Loess Plateau in the past 51 years

另外,由于受全球气候变化的影响,从黄土高原半干旱区宁夏云雾山 50 多年的降雨强度与降雨次数变化趋势分析看出(图 3),总降雨次数的变化趋势,1957—1986 年呈波浪式发展,变化幅度较大,但降雨量下降不

明显,20 世纪 90 年代以后,受人为活动、干旱等因素的影响,降雨次数减少,50a 来降雨次数出现的最低点恰好是 1997 年和 2004 年,而且比 50a 平均降雨次数 134 次分别降低 25% 和 24%,同时,降雨量也呈明显的下降趋势。从不同降雨强度的频数变化看, $\geq 0.1\text{mm}$ 降雨次数的变化趋势与总降雨次数的变化趋势基本相同,90 年代后呈明显下降趋势,尤其 $\geq 5\text{mm}$ 的降雨次数 50 多年平均为 25.6 次,在 60 年代、70 年代和 80 年代基本上每 10a 低于平均降雨次数的年数为 3a,自 90 年代以后,每 10a 低于平均降雨次数的年份为 6a; $\geq 10\text{mm}$ 的降雨次数 50 多年平均为 13.5 次,在 60 年代、70 年代和 80 年代基本上是每 10a 低于平均降雨次数的年数为 3—5a,自 90 年代以后,每 10a 低于平均降雨次数的年数为 8a;而 $\geq 25\text{mm}$ 降雨次数的变化无明显的下降趋势。本研究进一步表明有效降雨次数减少,是引起该区干旱的重要原因。

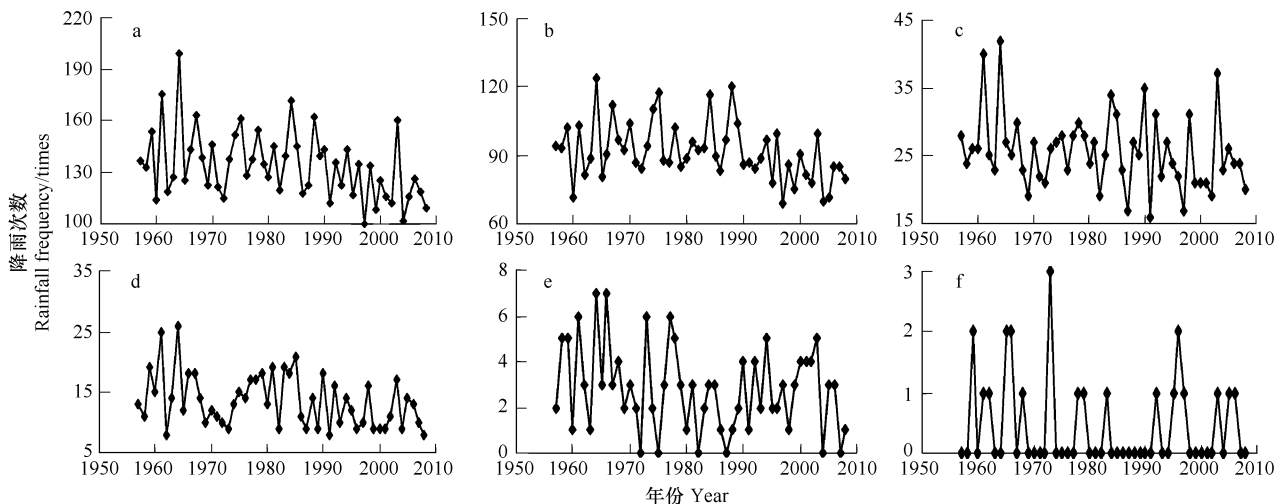


图 3 半干旱区云雾山 51a 不同降雨强度与次数变化

Fig. 3 Variation of rainfall intensity and frequency of Yunwu Mountain in Semi-arid region in the past 51 years

a, 51a 总降雨次数; b, $\geq 0.1\text{mm}$ 降雨次数; c, $\geq 5\text{mm}$ 降雨次数; d, $\geq 10\text{mm}$ 降雨次数; e, $\geq 25\text{mm}$ 降雨次数; f, $\geq 50\text{mm}$ 降雨次数

