

# 干旱区对降水变化响应的研究进展

朱雅娟, 吴波, 卢琦\*

(中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

**摘要:**水分是干旱区的主要限制因子之一,降水是干旱区最重要的水分来源。根据气候变化研究的预测,未来我国干旱区的降水格局会改变,包括降水量、降水频率和降水强度等。降水变化会影响干旱区的土壤变化,植被变化,土地荒漠化和水文变化等方面。我国极端干旱区和干旱区的降水有总体增加趋势,而部分半干旱区和亚湿润干旱区的降水则出现减少趋势。降水的增加能够促进生物土壤结皮的发育,改善土壤水分状况,促进植物生长,提高植被盖度,促使荒漠植被向草原植被方向发展,有利于土地荒漠化的逆转;另外,降水增加会增加河流的径流量和湖泊水量,促进洪水的发生,降水减少则具有相反的效应。这些研究有助于人们预测干旱区在未来降水格局改变之后可能发生的变化,对于天然植被保育以及荒漠化防治等实践工作等具有重要的理论指导意义。未来的研究需要加强实验,如增雨、升温、模拟氮沉降和CO<sub>2</sub>浓度增加等对干旱区的土壤、植被、荒漠化和水文等方面的影响,才能获得更有说服力的结果。

**关键词:**干旱区;降水变化;土壤变化;植被变化;荒漠化;水文变化

**中图分类号:**S718.51,S728

**文献标识码:**A

## Progress in the Study on Response of Arid Zones to Precipitation Change

ZHU Ya-juan, WU Bo, LU Qi

(Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The pattern of precipitation, including precipitation amount, frequency and intensity, may change in the future according to the prediction of climate change. In arid zones, the soil dynamics, plant growth and vegetation change, desertification and hydrology might be affected by precipitation change. In general, the precipitation in extreme arid zone and arid zone showed an increase tendency whereas the precipitation in some area in semi-arid zone and sub-humid arid zone showed a decrease tendency. The increase of precipitation could enhance the growth of biological soil crust, improve soil water status, promote plant growth, increase vegetation coverage, facilitate the change from desert vegetation to grassland vegetation, and it is benefit to the reversion of land desertification. In addition, the increase of precipitation could also increase the river runoff, lake storage and promote the occurrence of flood, while the decrease of precipitation has the adverse effect. These studies will benefit the prediction of the possible response of ecosystem processes to the potential change of precipitation pattern in arid zones in the future, and it is important to the conservation of natural vegetation and the control of desertification. More field experiments and studies should be conducted in the future, including the effect of increased precipitation or temperature, nitrogen deposition and CO<sub>2</sub> on soil, vegetation, desertification and hydrology of arid zones, so as the more persuasive results could be obtained from these experiments and studies.

收稿日期: 2011-03-17

基金项目: 中国林业科学研究院中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目“西北干旱荒漠生态系统对脉冲式降雨的响应”(CAFYBB2007008);林业公益性行业科研专项“荒漠生态系统对全球变化的响应与适应对策”(201104077)

作者简介: 朱雅娟(1980—),女,陕西眉县人,副研究员,主要从事荒漠植物生态学研究。

\* 通讯作者: 研究员,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。

**Key words:** arid zone; precipitation change; soil change; vegetation change; desertification; hydrological change

根据联合国千年生态系统评估报告(Millennium Ecosystem Assessment, MA)的定义,干旱区包括所有气候类型区内被划分为干旱半湿润、半干旱、干旱或极度干旱的土地。在《联合国防治荒漠化公约》(United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD)中,应用湿润指数( $I_m$ )来划分气候区,其中,干旱区划分为极端干旱区、干旱区、半干旱区和亚湿润干旱区,它们的年均降水量范围分别为 $<50$ 、 $50 \sim 200$ 、 $200 \sim 500$ 、 $500 \sim 800$  mm。

