

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

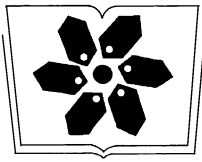
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110161531

陈军, 王玉辉. 1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局. 生态学报, 2012, 32(22): 6925-6935.

Chen J, Wang Y H. Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 6925-6935.

1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局

陈 军^{1,2}, 王玉辉^{1,*}

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:弄清全球变化背景下不同地区降水格局的变化对科学理解气候变化及其影响具有重要意义。苏尼特左旗荒漠草原是温带干旱半干旱地区的典型荒漠草原, 对气候变化, 特别是降水变化非常敏感。利用 1956—2009 年的日降水资料探讨了苏尼特左旗荒漠草原降水格局的变化规律, 以为揭示气候变化的影响机制提供依据。结果表明, 该地区年均降水量为 191.9 mm, 年际变化剧烈, 变异系数达 26.63%; 年均降水日数为 63.8 d, 变异系数 16.9%。生长季降水占全年的 85%, 但各月变异系数均 > 50%; 降水日数占全年的 63%。年和生长季的各月降水以中等降水量、弱降水日数为主, 中等强度以上降水事件较少。近 50 a 来, 年和生长季的降水量、降水日数与各等级降水事件均呈下降趋势, 年降水减少的原因在于中等降水事件的减少、生长季降水减少的原因在于弱降水事件的减少。年降水减少将影响草地的土壤水分与植物返青; 而生长季降水减少将直接影响草地固碳。气候变化背景下年与生长季降水的减少将进一步加剧该地区干旱程度并影响植物的生长发育, 从而直接威胁到草地畜牧业的发展。

关键词:降水格局; 变化; 荒漠草原; 苏尼特左旗; 内蒙古

Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009

CHEN Jun^{1,2}, WANG Yuhui^{1,*}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: At present, precipitation pattern has taken significantly change under the effect of global change. To find out how precipitation pattern changes in different regions is very important to understand climate change and its consequences. The change of precipitation pattern includes variations of precipitation amounts, precipitation days, inter-precipitation periods and precipitation intensity. Desert steppe was the typical vegetation type in temperate arid and semi-arid regions, which was very sensitive to climate change, especially precipitation pattern changes. Precipitation was the main limiting factor in desert steppe ecosystem, whose variability determined the basic functions of this ecosystem. So it was in urgent need to find precipitation pattern variations in Chinese desert steppe under global change background.

In this study, precipitation data from 1956 to 2009 in typical desert steppe of Sunite Left Banner in Inner Mongolia were collected and precipitation amounts, precipitation days, inter-precipitation periods and precipitation intensity were analyzed. Among them, Mann-Kendall method was used to analyze precipitation tendency and test significance, least square method was used to calculate the tendency values. The result showed that (1) from 1956 to 2009, the whole tendency of the annual precipitation amount and growing season precipitation amount were decreased, but the change tendency was different with the time. Among them, precipitation increased in 1970s but decreased in 1960s, 1980s and 1990s, then

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951303); 国家自然科学基金项目(40971123)

收稿日期:2011-10-16; **修订日期:**2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhwang@ibcas.ac.cn

increased in 2000s. Annual mean precipitation amount was 191.9 mm, the range value was 100—250 mm, and the tendency value was -8.5 mm/10a. Amount of precipitation in the growing season accounted for 85% of the whole year's, which mainly occurred from June to August, and the variation coefficient of each month was above 50%. (2) Both mean annual precipitation days and short inter-precipitation period decreased but long inter-precipitation period increased from 1956 to 2009. Annual mean precipitation days were 63.8 days, the range value was 50—80 d, the tendency value was -2.5 d/10a and its variation coefficient was 16.9%. Number of precipitation days in the growing season accounted for 63% of the whole year's, and the variability of each month was above 28%, and tendency value was -3 d/10a. (3) Precipitation intensity was distinguished as six different types: light, relatively light, moderate, relatively heavy, heavy and extremely heavy. Precipitation events were dominated by moderate precipitation amounts and light rainfall days, and there were few events above moderate precipitation level, no matter in the whole year or each month of the growing season. Moderate precipitation accounted for 32% of annual precipitation amounts, and light precipitation accounted for 68% of the annual precipitation days. Precipitation decrease in the whole year mainly resulted from moderate precipitation events, while the decrease in precipitation during the growing season was primarily due to light precipitation events. In generally, from 1956 to 2009, mean annual precipitation amounts, precipitation days and the different precipitation types in the whole year and the growing season all decreased, particularly there was a consistent decline of annual precipitation days since 1990s.

Decreasing annual precipitation would affect soil moisture and plant reviving, while decreasing precipitation in the growing season would directly affect carbon sequestration in the grasslands. Under the scenarios of climate change, reduced precipitation in the whole year and growing season would further exacerbate the degree of drought in this region and affect plant growth and development, and thereby to threat the development of grassland animal husbandry.

Key Words: precipitation pattern; change; desert steppe; Sunite Left Banner; Inner Mongolia

人类活动导致的温室效应已经引起全球和区域降水格局的变化^[1]。研究表明,21 世纪全球降水量将增加 7%^[2],雨日频率将减少,干旱间期会延长^[3-4]。降水格局的显著变化将影响植物的生理生态过程,进而影响陆地生态系统^[5],如中国陆地生态系统净初级生产力的年际变化与降水的年际波动显著相关^[6],中国北方温带草原地上生物量与年降水量呈正相关^[7]。因此,弄清全球变化背景下不同地区,尤其是对气候变化敏感的干旱半干旱区降水格局的变化,对科学理解气候变化及其影响具有重要意义。

降水是干旱半干旱区生态系统功能的最主要限制因子,降水格局变化可能较 CO_2 浓度变化、温度变化及其交互作用对生态系统的影响更为强烈^[2]。除年、季降水事件分布对植物生长过程具有重要影响外,降水频率和强度也是调控植物生产的重要因子^[8-9];持续连旱将引起并增加植物的干旱胁迫^[10]。然而,现有干旱半干旱区降水格局的研究主要集中在年、季和月等较长时间尺度的平均状况^[10-13],关于日降水格局特征的研究还很少;特别是已有研究更多关注的是极端降水事件特征及其变化趋势^[14-15],对小降水事件的研究较少,尤其是小降水事件在生长季的分配至今未见报道^[16-17]。