3.1.2 封禁草地物种变化与降水的响应

从 20 世纪 80 年代初期在我国西部建立最早的典型草原自然保护区看出,通过近 30a 的定位封禁试验,草地群落结构与物种多样性发生了极大的变化(图 4、图 5),在草地封禁试验的初期,封禁草原的面积为 2300hm^2 ,草原群落出现的植物仅有 53 种,其中灌木和半灌木占 8%,草本占 92%,多数以旱生植物组成,在物种多样性分布的最小年份 1982 年平均为 5(种/ m^2)。随封禁时间的延长物种多样性在逐渐增加,到封禁的第 15 年物种多样性达到了峰值,即 1996 年平均为 33(种/ m^2),此时,降雨量为平水年,比 50a 平均值增加 25.7mm,草原群落的面积已扩大到 10000hm^2 ,出现的植物已达到 186 种,其中灌木和半灌木占 12%,草本占 88%,多数以中生和中旱生植物组成,比自由放牧草地(CK)物种多样性增加了 2.72 倍,同时,还出现大量森林草原地带的灌木和草本植物。随封禁时间的延长,物种多样性出现下降趋势,原因是进入 90 年代后期,由于受全球气候变化的影响,有效降雨次数减少,干旱频率增加,草原长期封禁,加速土壤水分的消耗,是多年已形成的枯草层厚度达 2.5—4.5cm,成为草地土壤表面的重要保护层,受干旱的影响枯草层分解缓慢,尤其是在春季气温适宜时,多数牧草种子以枯草层为床快速发芽,发芽的幼苗受气温干旱和枯草层水分不足的影响,幼苗根系迟迟不能进入土壤,最终悬空于枯草层中死亡,这是抑制草地物种多样性增加与自然繁殖更新的主要原因。另外,未封禁草地(自由式放牧草地)受气候干旱的影响,物种多样性的变化幅度较大,物种多样性分布的最小年份 1982 年平均为 4.6(种/ m^2),最大 1996 年平均为 10.6(种/ m^2),草地群落出现的植物仅为 50 余种,且多以旱生植物组成,常以偶见种出现,建群种与优势种不甚明显。这充分表明水分是影响该区物种多样性的重要因子,其次是封禁时间。

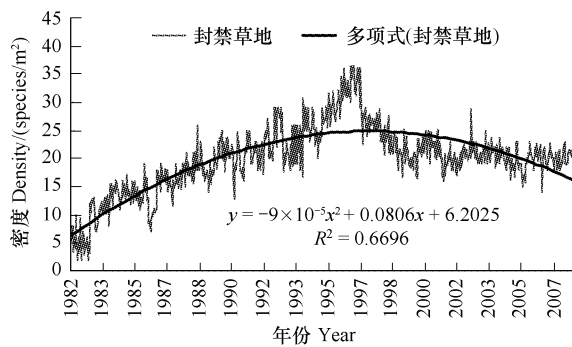


图4 云雾山 26a 封禁草地物种密度变化

Fig. 4 Variation of species density in enclosed grassland of Yunwu Mountain in the past 26 years

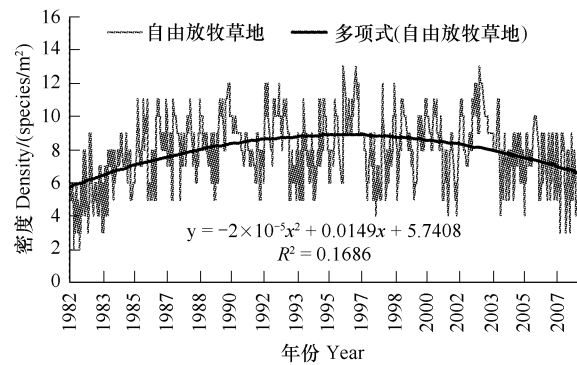


图5 云雾山 26a 自由放牧草地物种密度变化

Fig. 5 Variation of species density in grazing grassland of Yunwu Mountain in the past 26 years