在干旱区,水分是最重要的限制因子之一,它影响着生物土壤结皮的发育,土壤水分动态,植物生长和植被动态,土地荒漠化的发生或者逆转以及河流、湖泊、洪水等水文过程。降水是干旱区最重要的水分补给来源之一,降水的变化会对干旱区的这些方面都产生重要影响,从而影响干旱区的天然植被保育和荒漠化防治等林业生态工程的实施。因此,本文将通过综述近年来国内外的研究结果,探讨不同空间和时间尺度上干旱区的降水变化趋势以及它对土壤、植被、荒漠化和水文方面产生的影响,并提出几点建议,为未来气候变化情景下维护干旱区的生态安全提供参考。

## 1 全球气候变化背景下我国干旱区降水的变化趋势

全球气候变暖引起了各地降水格局的变化,包括降水量、降水频率、降水强度以及降水的季节分配等。许多气候变化的研究都预言全球范围内周期性的干旱将更加普遍,极端的降雨事件将更加频繁。全球变化所导致的极端降雨事件和降雨时间的不确定性的增加将对许多陆地生态系统,特别是干旱、半干旱地区的生态系统产生重要的影响<sup>[2]</sup>。

我国干旱区的降水量变化趋势因地区而异,总的来说,干旱区的降水量有增加趋势,部分半干旱区的降水量则有减少趋势。近40~50年来,特别是1987年以后,全球气候变化导致我国西北干旱区的降水量有增加趋势,气候趋于湿润<sup>[3]</sup>;气温升高,蒸发减弱,冰川融化,河流流量增加,湖泊水量增加,植被逐渐恢复,荒漠化扩展减少<sup>[4]</sup>;但是,降水变化的季节分配有差异,主要是夏季和冬季降水量增加,而且各地区的变化幅度不同。降水量少的地区降水增加趋势强烈,降水量偏多的地区降水减小趋势强烈<sup>[5]</sup>。其中,新疆和青海西部地区的降水量呈现明

显增加趋势,而西北地区东部降水量呈减少趋势<sup>[6]</sup>,新疆近50年来年降水量显著增加,北疆和南疆降水量的变化趋势最明显;其中,冬半年(1、2、11月和12月)这4个月的降水量增加趋势显著,对新疆年降水量的贡献较大<sup>[7]</sup>。近53年河西走廊中部地区的降水量以4.75 mm/10 a的速度在递增,20世纪80—90年代前期降水量出现下降,90年代后期又开始缓慢增加,意味着该地区气候由暖干向暖湿转变<sup>[8]</sup>。半干旱区的降水变化与干旱区不同,其中,北方半干旱区降水量表现出略微下降的趋势,但是降雨特征表现出显著变化:与50年代相比,90年代的降雨天数减少8天,日降雨量 $<10$  mm的天数显著增加,小雨的强度也增加,但是中雨和大雨没有显著变化;同时,长时间降雨显著减少,而长时间干旱(连续10 d无降雨)的频率显著增加<sup>[9]</sup>。内蒙古东部大部分地区的降水日数减少,大于25 mm的极端降水事件呈增加趋势,通辽的降水明显减少<sup>[10]</sup>。西北半干旱区大部分地方的降水量呈下降趋势,秋季降水量减少最多,春季次之,而夏季部分地区和冬季大部分地区的降水量略呈增加趋势<sup>[11]</sup>。到2030年,温室气体加倍后,5种模型预测西北地区沿天山的降水量将略有减少,其他地区降水将增加;考虑硫酸盐气溶胶辐射强迫作用后,降水量在天山及其以北地区将由西北向东南减少,其他地区降水量增加<sup>[12]</sup>。未来大气CO<sub>2</sub>倍增后,西北地区西部夏季降水将明显增加,东部夏季降水降低而秋季降水增加<sup>[13]</sup>。