干旱半干旱区的陆地生态系统对气候变化,特别是降水变化异常敏感。研究干旱半干旱区降水格局变化对于揭示全球变化背景下气候变化的影响机制具有重要意义。内蒙古草原是全球典型的中纬度半干旱温带草地生态类型,为我国北方最为重要的绿色生态屏障,分布面积约为 $11.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[18]。荒漠草原是内蒙古草原的重要组成部分,占全区草地面积的 10.7%^[19],是草原区向荒漠区过渡的草原生态类型,稳定性较差。由于生态环境的严酷性和气候的波动性,荒漠草原十分脆弱,具有发生荒漠化的潜在危险,一旦彻底破坏就难以恢复。降水是荒漠草原生态系统的主要限制因子,降水变化决定着荒漠草原生态系统的基本功能(地上净初级生产力、土壤有机质等),进而影响生态系统对大气 CO_2 浓度升高的响应^[20]。因此,迫切需要弄清全球变化背景下中国荒漠草原的降水格局变化趋势。

苏尼特左旗荒漠草原是温带干旱半干旱地区的典型荒漠草原,位于内蒙古荒漠草原的主体区域,对气候

变化,特别是降水变化非常敏感。本研究试图以苏尼特左旗为例,分析 1956—2009 年日降水格局的变化,为揭示气候变化对荒漠草原生态系统结构和功能的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

苏尼特左旗位于内蒙古锡林郭勒盟西北部,地理位置在东经 $111^{\circ}30'—115^{\circ}12'$,北纬 $42^{\circ}58'—45^{\circ}06'$ 之间。气候属于温带干旱、半干旱大陆性季风气候,蒸发量高达 2 678 mm。年平均日照为 3196 h,年均气温 $1—2^{\circ}\text{C}$,最低气温 -36°C ,最高气温 39.3°C 。平均风力 4 级左右,主风向为西北风,全年 8 级以上的大风日不少于 76 d。灾害频发,年平均风沙日为 110 d,常见干旱雪灾,十年九旱,三年遇雪灾^[21]。地貌类型以高平原、低山丘陵为主,土壤类型以淡栗钙土和棕钙土为主。植被类型为以小针茅(*Stipa klemenzii* Roshev.) 为建群种的荒漠草原。

1.2 资料和方法

本研究资料来自中国地面气候资料日值数据集,包括 1956—2009 年苏尼特左旗气象站逐日降水数据。日降水资料记录有 6 种形式:①无降水;②微量降水(日降水量少于 0.1 mm);③雾、露或霜形成的降水量;④完全降雪形成的降水量;⑤雪和雨形成的降水量;⑥降雨形成的降水量。因为第二类和第三类降水量太小,在本研究中暂不予以考虑,与第一类日降水同等对待^[22]。

在日降水分析过程中,降水日数定义为日降水量大于等于 0.1 mm 的天数;生长季为 5—9 月;持续少于 10 d 的降水间期为较短的间隔期,大于或等于 10 d 的降水间期为较长的间隔期^[10]。

1.2.1 趋势检验

降水量、降水日数和降水强度的趋势检验采用世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法 Mann-Kendall 法^[21]。计算方法为假设数据序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为平稳的时间序列,遵从正态分布,样本相对独立,首先需要计算对于元素 $x_i, x_i > x_j (j=1, 2, \dots, i-1)$ 成立的累积次数 m_i ,总累积数为 d_k ,定义统计量:

$$U_{d_k} = \frac{d_k - E_{d_k}}{\sqrt{\text{Var}_{d_k}}} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (1)$$

式中, E_{d_k} , Var_{d_k} 分别是 d_k 的均值和方差,可计算如下:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i; E_{d_k} = \frac{k(k-1)}{4}; \text{Var}_{d_k} = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (2)$$

式中, U_{d_k} 服从标准正态分布。原假设为序列无趋势变化,采用双边趋势检验,在给定显著性水平 α 下,若 $|U_{d_k}| < U_{\alpha/2}$,接受原假设;若 $|U_{d_k}| \geq U_{\alpha/2}$,拒绝原假设。所有 U_{d_k} 将组成一条随时间变化曲线,当该曲线落在置信区间 $(-U_{\alpha/2}, +U_{\alpha/2})$ 外时,原序列才存在显著的变化趋势。本文选取置信区间 $|U| < 1.96$ (95% 的置信水平),那么当曲线 (U_{d_k} 值)落在 $|U| < 1.96$ 之外,则存在显著趋势, $U_{d_k} > 0$ 时,表示有上升趋势; $U_{d_k} < 0$ 时,表示有下降趋势。

降水量、降水日数、降水强度的趋势值估计采用最小二乘法,为表示方便,一般将所得的趋势乘以 10,从而表示为每个年代的变化大小,相应单位为 $(\%/10\text{a})$ 。

1.2.2 降水强度的分级

我国常用的日降水强度分级为, <0.1 mm,微量; $0.1—10$ mm,小雨; $10—25$ mm,中雨; $25—50$ mm,大雨; $50—100$ mm,暴雨; $100—200$ mm,大暴雨; ≥ 200 mm,特大暴雨^[23]。对于降水稀少的荒漠草原区来说,这种划分范围太大,不能准确反映本地的降水状况。本文采用广泛运用于气象因子分析中^[24-25] Bonsal 等^[26] 的非参数化方案进行降水强度分级。具体步骤如下:若某个气象要素有 n 个值,将这 n 个值按升序排列 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$,某个值小于或等于 x_m 的概率 P 可由以下公式计算而得:

$$P = (m - 0.31) / (n + 0.38) \quad (3)$$

式中, m 为 x_m 的序号。

苏尼特左旗荒漠草原 54 a 来 80% 左右的天数无降水发生,参考陈冬冬和戴永久^[26]关于西北地区降水强度的划分标准,并结合典型草原生长季土壤水分及碳交换的有效降水为 3 mm 或 5 mm^[27],突出对小降水事件的描述,将苏尼特左旗荒漠草原降水强度作如表 1 所示划分。