3.1.3 草地自然封禁与局地气候调节变化

该区植物的生长与生物量形成,除降雨量外,露水也是不可低估的一个重要因素,尤其在干旱、半干旱缺水地区,露水在草地生长的水量平衡、养分运移和能量循环过程中发挥着不可替代的作用。据课题组 1993—2008 年在同一条件下,对封禁草地和未封禁草地禾本科本氏针茅、豆科达乌里胡枝子、菊科阿尔太狗娃花、瑞香科百里香的试验结果表明,从图 6、图 7 可以看出,封禁草地改变了植物生长的局地环境条件,尤其是水分的变化更为明显,16a 封禁草地和未封禁草地不同年份植物间露水凝结量的变化差异显著,其露水凝结量排序为豆科 > 菊科 > 瑞香科 > 禾本科,封禁草地露水凝结量平均为禾本科 0.065、豆科 0.401、菊科 0.267、瑞香科 0.224 (mm/d),比未封禁草地均提高了 20.0%—46.2%。禾本科露水凝结量最低,一方面是禾本科草叶面光滑垂直分布,露水在叶面不易浮着,另一方面是植株高大,遇风易掉落;豆科、菊科和瑞香科露水凝结量较高,原因是这些叶面粗糙,叶层重截,叶片匍匐,有利于露水在叶面浮着。另外,封禁草地覆盖度高,草层立体重截,土壤表面温度提高,在 01:00 时到 05:00 时当气温最低时,土壤表面与空气温度差距大,易形成露水。而未封禁草地覆盖度低,草地表面斑块状裸露,土壤表面与空气温度差距相对较小,仅能形成较少露水。尤其是连续干旱长达 233d 的 1999 年(属历史之最),露水对草地起到了重要的保护作用,封禁草地虽然生物量降到最低,但物种的保存率和成活率仍然达 43%—56%,而未封禁草地不足 10%。由此可知,通过草地封禁措施可增加植物和土壤表面凝结水,调节空气湿度,改变区域小气候,缓解因干旱对草地造成的不利影响。据问晓梅研究,露水一方面可以延长植物种子的寿命,被植被叶片直接吸收而降低内部水分的亏缺,同时降低叶片蒸腾的水分损失,推迟植物叶片的萎蔫,增加区域小环境的湿度^[12];另一方面,露水可以直接凝结在土壤表

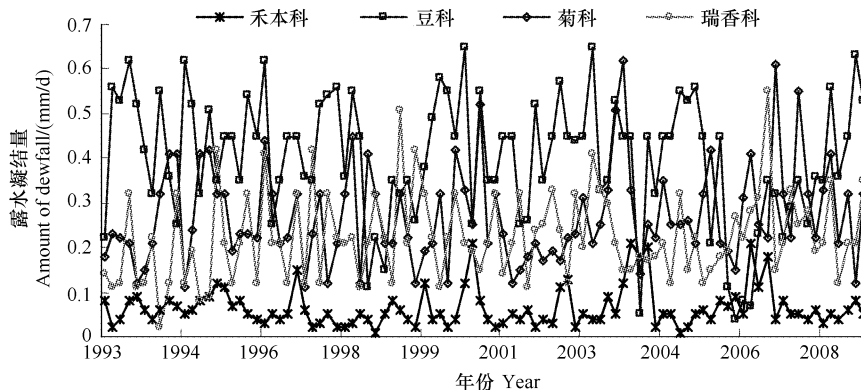


图6 封禁草地 1993—2008 年 4 种植物露水凝结量变化

Fig. 6 Annual dewfall of 4 vegetations in enclosed grassland during 1993—2008

面,或形成露滴滴落到土壤中,作为额外的水资源被土壤吸收^[13-15],参与土壤和动植物的水分平衡过程。而且土壤露水易于被植物吸收,其效率远远高于一般降水^[15-16],并缓解了土壤-植物-大气统一体对水分的需求程度^[17]。该区凝结在植物表面的露水有四种作用:即掉落地面被土壤直接吸收;掉落到枯草层表面被枯草层吸收;被植物叶片或茎秆直接吸收,降低植物体内水分的亏缺;减少叶片或茎秆蒸腾的水分损失,调节植物体内水分平衡。因为露水是乡土植物生存的主要水源,对于干旱地区植物生长具有重要的意义。