气候变化不仅导致干旱区的降水量发生改变,降水的分配也发生明显变化,表现之一是极端降水事件明显增加。近40年来,我国西北干旱区的极端降水呈现增加的趋势,其中,北疆的极端降水天数增加最多(3.1 d/40 a),南疆次之(2.3 d/40 a),河西走廊的极端降水变化不大<sup>[14]</sup>。在西北地区东部,气候近十几年变得更加极端,降水异常偏多的区域减少,20世纪90年代全区域降水异常偏少,但是极端降水事件没有减少<sup>[15]</sup>;其中,春季和秋季极端降水事件的频率增加,夏季大雨出现的频率增加<sup>[16]</sup>。从1960年到2004年,北疆,南疆和河套地区的汛期极端降水明显增长,而西北东部明显减少<sup>[17]</sup>。从1960—1994年,厄尔尼诺年份西北地区秋季大部分地区降水异常偏少,其中,青海东部、甘肃中东部、宁夏南部和陕西北部降水明显偏少,而北疆的降水偏多;而拉尼娜年份的情况则相反<sup>[18]</sup>。2006年8月

11日(21:10~08:05),甘肃省民勤县发生1次47.6 mm的降雨,强度达到 $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ [19]。

## 2 降水变化对干旱区土壤变化的影响

干旱区的降水变化会影响土壤水分动态和生物结皮的发育,干旱区增加的降水可以直接补充土壤水分;而半干旱区的降水减少导致土壤水分降低。生物结皮影响水分入渗,但也有助于保持下层的土壤水分。降雨量和降雨频率的变化会改变生物结皮的群落组成。

### 2.1 降水变化对土壤水分的影响

降雨格局变化会对土壤水分动态产生重要影响,因为只有降雨量达到一定水平才能有效补充土壤水分。例如,甘肃民勤县一次47.6 mm强降雨后,锥形和稳定阶段白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)沙堆的土壤水分最大补给深度仅达到30 cm,发育和活化阶段的沙堆补给深度达50 cm[19]。库布齐沙漠油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)群落的土壤水分只有降雨大于5 mm才能得到有效补充,小雨只能增加空气湿度和降温,缓解旱情[20]。一次42 mm降雨之后,科尔沁沙地小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)灌丛下的土壤水分会随着蒸发而逐渐减少,表层(0~20 cm)的水分减少最快[21]。

未来降水减少将导致半干旱区的土壤水分减少。例如,从1988—2007年,呼伦贝尔市的土壤水分与年降水量成显著正相关,降水减少导致0~50 cm土壤水分含量以 $3.816 \sim 20.723 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 速度逐年剧减。降水变化对土壤水分的影响在夏季和秋季最明显[22]。21世纪以来,内蒙古兴安盟半干旱农区突泉县的降水量减少趋势明显,近25年来,各季节土壤水分呈下降趋势,并且有加速下降的趋势,夏季和秋季土壤水分主要受降水量的影响[23]。

### 2.2 降水变化对生物结皮的影响

生物结皮是由苔藓、地衣、藻类、真菌和细菌等形成的复合生物土壤层,能够增加土壤稳定性,能固氮并能增加土壤肥力,改变水分循环[24]。模拟降雨实验表明:生物结皮能够降低下层水分的蒸发速度,保持土壤水分;但是它也会减少水分的入渗速度和深度,减少沙层深处的水分补给,对降雨有拦截作用[25-26]。由于生物结皮的生物体只在湿润时有代谢活动,而沙漠里土壤表面在春末、夏季和初秋很快会干燥,降雨量和降雨时间的改变可能会显著影响这些群落的生理功能。夏季降雨频率增加会导致地

衣结皮盖度和生物多样性减少,其原因可能是少量多次降雨时缺少可利用的碳,导致结皮不能修复叶绿素和保护性色素[27]。

## 3 降水变化对干旱区植被变化的影响

降水格局改变后,植物的生长受到影响,植被的生产力以及物种组成都可能发生变化。降水增加会提高干旱区植被的生产力,促进不同地区的1年生草本植物或多年生草本植物的生长,使较干旱地区的植被向较湿润地区的植被转变,例如荒漠向草原转变。