表 1 苏尼特左旗荒漠草原日降水强度分级

降水 Precipitation	弱 Light	较弱 Relatively light	中等 Moderate	较强 Relatively heavy	强 Heavy	极强 Extremely heavy
百分位 Rank	$0 < R_i \leq R_{10}$	$R_{10} < R_i \leq R_{20}$	$R_{20} < R_i \leq R_{50}$	$R_{50} < R_i \leq R_{70}$	$R_{70} < R_i \leq R_{90}$	$R_i > R_{90}$
日降水量 Daily precipitation/mm	$0 < PPT < 2.4$	$2.4 \leq PPT < 4.7$	$4.7 \leq PPT \leq 11.6$	$11.6 < PPT < 17.5$	$17.5 \leq PPT < 28.4$	$PPT \geq 28.4$

R_i : rank, 表示日降水量所对应百分位数; PPT: daily precipitation, 表示日降水量

2 结果与分析

2.1 降水量特征

1956—2009 年苏尼特左旗荒漠草原的全年及生长季降水量均呈减少趋势(图 1)。其中多年平均降水量为 191.9 mm, 变异系数 26.6%, 最大 321.7 mm, 最小 96.3 mm, 波动在 100—250 mm, 趋势值为 $-8.5 \text{ mm}/10\text{a}$ 。降水历经 1963—1966 年、1981—1989 年、1998—2002、2004—2006 年 4 次较大幅度的下降和 2007—2009 年的回升, 基本表现出 70 年代增加, 60、80、90 年代减少, 2000—2010 年代增加的格局。值得一提的是, 1999 年以来降水量持续偏少, 1999—2006 年平均降水量仅为 155.8 mm, 是减少幅度最大的时期。

降水在季节内呈正态分布(图 2), 生长季降水量的多年均值为 163.5 mm, 占到全年的 85%, 趋势值为 $-8.7 \text{ mm}/10\text{a}$, 主要集中在 6—8 月份, 各月降水量分别为 $(16.2 \pm 1.6) \text{ mm}$, $(30.3 \pm 2.5) \text{ mm}$, $(50.5 \pm 4.0) \text{ mm}$, $(47.9 \pm 4.1) \text{ mm}$, $(18.6 \pm 1.5) \text{ mm}$ 。各月降水量年际波动剧烈, 变异系数均在 50% 以上。

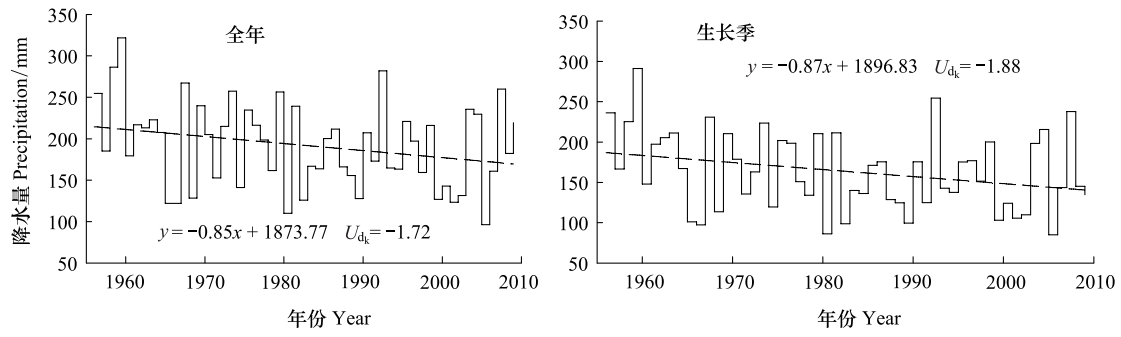


图 1 全年和生长季降水量的年际变化

Fig. 1 Interannual variability of precipitation amounts respectively in the whole year and the growing season

图中虚线表示线性趋势,下同

2.2 降水时间

2.2.1 降水日数特征

1956—2009 年苏尼特左旗荒漠草原全年及生长季降水日数均呈显著减少趋势(图 3)。其中多年平均降水日数为 63.8 d, 变异系数 16.9%, 最长 87 d, 最短 43 d, 波动在 50—80 d, 趋势值为 $-2.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。其中, 80 年代后期到 90 年代初期降水日数表现出增加的势头, 但 90 年代以来降水日数持续减少, 带动近 50 多年来整体趋势显著的降低。

生长季降水日数多年均值为 40.4 d, 占到全年的

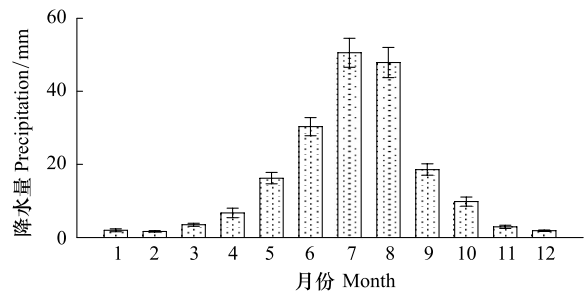


图 2 降水量的季节分配

Fig. 2 Seasonal distribution of precipitation amounts

63%, 趋势值为 $-3 \text{ d}/10\text{a}$ 。各月降水多年均值分别为 $(5.2 \pm 0.3) \text{ d}$, $(8.7 \pm 0.4) \text{ d}$, $(11.1 \pm 0.4) \text{ d}$, $(9.4 \pm 0.5) \text{ d}$, $(5.9 \pm 0.3) \text{ d}$ (图 4)。各月降水日数年际波动也较剧烈, 变异系数均在 28% 以上。