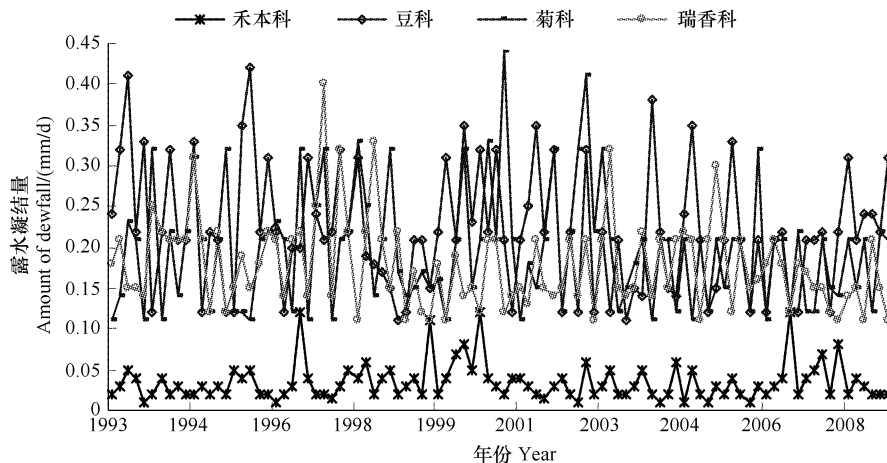


图7 未封禁草地 1993—2008 年 4 种植物露水凝结量变化

Fig. 7 Annual dewfall of 4 vegetations in grazing grassland during 1993—2008

3.2 牧草重要值对降雨和气温的响应

通过调查访问与长期定位试验测定表明,受降雨、气温及其人类活动的多重因素影响,自 20 世纪 60 年代到 21 世纪初期,经过五个阶段,该区草地的建群种和优势种重要值与气候的变化差异显著,不同年代平均草地建群种和优势种的重要值与降雨量,通过指数函数($y = ae^{bx}$)统计分析表明,草地重要值与降水量呈显著相关($P < 0.01$),其本氏针茅草地群落为 $y = 0.7784e^{0.0078x}$, $r^2 = 0.4696$;厚穗冰草 (*Agropyron dasystachys*) 群落为 $y = 3 \times 10^{-5}e^{0.0267x}$, $r^2 = 0.7573$;硬质早熟禾 (*Poa sphondylodes*) 群落为 $y = 0.0001e^{0.0231x}$, $r^2 = 0.5918$ 。随着不同年代降水量的减少,试验区其周边草地群落建群种和优势种的重要值变化见表 1,尤其是以建群种本氏针茅、厚穗冰草、硬质早熟禾等为主的一些中生或中旱生植物,对水分的适应十分敏感,在水分充足的局部地段,由于环境条件的变化,植物个体生长旺盛,自然繁殖更新能力强,群落演替比干旱环境条件下可提前 3—5a;而优势种阿尔泰狗娃花、猪毛蒿 (*A. scoparis*) 在水分条件适宜的环境下,生长旺盛,个体分蘖能力强。相反,年平均温度与优势种的重要值变化呈显著的负相关关系 ($P < 0.01$),本氏针茅草地群落为 $y = 1293.7e^{-0.5901x}$, $r^2 = 0.5578$;厚穗冰草群落为 $y = 93737e^{-1.4958x}$, $r^2 = 0.4906$;硬质早熟禾群落为 $y = 5627e^{-1.081x}$, $r^2 = 0.2677$,随着温度的增加,优势种的重要值均表现出下降的趋势。同时,从多年气候资料的统计分析表明,该区气温的变化主要表现在春夏季节,尤其是增温幅度最明显表现在 3—8 月份,而该地区植物生长的旺盛期又集中在这一范围内,因此,增温时间与植物生长相一致,进一步表明温度也是该区域植物生长不可忽略的一个主要制约因子。该地区草地建群种和优势种的重要值与降水呈正相关,而与温度呈负相关关系,表明该区域水热是草地建群种和优势种生长年间变化的重要影响因子,降水的多寡与温度的高低是决定植物生长状况的关键。

4 讨论与结论

4.1 目前气候变暖已成为毋庸置疑的事实,受全球气候变暖影响最明显的生态系统是高纬度和高海拔地区^[18],气候变化已经或正在对全球的生态系统和生物多样性产生着显著影响,包括使生境退化或丧失,物种灭绝速度加快,物种分布范围发生变化等。有关研究表明,20 世纪以来,地球表面的平均气温升高 0.6 °C,尤