### 3.1 降水变化对植被生产力的影响

在不同时间尺度,干旱区的植被生产力的变化趋势不同。从1982年到2000年,西部干旱区植被总体呈增长趋势,平原区植被主要由荒漠植被转化为绿洲和草甸,如天山北坡和塔里木河中游等地区;或者由无植被转化为稀疏荒漠植被,如古尔班通古特沙漠,噶顺戈壁和巴丹吉林沙漠等地[28];然而,从1992到2001年,整个西北地区大部分地区植被状况恶化,林地、灌木草地和草原的植被大面积退化,局部地区有所好转,其中,NDVI(Normalized differential vegetation index,归一化植被指数)增加的主要是天山地区,减少的主要在西北东部地区,与降水的变化一致[29]。从1986年到2000年,中国北方农牧交错带植被净初级生产力(NPP)下降,单位面积NPP也下降,NPP变化与降水变化成正相关[30]。近48年新疆的NPP平均以 $0.118 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的变化率增长,并于1978年以来发生了突变性的增大。未来气候变湿将对新疆NPP产生积极影响;平均而言,在其他条件不变的前提下,年降水量每增多10%,NPP将增加20%[31]。

干旱区和半干旱区的植被不仅受当年、当季或当月降水的影响,还可能受到前几个月或上一年降水的影响。例如,温带荒漠、沙漠和戈壁的NDVI明显受降水变化的影响,而且存在时滞效应;典型草原的NDVI主要受降水变化的影响,荒漠草原和沙地灌丛+荒漠草原的NDVI也主要受降水影响,其响应表现出滞后现象[32]。温带草原植被的NDVI对一个月降水的滞后响应最强烈,与当月降水和前2个月降水的累积量相关性最强;在生长季中后期,当月和上一个月、上两个月降水显著影响典型草原和荒漠草原的植被生长[33]。在西北温带草原中,新疆阿尔泰地区NDVI与同期降水的相关系数为0.306,

祁连山地区 NDVI 与同期降水的相关系数为 0.810。其原因可能在于两地的降水分配差异:阿尔泰地区降水量(206.8 mm)夏季和冬季各有一个峰值,而祁连山降水量(259.7 mm)仅在夏季有一个峰值<sup>[34]</sup>。1982 到 2003 年,阿拉善荒漠东部的阿左旗和西部的额济纳旗的 NDVI 指数稍有增加,中部的阿右旗的 NDVI 指数缓慢减少;东部和中部的降水量与 NDVI 指数存在明显的年相关,隔季和当季相关,降水对植被的影响存在滞后效应;而西部额济纳旗的植被指数与降水量没有明显的相关性,植被生长主要依赖上游黑河水的灌溉<sup>[35]</sup>。近 9 年,内蒙古中部大部分地区(79.60%)的植被在总体上保持基本稳定,少部分地区(17.33%)的植被覆盖得到了明显改善,极少部分地区(3.06%)仍存在较强的植被退化或土地沙化趋势。土地退化或植被沙化地区主要分布在农牧交错带北部边缘。植被年际动态主要受该地区气候趋于暖干化的影响,降水的作用大于气温的作用<sup>[36]</sup>。鄂尔多斯的植被盖度分布主要受降水的影响,从东南到西北,随着降水量的减少,植被盖度逐渐降低,植被从典型草原、荒漠草原过渡到草原化荒漠<sup>[37]</sup>。从 1978 到 1996 年,NDVI 指数表明毛乌素沙地植被生产力增加,这与当地降水量及其季节模式变化的趋势一致<sup>[38]</sup>。降水是驱动呼伦贝尔地区草地植被年际变化的主要因素。夏季和秋季草地植被的生长对降水变化的敏感性高于对气温变化的敏感性,其中,以夏季最为显著。5—8 月的 NDVI 与前一月降水变化关系密切,说明植被生长对降水变化具有一定的滞后性<sup>[39]</sup>。内蒙古半干旱草原的降水增加后,生产力增加,这是因为降水增加改善土壤的水分供给条件,增强植物的光合速率,从而提高了生产力。模拟研究表明:降水量增加或降低 50%,年 NPP 随之增加或降低 37%,地上生物量随之增加或降低近 30%<sup>[40]</sup>。