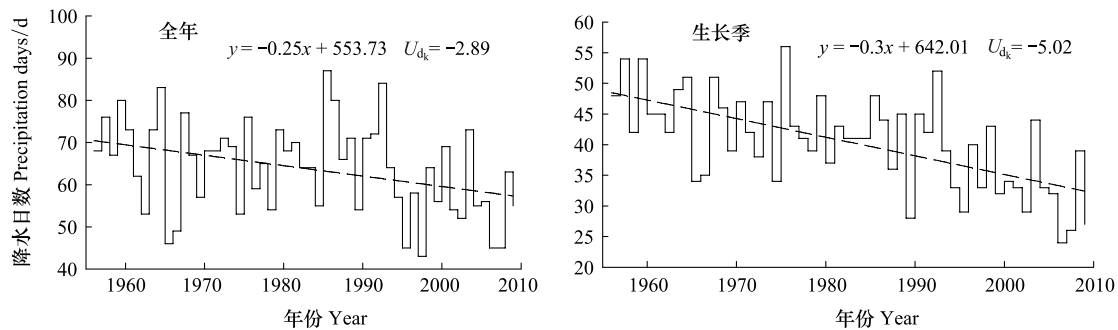


图 3 全年和生长季降水日数的年际变化

Fig. 3 Interannual variability of precipitation days respectively in the whole year and the growing season

2.2.2 降水间隔期

1956—2009 年苏尼特左旗荒漠草原较短降水间隔期每年发生的次数呈显著减少趋势, 年均发生 32 次, 变异系数 22.5%, 最多 54 次, 最少 16 次, 趋势值为 $-1.1 \text{ 次}/10\text{a}$ (图 5)。其中, 60—00 年代的线性趋势依次为 $0.27 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $-0.32 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $-0.13 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $-0.42 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $-1.04 \text{ 次}/\text{a}$, 减幅有增大的趋势。较长降水间隔期每年发生的次数呈增加趋势, 年均发生 10 次, 变异系数 21%, 最多 15 次, 最少 5 次, 趋势值为 $0.4 \text{ 次}/10\text{a}$ (图 5)。但 1960—2010 年的线性趋势依次为 $-0.39 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $-0.18 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $0.07 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $0.16 \text{ 次}/\text{a}$ 、 $0.25 \text{ 次}/\text{a}$, 增幅在上升。特别是 90 年代以来频率在波动中上升, 带动 50 多年来趋势的增加。

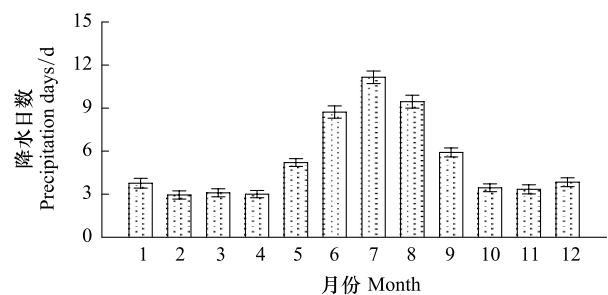


图 4 降水日数的季节分配

Fig. 4 Seasonal distribution of precipitation days

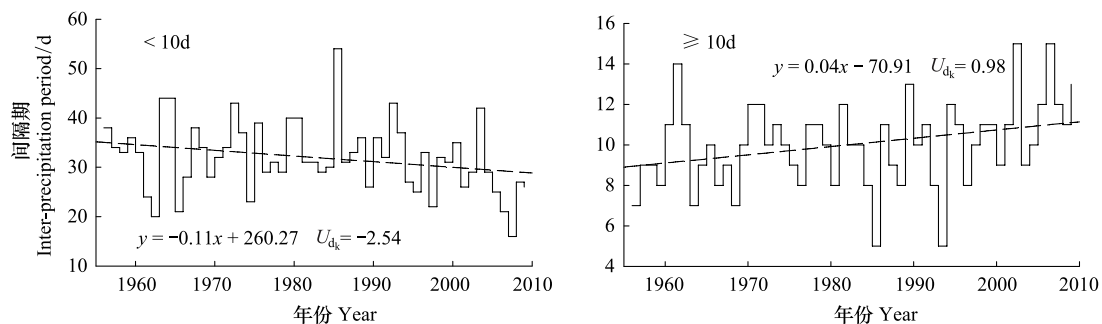


图 5 降水间期的年际变化

Fig. 5 Interannual variability of inter-precipitation period

2.3 降水强度

2.3.1 不同强度降水的年、季分配

1956—2009 年苏尼特左旗荒漠草原的降水以中等降水量、弱降水日数为主 (图 6)。其中, 中等降水占总降水量的 32%, 弱降水占总降水日数的 67%, 各强度等级降水的多年均值见表 2。除中等强度降水外, 各级降水占总降水量的比例相近, 在 10%—16% 之间。各级降水占总降水日数的比例则相差较大, 中等强度以上的降水仅占总降水日数的 7%, 较强降水有 6 a 没有出现, 强降水 20 a 没有出现, 平均各年代出现 6.2 a, 极强

降水只出现了 20 a,平均各年代出现 3.6 a。仅 3a 发生了持续 2 d 的极强降水,其他均为 1 d。

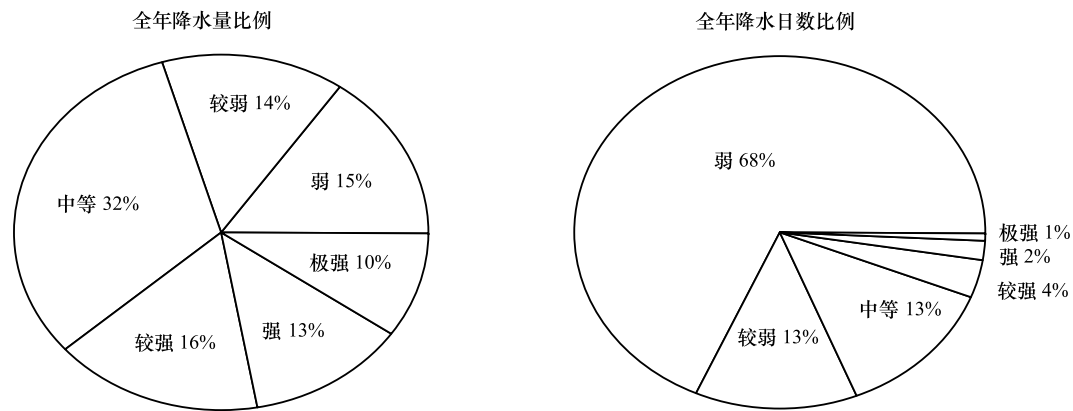


图 6 不同强度等级降水的降水量和降水日数在全年内的分配
Fig. 6 Distribution of different precipitation types for precipitation amounts and days in the whole year