表 1 半干旱区云雾山草地建群种和优势种植物重要值的均值与标准差

Table 1 Means and Std of Vegetational Importance value of constructive species and dominant species of Yunwu Mountain in Semi-arid region

物种 Species	20 世纪 60 年代 The 1960s of last century	20 世纪 70 年代 The 1970s of last century	20 世纪 80 年代 The 1980s of last century	20 世纪 90 年代 The 1990s of last century	21 世纪初期 The initial of 21st century
本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i>	54.2 ± 13.2	30.9 ± 12.3	23.3 ± 2.3	28.5 ± 8.5	16.5 ± 3.4
大针茅 <i>S. grandis</i>	33.1 ± 16.4	25.8 ± 9.8	5.1 ± 1.3	11.3 ± 9.6	26.4 ± 5.9
厚穗冰草 <i>Agropyron dasystachys</i>	22.3 ± 10.8	19.0 ± 11.2	4.5 ± 2.2	2.1 ± 0.6	1.7 ± 0.7
扁穗冰草 <i>A. cristatum</i>	26.5 ± 14.6	24.5 ± 10.2	3.2 ± 1.8	2.4 ± 1.1	1.9 ± 0.9
香茅草 <i>Hierochloe odorata</i>	22.3 ± 9.5	12.0 ± 5.2	3.3 ± 3.0	2.1 ± 0.6	3.2 ± 1.1
硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>	25.6 ± 10.2	14.9 ± 10.2	3.2 ± 1.4	1.4 ± 0.5	2.3 ± 1.2
散穗早熟禾 <i>P. subfastigiata</i>	25.2 ± 17.2	12.7 ± 1.4	3.9 ± 0.9	1.8 ± 1.0	1.2 ± 0.9
直茎点地梅 <i>Androsace erecta</i>	31.2 ± 15.2	23.1 ± 10.2	2.3 ± 0.9	0.8 ± 0.6	0.6 ± 0.4
白颖苔草 <i>Carex rigescens</i>	26.3 ± 9.8	20.6 ± 12.3	1.8 ± 1.4	1.0 ± 0.4	0.7 ± 0.4
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	30.9 ± 15.7	16.2 ± 7.6	1.2 ± 1.0	1.3 ± 0.4	0.8 ± 0.8
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	32.0 ± 13.2	20.6 ± 8.3	4.1 ± 1.7	1.8 ± 0.7	1.7 ± 1.1
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altatias</i>	33.2 ± 9.9	20.8 ± 8.3	2.5 ± 1.1	1.9 ± 0.7	2.3 ± 0.7
星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i>	33.2 ± 17.2	24.1 ± 10.3	1.8 ± 1.6	1.4 ± 0.7	0.9 ± 0.7
中华委陵菜 <i>P. chinensis</i>	13.6 ± 5.3	9.2 ± 2.3	1.4 ± 0.7	0.8 ± 0.3	1.4 ± 0.7
多裂委陵菜 <i>P. multifida</i>	20.3 ± 7.5	10.1 ± 8.9	1.6 ± 0.8	0.9 ± 0.5	1.5 ± 0.9
二裂委陵菜 <i>P. bifurca</i>	22.3 ± 10.3	12.7 ± 7.5	2.5 ± 1.3	1.0 ± 0.7	1.1 ± 0.4
铁秆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	32.6 ± 12.1	23.2 ± 5.6	2.6 ± 3.2	0.9 ± 0.5	0.1 ± 0.4
冷蒿 <i>A. frigida</i>	11.3 ± 2.4	10.1 ± 1.6	2.5 ± 1.4	1.7 ± 1.0	1.1 ± 0.7
茵陈蒿 <i>A. capillaris</i>	12.1 ± 5.4	12.6 ± 2.6	1.7 ± 1.3	0.9 ± 0.5	0.9 ± 0.5
猪毛蒿 <i>A. scoparis</i>	22.0 ± 8.2	15.2 ± 8.5	2.9 ± 0.9	1.9 ± 1.1	1.4 ± 0.2
芡蒿 <i>A. giraldii</i>	32.8 ± 12.4	17.5 ± 5.6	1.1 ± 0.9	0.9 ± 0.4	1.2 ± 0.5