表 2 各强度降水在全年的年均值

Table 2 Average value of different precipitation types in the whole year						
全年 The whole year	弱 Light	较弱 Relatively light	中等 Moderate	较强 Relatively heavy	强 Heavy	极强 Extremely heavy
总量 Amounts /mm	29.42	27.93	59.19	32.3	24.61	18.43
日数 Days/d	43.39	8.41	8.13	2.31	1.15	0.43

除弱降水在非生长季分布稍多,其他强度降水事件几乎都发生在生长季,以中等强度以上降水尤为突出(表 3)。以多年来生长季各月某强度降水量(日数)占当月总降水量(日数)的比例表示该强度降水在该月的分配。近 50 a 来苏尼特左旗荒漠草原各月均以中等强度降水量居多,特别是中等强度降水占到 9 月降水量的 43.8%;其中 7 月和 8 月的降水量分配比例相似,中等降水量占到当月总量的 30% 左右,极强降水大约占总量的 14%(图 7a)。各月均以弱降水日数居多,且均占到各月总降水日数的 50% 以上;其中 7 月和 8 月的降水日数分配比例相似,弱降水日数占到当月总日数的 52% 左右,极强降水大约占总日数的 1.5%。极强降水事件主要发生在 6、7、8 月,以 7、8 月多见,5 月无极强降水发生,近 50 a 来 9 月仅发生 1 次(图 7b)。

表 3 各强度降水在生长季的年均值

Table 3 Average value of different precipitation types in the growing season						
生长季 The growing season	弱 Light	较弱 Relatively light	中等 Moderate	较强 Relatively heavy	强 Heavy	极强 Extremely heavy
总量 Amounts/mm	18.16	21.78	51.99	29.85	23.33	18.43
日数 Days/d	23.17	6.52	7.09	2.13	1.09	0.43

2.3.2 不同强度等级降水变化趋势

苏尼特左旗荒漠草原区的较强、强、极强降水事件尤其离散,趋势不明显,为此将三者综合为中等强度以上降水进行趋势分析。在描述不同强度降水变化时采用相对变化趋势,即每十年某强度降水量(日数)增加值相对于当地该强度降水量(日数)均值的百分率。

1956—2009 年苏尼特左旗荒漠草原的弱、较弱、中等及中等以上各强度等级降水量均呈下降趋势,其中中等降水量显著下降,趋势值为 $-5.8\%/10\text{ a}$ (图 8a)。各等级降水日数也均呈下降趋势,其中仅较弱降水日数趋势未通过 0.05 显著性检验,其它均显著下降,趋势值分别为 $-3.5\%/10\text{ a}$ 、 $-6.4\%/10\text{ a}$ 、 $-4.4\%/10\text{ a}$,以中等降水日数下降最为突出,经 Mann-Kendall 法统计检验, U_{dk} 值达 -2.98 (图 8b)。

生长季不同强度等级降水的降水量均呈下降趋势(图 8a),其中弱降水量显著下降,且 90 年代以来持续

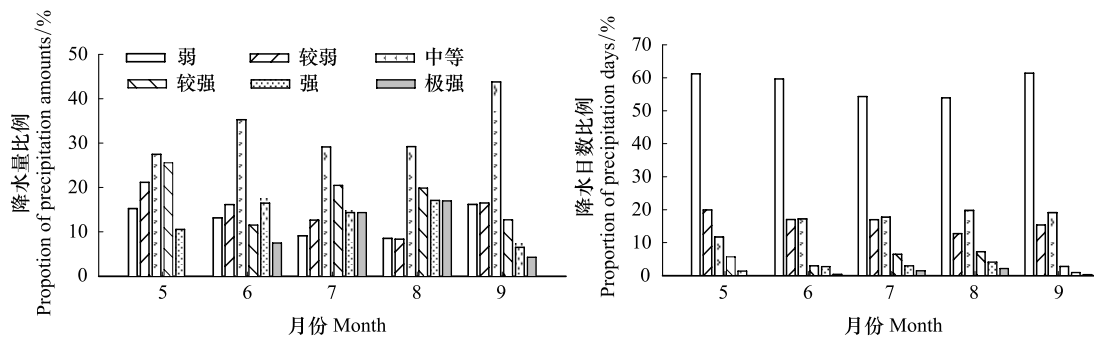


图7 不同强度等级降水的降水量和降水日数在生长季各月内的分配

Fig. 7 Distribution of different precipitation types for precipitation amounts and days in each month of the growing season

减少,趋势值为 $-5.6\%/10a$,其它均不显著。较弱降水量减幅较大为 $-6.6\%/10a$,其趋势不显著的原因在于数据波动较大,年际变异系数高达 41.3% ,而弱降水的变异系数仅为 25.3% 。不同强度等级降水日数均显著下降(图8b),趋势值分别为 $-9.2\%/10a$ 、 $-5.6\%/10a$ 、 $-5.3\%/10a$ 、 $-4.4\%/10a$,以弱降水日数下降最为突出,经 Mann-Kendall 法统计检验, U_{dk} 值达 -4.77 。

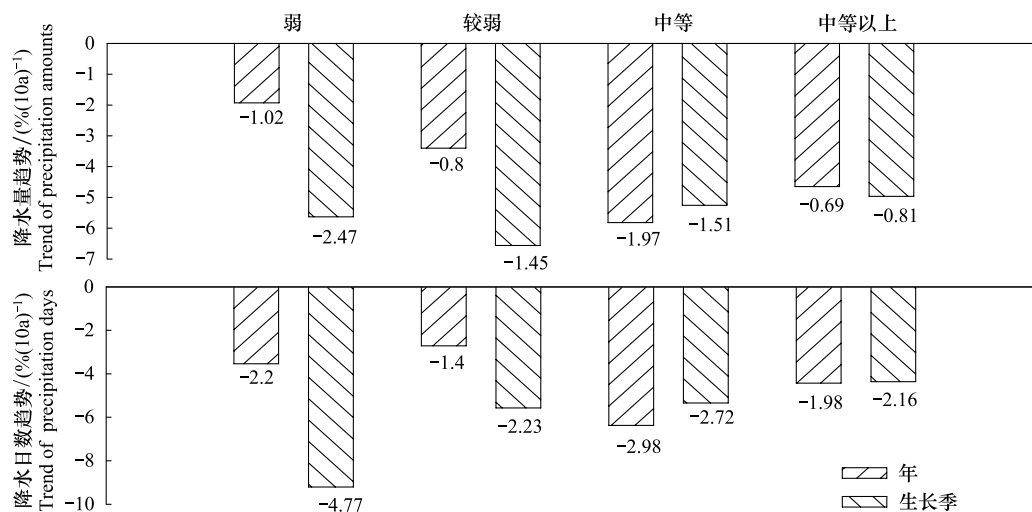


图8 全年及生长季不同强度等级降水的变化趋势

Fig. 8 Secular trend of precipitation amounts and days for the different precipitation types respectively in the whole year and the growing season

图中所标注的数值表示 U_{dk} 值

3 讨论

苏尼特左旗深居内陆,距海远,海拔高,加之由大兴安岭和阴山山脉所构成的天然屏障阻挡,使暖湿气流很难深入境内,从而造成雨季短促,雨量不足^[11]。1956—2009 年,苏尼特左旗荒漠草原降水呈减少趋势,年降水量波动在 $100—250\text{ mm}$,基本表现出 70 年代增加,60、80、90 年代减少,2000—2010 年代增加的格局。这与内蒙古典型草原和草甸草原年降水量的变化格局不同,典型草原最大达 481 mm ,最小 146.7 mm ,70 和 90 年代降水量呈增加趋势,60 和 80 年代呈减少趋势^[13];海拉尔的草甸草原波动在 $250—400\text{ mm}$,60—80 年代降水增加,90 年代后开始明显下降^[28]。这不仅体现了干旱半干旱区降水的时空差异,更说明荒漠草原的降水格局在内蒙古整个草原生态系统降水格局中具有一定的特殊性,而这种特殊性必然对其气候、草地生产和畜牧业产生深刻的影响。

苏尼特左旗荒漠草原年降水量的趋势值为 $-8.5\text{ mm}/10a$,高于内蒙古全区近 50a 的趋势值 $-5.9\text{ mm}/$

10a^[12]。降水量虽然不能完全决定干旱的长期变化,但降水量无疑是影响气候干湿变化最主要的因素之一。翟盘茂和邹旭恺^[29]通过对 1951—2003 年中国降水变化对干旱的影响研究,指出降水是我国干旱变化的最主要因子,近半个多世纪以来华北地区的干旱趋势主要是由于降水的减少造成的。苏尼特左旗荒漠草原降水量下降的时段与本旗干旱发生时段一致^[30],也与我国发生较大范围干旱的主要时期一致^[29]。我国微量降水事件(毛毛雨)普遍减少,特别是北方很多地区毛毛雨日数减少更多,是近年来干旱化趋势的一个重要特点^[31]。小降水事件占据了苏尼特左旗荒漠草原生长季降水的绝大部分,但弱降水量和日数显著减少,较弱降水事件也呈减少趋势。研究表明,弱降水日数的减少会加剧降水稀少的沙漠戈壁地区的干旱程度^[24]。中等以上降水事件出现较少且呈下降趋势,雨日数减少且较长间隔期出现的频率增加,这意味着荒漠草原生态系统将经历更长的水分亏缺,从而造成土壤水分亏缺时间延长,丰水年的水分入渗补给与干旱年的土壤水分净支出相互交错,土壤水分干湿变幅加剧^[32]。降水和土壤水分的这一变化将不可避免的对受水分限制较为严重的干旱半干旱地区的荒漠草地生态系统产生深刻的影响。

降水与草原生态系统生产力密切相关,随年均降水量的增加,内蒙古温带草地生态系统地上净初级生产力呈指数增加趋势^[33],地下生物量也显著增加^[34]。尽管如此,在较小的空间和时间尺度上,仅仅通过年降水量并不能解释草原地上净初级生产力存在的差异^[35],不同时期降水量的分布也是影响初级生产力的重要因素^[36]。生长季降水量对草场生产力影响最大^[37],也是最好的单一预测禾草类地上生物量($r^2 = 0.62$)的指标^[38]。在总量一定的情况下,降水的时间以及强度对生态系统生产力都有重要的影响。美国肯萨斯的高草草原,降水频次不变,降水总量降低 30%,土壤 CO_2 通量降低了 8%;降水总量不变,降水频次减少 50%,土壤 CO_2 通量降低了 13%;降水总量和频次共同降低则使土壤 CO_2 通量降低了 20%^[9]。Knapp 等^[8]和 Fay 等^[39]的降水控制实验发现,降水总量不变,降水间期延长会使草地生态系统地上净初级生产力显著降低。就降水强度来说,大雨可能渗入到土壤剖面的深层,补充深层土壤或者有可能进入根际下层激发同化过程,然而小雨可能被植物冠层截留或者只补充表层土壤剖面^[9]。Huxman 等指出,在一定范围内,总生态系统生产力随雨强增大线性增加^[40]。