注:重要值 = (相对丰富度 + 相对高度 + 相对生物量 + 相对覆盖度)/4

其是 1979—1998 年近 20a 地球表面的平均温度升高了 0.19°C [19-20]。据预测,在未来的 30—40a 内,由于 CO_2 等温室气体的浓度将比目前高 1 倍,这种浓度足以使地球温度上升 $(3 \pm 1.5)^{\circ}\text{C}$ [19]。本研究通过在海拔高度 1800—2100 m 地区的研究,50a 气温变化的分析得出,在近 23a 来平均温度上升了约 0.9°C ,增温幅度为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,这种变化趋势和其他学者的研究结果相一致。随着全球气候的变化,特别是气温的上升,致使陆地草地生态系统的结构和功能也会随之发生变化。尤其是草原生态系统对气候变暖的动态响应在干旱和半干旱的生态过渡带表现更为明显 [19]。这是因为干旱和半干旱地区的生态过渡带非常脆弱,生态过渡带内的物种都处于其分布区的边缘地带,对气候的变化异常敏感 [19,21]。生态过渡带的时空变化常常是以优势物种的变化为特征 [19,21]。但是,对许多生态过渡带来说,很少知道环境条件的变化对共存的优势物种产生影响的机理 [19,22]。

4.2 黄土高原半干旱区的云雾山生态环境脆弱,物种组成和重要值对气候的变化非常敏感,其原因主要是该区地处干旱与半湿润区的交界处,许多植物的生长既适应干旱与半湿润区的环境,又适宜各自生长对应的环境条件,为此,该区的物种组成与生长均处在对环境条件适应的边缘,若气候稍有变化,则可能会引起生态系统的波动。该区生长的建群种本氏针茅、厚穗冰草、硬质早熟禾密度的变化受降水的影响,在 400—500mm 的范围平均密度分别为 28、23、15 株/ m^2 ,300—400mm 的范围平均密度分别为 14、18、8 株/ m^2 。但从气温的变化看均呈现上升趋势,其主要的优势植物本氏针茅和大针茅的密度也均呈上升的趋势,因为本氏针茅和大针茅为喜温植物,随着气候的变暖,本氏针茅和大针茅也逐渐处于优势。另外,还有一些苔草类植物随气温的上升,其密度呈下降趋势,这是由于植物的生物生态学特性所决定,表现为对温度变化的不同响应。但草地植被经营管理方式不同,生态系统的格局变化均有较大差异,例如:封禁草地在降雨量最好的年份,群落组成其

平均密度达 33 种/ m^2 ,而未封禁草地仅为 10.6 种/ m^2 ,表明人类活动和改良保护措施在同样气候波动的条件下对其生态系统、物种分布格局也具有较大影响。

4.3 露水在植物生长过程中扮演着重要的角色,对半干旱地区的云雾山植物生长具有非常重要的意义。露水一方面可被植物叶片直接吸收而降低内部水分亏缺,减少叶片蒸腾的水分损失,改善植物的水分状态;另一方面,露水可直接凝结在土壤表面或当露水浓重时,露滴可由植株表面滴落到土壤中,参与土壤水分平衡过程^[23]。本研究表明草地露水凝结可直接改变局地小气候,提高草地植物的保存率,尤其是在持续干旱环境条件下,这一现象更为明显。16 年封禁草地和未封禁草地植物间露水凝结量变化效果显著,其排序为豆科 > 菊科 > 瑞香科 > 禾本科,封禁草地露水凝结量平均为禾本科 0.065、豆科 0.401、菊科 0.267、瑞香科 0.224 (mm/d),比未封禁草地均提高了 20.0%—46.2%,表明自然封禁草地地面植被覆盖度较大,土壤水分和土壤表面湿度提高,不仅可改善环境微局小气候,促进植物间露水凝结率,增加和提高植物叶片的吸水率,而且能促进草地重要值的大幅度提高,这一作用尤其在半干旱地区显得更加重要。

4.4 本试验表明降水量和温度对天然草地重要值的影响较为明显,从 20 世纪的 60 年代到 21 世纪的初期,51a 降水量共减少 40.31 mm,降幅为 7.9 mm/(10 a);温度升高 0.9 °C,升幅为 0.19 °C/(10 a),其草地重要值的变化趋势随降水量的减少和温度的升高,出现了较明显的下降趋势,蒿类植物最为明显,其次为菊科和禾本科植物。这种变化趋势和其他学者关于草地生态系统对气候要素响应的结论相一致^[24-26]。因此,全球气候变化与人为干扰等因素叠加在一起,必然会加剧植被生态系统生物多样性的丧失,而两者的相互作用又为预测未来生物多样性变化增加了诸多不确定性。本地区水资源贫乏,降水量的减少将不利于牧草的生长,致使草地自然繁殖更新能力下降,容易引起物种减少、多样性降低,草地植被退化。其次,该地区属于典型的暖温带地区,气温的升高也将影响到部分牧草的生长发育。因此,进一步分析环境因子对生产力的调控作用成为全球变化对陆地生态系统影响研究的重要内容,降水是生态系统生产力形成(尤其是处于干旱半干旱地区的草地生态系统)的重要驱动因子,进一步认识生态系统生产力与降水的响应对于预测气候变化及生态系统的影响具有至关重要的作用,面对全球变暖和可能发生的物种灭绝,必须对植被生态系统采取保护措施,尽量避免人类干扰对生物多样性的影响和自然生态系统的破坏。

References:

- [1] Lambin E F, Strahler H. Indicators of land-cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 2099-2119.
- [2] Gao Z Q, Liu J Y. The study on driving factors and models of NDVI change based on remote sensing and GIS in China. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(2): 155-164.
- [3] Zhang J, Ge J P, Guo Q X. The relation between the change of NDVI of the main vegetational types and the climatic factors in thenortheast of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 522-527.
- [4] Fan J L, Li G C, Zhang Y. Dynamic changes of vegetation in agriculture-animal husbandry ecotone on north foot of Yinshan Mountain with relation to climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(10): 1528-1532.
- [5] Li X B, Shi P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. *Journal of Plant Ecology*, 2000, 24(3): 379-382.
- [6] Liu L L, Xiao F J. Spatial-temporal correlations of NDVI with precipitation and temperature in Yellow River Basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 477-481.
- [7] Zheng X Q, Yao H, Wang X M. Researches on the global climate change issued in the journal science since 1990s: a review. *Ecology and Environment*, 2005, 14(3): 422-428.
- [8] Sun H Y, Wang C Y, Niu Z, Bukhosor, Li B. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(2): 204-209.
- [9] Gao Q, Yu M, Zhang X S, Guan F. Dynamic modelling of northeast china transect responses to global change: a regional vegetation model driven by remote sensing information. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9): 800-810.
- [10] Liu D Y, Fu N, Fan J L. Dynamic change of vegetation cover and its reponse to climate change in recent 20 years in Tianjin area. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 798-801.
- [11] Zhao Y J, Song G H, Xu M E, Liu J J. Analysis of local climate changes in Tianjin coastal area in last 50 years. *Meteorological Science and*

- Technology, 2004, 32(2): 86-89.
- [12] Wen X M, Zhang Q, Wang S, Zhang J. Research advance about characteristic of dewfall on land surface and its ecological and climatic effects. *Arid Meteorology*, 2008, 26(4): 5-11.
- [13] Groten S M E. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of burkina faso. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1495-1515.
- [14] Chen H S, Kang Y H. Condensed vapor and its role in the ecological environment of shapotou region. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 1992, 6(2): 63-72.
- [15] Chen H, Kang M Y, Fan Y D. Relationship between dynamic change of vegetation cover and climate factors in farming-pastoral zone of north china. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(5): 54-57.
- [16] Guo Z R, Liu J H. An overview on soil condensate in arid and semiarid regions in China. *Arid Zone Research*, 2005, 22(4): 576-580.
- [17] Zhang Q, Wang S. Processes of water transfer over land surface in arid and semi-arid region of China. *Arid Meteorology*, 2007, 25(2): 3-6.
- [18] IPCC Climate change: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. United Kingdom and New York; Cambridge University Press, Cambridge, 2007: 102-106.
- [19] Liu Q P, Lin Z S. Gray analysis on responses of desert/ grassland biome transition zone to global warming — A case of the desert/ grassland biome transition zone in New Mexico. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(7): 756-762.
- [20] Cao M K, Prince S, Li K. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [21] Gosz J R, Sharpe P J H. Broad-scale concepts for interactions of climate, topography, and biota at biome transitions. *Landscape Ecology*, 1989, 3(3/4): 229-243.
- [22] Peters D P C. Plant species dominance at a grassland-shrub-land ecotone: an individual-based gap dynamics model of herbaceous and woody species. *Ecological Modeling*, 2002, 152(1): 5-32.
- [23] Yan B X, Wang Y Y, Xu Z G, Dong S B. Study on the dew condensation in the marsh ecosystem in Sanjiang Plain. *Wetland Science*, 2004, 2(2): 58-62.
- [24] He Y F, Zhao M X, Wang J X, Zhang H S. Response of grassland productivity to climate change in the farming-pasturing interlocked area of Inner Mongolia: case study of Duolun County. *Arid Meteorology*, 2008, 26(2): 84-89.
- [25] Li G, Huang G B. The climate change and grassland productivity response to it in the northern farming-pastoral area — taking dingxi county as an example. *Grassland of China*, 2005, 27(1): 7-11.
- [26] Su Z S, Cheng X G, Huang F, Yang S P. Response of grassland productivity to climate change in farming-pasturing interlaced area of Ningxia. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(3): 430-435.