20 世纪 90 年代以来,苏尼特左旗草场生产力急剧下降^[41]。通过本文的研究,近 50 a 来苏尼特左旗荒漠草原全年及生长季降水量和降水日数均呈减少趋势,而较长降水间期在增加,弱降水事件为主而中等以上降水在减少。除人为因素以外,这种降水格局的变化极有可能是加剧草地生产力下降的重要原因。同时,这种降水格局的发展趋势必然对未来荒漠草原生态系统的生产力和稳定性带来一定的负面影响和不确定性。

荒漠草原生态系统生产力随着降水格局变化有较大的波动,而草原植被的生产力直接决定着草场的牧草生产,是草场载畜能力的基础^[42]。草地产草量的年际波动导致了草场载畜量的年际变化^[43],如内蒙古小针茅草理论载畜量与地上生物量呈正相关^[42]。由于这种关系的存在,在降水多的年份牲畜数量增加明显;而在降水少的年份,天然草场牧草的青草期缩短^[44],并且牧草产量和质量下降,劣等牧草、杂草和毒草的比例越来越高^[45],牲畜饮水困难^[44],这将直接导致畜牧业受到负面影响。当发生连续干旱时,将加剧草场退化和草原土壤沙化,同时对人工草场建设和天然草场的改良带来影响^[44]。

综上所述,苏尼特左旗荒漠草原降水格局的波动趋势可能会威胁到当地畜牧业的可持续发展,加剧荒漠草地畜牧业的脆弱性。

4 结论

利用 1956—2009 年逐日降水观测资料,对苏尼特荒漠草原降水格局的研究表明:

(1) 荒漠草原的年和生长季内各月均以中等降水量、弱降水日数为主,中等强度以上的降水事件发生较少。

(2) 生长季降水主要集中在 6、7、8 月份,5、9 月份降水较少,降水年际波动非常大,极强降水事件主要发生在 6、7、8 月份,5 月无极强降水发生。

(3) 年和生长季的降水量、降水日数、较短间隔期均呈减少趋势,较长间隔期在增加。

(4) 年和生长季内弱、较弱、中等、中等以上各等级降水事件均呈下降趋势,年降水的减少主要是由中等降水事件造成,弱降水显著减少是生长季降水的突出特点。

References:

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D D, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Rebecca Shaw M, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *Bioscience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [3] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, Knight R W, Jamason P F, Hennessy K J, Suppiah R, Page C M, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev V N, Douglas A, F¶rland E, Zhai P M. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 243-283.
- [4] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [5] Wu J L, Wang M, Lin F, Hao Z Q, Ji L Z, Liu Y Q. Effects of precipitation and interspecific competition on *Quercus Mongolica* and *Pinus koraiensis* seedlings growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 235-240.
- [6] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, Peng C H, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293(5536): 1723-1724.
- [7] Ni J. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecology*, 2004, 174(2): 217-234.
- [8] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, Collins S L, Smith M D, Carlisle J D, Harper C W, Danner B T, Lett M S, McCarron J K. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. *Science*, 2002, 298(5601): 2202-2205.
- [9] Harper C W, Blair J M, Fay P A, Knapp A K, Carlisle J D. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 322-334.
- [10] Gong D Y, Shi P J, Wang J A. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(4): 771-784.
- [11] Liu Z, Wang D C, Zhang J C, Zhang J H. Tendency analysis of climate change and eco-degeneration in Sunite steppe. *Inner Mongolia Prataculture*, 2008, 20(3): 37-39.
- [12] Ding X H, Chen T Z. Characteristics of temperature and precipitation in Inner Mongolia: 1958—2007. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2008, (2): 17-17, 19-19.
- [13] Hou Q, Wulanbater. Analysis of climate change and its effect on soil moisture over Inner Mongolia typical steppe in recent 40 years. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(1): 102-106.
- [14] Liu H W, Liu X R, Chen L Y. The distribution characteristics of extreme precipitation events in Inner Mongolia. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2009, (6): 7-9.
- [15] Zhao Q Y, Zhang W, Wang S G, Liu X W. Change of extreme precipitation events in arid and semi-arid regions in the east of Northwest China. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(6): 904-909.
- [16] Zhang L J, Zhao W Z. Daily precipitation pattern and its temporal variability in Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(4): 741-747.
- [17] Liu B, Chang X X, Li S B. Rainfall patterns and pulse characteristics in desert regions of the Heihe River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19): 5194-5199.
- [18] Sai S B. Serious desertification of desert steppe zone and its control in northern Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(4): 34-39.
- [19] Ao D G W. The Study of the Soil Health Condition in Desert-Grassland [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [20] Ren H L, Li P, Shen W J, Ren H, Yang F. Difference of desert ecosystem responses to elevated atmospheric CO₂ concentration between dry and wet years. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2006, 14(5): 389-396.
- [21] Li C L, Li W J. Tendency analysis and spatial pattern of aboveground vegetation biomass based on NDVI in Sunite Left Banner, Xilingole. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(3): 147-152.