参考文献:

- [2] 高志强, 刘纪远. 基于遥感和 GIS 的中国植被指数变化的驱动因子分析及模型研究. *气候与环境研究*, 2000, 5(2): 155-164.
- [3] 张军, 葛剑平, 国庆喜. 中国东北地区主要植被类型 NDVI 变化与气候因子的关系. *生态学报*, 2001, 21(4): 522-527.
- [4] 范锦龙, 李贵才, 张艳. 阴山北麓农牧交错带植被变化及其对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1528-1532.
- [5] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382.
- [6] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 477-481.
- [7] 郑新奇, 姚慧, 王筱明. 20 世纪 90 年代以来《Science》关于全球气候变化研究述评. *生态环境*, 2005, 14(3): 422-428.
- [8] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据. *遥感学报*, 1998, 2(2): 204-209.
- [9] 高琼, 喻梅, 张新时, 关烽. 中国东北样带对全球变化响应的动态模拟: 一个遥感信息驱动的区域植被模型. *植物学报*, 1997, 39(9): 800-810.
- [10] 刘德义, 傅宁, 范锦龙. 近 20 年天津地区植被变化及其对气候变化的响应. *生态环境*, 2008, 17(2): 798-801.
- [11] 赵玉洁, 宋国辉, 徐明娥, 刘建军. 天津滨海新区 50 年局地气候变化特征. *气象科技*, 2004, 32(2): 86-89.
- [12] 问晓梅, 张强, 王胜, 张杰. 陆面露水特征及生态气候效应的研究进展. *干旱气象*, 2008, 26(4): 5-11.
- [14] 陈荷生, 康跃虎. 沙坡头地区凝结水及其在生态环境中的意义. *干旱区资源与环境*, 1992, 6(2): 63-72.
- [15] 陈海, 康慕谊, 范一大. 北方农牧交错带植被覆盖的动态变化及其与气候因子关系. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(5): 54-57.
- [16] 郭占荣, 刘建辉. 中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述. *干旱区研究*, 2005, 22(4): 576-580.
- [17] 张强, 王胜. 关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究. *干旱气象*, 2007, 25(2): 3-6.
- [19] 刘钦普, 林振山. 气候变暖与荒漠草原过渡带植物动态响应灰色分析. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 756-762.
- [23] 阎百兴, 王毅勇, 徐治国, 董树斌. 三江平原沼泽生态系统中露水凝结研究. *湿地科学*, 2004, 2(2): 58-62.
- [24] 何玉斐, 赵明旭, 王金祥, 张宏升. 内蒙古农牧交错带草地生产力对气候要素的响应. *干旱气象*, 2008, 26(2): 84-89.
- [25] 李广, 黄高宝. 北方农牧交错带气候变化及草地生产力的响应——以甘肃省定西县为例. *中国草地*, 2005, 27(1): 7-11.
- [26] 苏战胜, 陈晓光, 黄峰, 杨淑萍. 宁夏农牧交错区(盐池)草地生产力对气候变化的响应. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 430-435.