- [22] Gong D Y, Wang J A, Han H. Trends of summer dry spells in China during the late twentieth century. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 88(3/4): 203-214.
- [23] Zhang J C, Lin Z G. *Climate of China*. New York: Wiley and Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1992: 376-376.
- [24] Chen D D, Dai Y J. Characteristics of Northwest China rainfall intensity in recent 50 Years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(5): 923-935.
- [25] Zhai P M, Pan X H. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(S1): 1-10.
- [26] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, Hogg W D. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1959-1976.
- [27] Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, Cui X Y. The response of ecosystem CO₂ exchange to small precipitation pulses over a temperate steppe. *Plant Ecology*, 2010, 209(2): 335-347.
- [28] Ma R F. *Climate Change During the Past 50 Years and Its Impact on the Production Ability in Inner Mongolia Grassland [D]*. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [29] Zhai P M, Zhou X K. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951—2003. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 16-18.
- [30] Yang W Y. *Study on the Evaluation of Regionalization of Protection Type Based on Temporal and Spatial Hydrothermal Distribution of Grassland of Xilingol [D]*. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [31] Zhai P M, Wang C C, Li W. A review on study of change in precipitation extremes. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 144-148.
- [32] Jackson R B, Carpenter S R, Dahm C N, Mcknight D M, Naiman R J, Postel S L, Running S W. Water in a changing world. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 1027-1045.
- [33] Hu Z M, Fan J W, Zhong H P, Yu G R. Spatiotemporal dynamics of aboveground primary productivity along a precipitation gradient in Chinese temperate grassland. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50(5): 754-764.
- [34] 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.
- [35] Lauenroth W K, Sala O E. Long-term forage production of North American shortgrass steppe. *Ecological Applications*, 1992, 2(4): 397-403.
- [36] He F, Li X L, Wan L Q. Research progress in relationship between rainfall and grassland primary productivity. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(2): 109-115.
- [37] Chang X L, Yang C. Effect of precipitation on vegetation composition and productivity in Kerqin sandy grassland. *Grassland of China*, 2000, (3): 7-11, 16-16.
- [38] Nippert J B, Knapp A K, Briggs J M. Intra-annual rainfall variability and grassland productivity: can the past predict the future? *Plant Ecology*, 2006, 184(1): 65-74.
- [39] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, Blair J M, Collins S L. Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: design and performance of rainfall manipulation shelters. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 308-319.
- [40] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [41] Jing S G. Current situation and ecological restoration tactics of grassland in Sunite Left Banner. *Inner Mongolia Prataculture*, 2009, 21(2): 17-19.
- [42] Li Y H, Mo W H, Yang C, Ye B. Aerial biomass and carrying capacity of steppe vegetation in Inner Mongolia and their relations with climate. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1994, 8(4): 43-50.
- [43] Li B L, Zhou C H. Climatic variation and desertification in west sandy land of Northeast China Plain. *Journal of Natural resources*, 2001, 16(3): 234-239.
- [44] Wu X B. Grassland animal husbandry and disastrous weather. *Contemporary Animal Husbandry*, 2001, (3): 24-26.
- [45] Yan L D, Zhang G S, Li F X. The climatic mode of natural herbage yield formation on northern pasture of China. *Pratacultural Science*, 2003, 20(7): 8-11.

参考文献:

- [5] 武静莲, 王森, 蔺菲, 郝占庆, 姬兰柱, 刘亚琴. 降水变化和种间竞争对红松和蒙古栎幼苗生长的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 235-240.

- [11] 刘志, 王殿臣, 张计琛, 张计红. 苏尼特草原气候变化与生态恶化趋势分析. 内蒙古草业, 2008, 20(3): 37-39.
- [12] 丁晓华, 陈廷芝. 内蒙古地区近 50 年气温降水变化特征. 内蒙古气象, 2008, (2): 17-17, 19-19.
- [13] 侯琼, 乌兰巴特尔. 内蒙古典型草原区近 40 年气候变化及其对土壤水分的影响. 气象科技, 2006, 34(1): 102-106.
- [14] 刘宏伟, 刘秀荣, 陈凌云. 内蒙古地区极端降水事件分布特征. 内蒙古气象, 2009, (6): 7-9.
- [15] 赵庆云, 张武, 王式功, 刘新伟. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化. 中国沙漠, 2005, 25(6): 904-909.
- [16] 张立杰, 赵文智. 黑河流域日降水格局及其时间变化. 中国沙漠, 2008, 28(4): 741-747.
- [17] 刘冰, 常学向, 李守波. 黑河流域荒漠区降水格局及其脉动特征. 生态学报, 2010, 30(19): 5194-5199.
- [18] 赛胜宝. 内蒙古北部荒漠草原带的严重荒漠化及其治理. 干旱区资源与环境, 2001, 15(4): 34-39.
- [19] 敖登高娃. 荒漠草原土壤健康状况研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2008.
- [20] 任会利, 李萍, 申卫军, 任海, 杨帆. 荒漠生态系统对大气 CO₂ 浓度升高响应的干湿年差异. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(5): 389-396.
- [21] 李昌凌, 李文军. 基于 NDVI 的锡盟苏尼特左旗地表植被生物量的趋势分析和空间格局. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 147-152.
- [24] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征. 大气科学, 2009, 33(5): 923-935.
- [25] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10.
- [28] 马瑞芳. 内蒙古草原区近 50 年气候变化及其对草地生产力的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [29] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.
- [30] 杨文义. 基于水热时空分布的锡林郭勒草地保护类型分区评价研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [31] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 144-148.
- [33] 胡中民, 樊江文, 钟华平, 于贵瑞. 中国温带草地地上生产力沿降水梯度的时空变异性. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2006, 36(12): 1154-1162.
- [34] 马文红, 杨元合, 贺金生, 曾辉, 方精云. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系. 中国科学 (C 辑): 生命科学, 2008, 38(1): 84-92.
- [36] 何峰, 李向林, 万里强. 降水量对草原初级生产力影响的研究进展. 中国草地学报, 2008, 30(2): 109-115.
- [37] 常学礼, 杨持. 科尔沁沙地降水量波动对草场植被组成和初级生产力影响的研究. 中国草地, 2000, (3): 7-11, 16-16.
- [41] 景曙光. 苏尼特左旗草原现状与生态恢复对策. 内蒙古草业, 2009, 21(2): 17-19.
- [42] 李永宏, 莫文红, 杨持, 叶波. 内蒙古主要草原植物群落地上生物量和理论载畜量及其与气候的关系. 干旱区资源与环境, 1994, 8(4): 43-50.
- [43] 李宝林, 周成虎. 东北平原西部沙地的气候变异与土地荒漠化. 自然资源学报, 2001, 16(3): 234-239.
- [44] 吴孝兵. 草原畜牧业与灾害性天气. 当代畜牧, 2001, (3): 24-26.
- [45] 颜亮东, 张国胜, 李风霞. 我国北方牧区天然牧草产量形成的气候模式. 草业科学, 2003, 20(7): 8-11.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元