### 3.2 降水变化对植被物种组成的影响

降水发生变化后,不同生活型植物受到的影响程度不同;一些植物的生长可能被促进,从而取代原来的植物成为生态系统的优势物种,例如,科尔沁沙地固定沙丘的植物物种多样性与降水量变化成正相关,生长季降水的影响大于年降水。1 年生植物的丰富度受降水量变化的影响最大,其次为多年生草本,灌木不受影响。年降水量对多年生草本影响最大,生长季降水量对 1 年生草本植物影响最大,而关键期(7—8 月)的降水量对灌木影响最大<sup>[41]</sup>。暖湿

气候有利于维持科尔沁沙地草地较高的物种丰富度和多样性,多雨时期植被盖度与降水呈显著负相关,干旱时期物种丰富度、植物多样性和植被盖度与降水呈正相关<sup>[42]</sup>。多次少量降雨会促进毛乌素沙地的多年生植物本氏针茅(*Stipa bungeana* Trin.)和牛心朴子(*Cynanchum komarovii* Al.)成为优势植物,中度降雨有利于牛心朴子生长,而大雨有利于灌木油蒿生长;因此在干扰后的不同演替阶段,本氏针茅和油蒿可以共存,油蒿和牛心朴子可以共存。降雨的变化以及人为造成的过度放牧等干扰,可能加速中国西北地区的土地退化<sup>[43]</sup>。控制小叶锦鸡儿和中间锦鸡儿(*C. intermedia* Kuang et H. C. Fu)地理分布差异的主导因子是水分,特别是湿度;控制中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿(*C. korshinskii* Kom.)地理分布差异的主导因子也是水分,特别是生长季和年降水量。2100 年温室气体浓度将增加 1~3 倍,平均气温升高 2℃,北方温带地区降水量将增加 35.1~123.8 mm 后,几种锦鸡儿的分布区会向北迁移,在我国的分布范围缩小<sup>[44]</sup>。模型研究表明:中国植被对未来气候变化(IPCC-SRES-A2 情景,2071—2100)的适应性总体较好,84%的植被变化表现为正向的变化,特别是在西北地区,未来气候条件将有所改善,这些地区的植被覆盖可能会有所提高。植被潜在的变化中约 79%的植被可以适应未来的气候,但在青藏高原南部和内蒙古地区及西北的部分地区的草地生态系统对未来气候变化的适应性较差,有退化的倾向<sup>[45]</sup>。增加 40、80 mm 降雨后,古尔班通古特荒漠 6 种短命植物的生物量、密度和盖度增加,群落结构发生改变,植被盖度和群落净初级生产力提高<sup>[46]</sup>。

## 4 降水变化对干旱区土地荒漠化的影响

干旱区的降水量增加土壤含水量提高,促进植物生长,植被盖度提高,风沙活动减弱,有利于土地荒漠化的逆转;反之,降水量减少会导致土壤蒸发增加,植物生长被抑制,植被盖度降低,风沙活动加强,促进土地荒漠化的发生。

在比较大的空间尺度上,气候变化控制着土地荒漠化的发生与逆转过程,其中,气候趋于暖干化促进荒漠化的发生与扩展,而暖湿化则有利于荒漠化的逆转。气候湿润时,降水量增加,土壤表层水分条件改善,植被种类增加,植被盖度提高,风对沙质地

表的侵蚀作用减弱,生草成土作用加强,处于荒漠化逆转过程;但是,降水量的增加对干旱区荒漠化的逆转作用非常缓慢,而降水略有减少则迅速促进荒漠化的发生和扩展<sup>[47]</sup>。20世纪60—90年代,北方地区持续明显升温,降水保持在平均水平或者降低,导致蒸降比下降,干燥度增加,土壤有效水分减少,从而加剧荒漠化<sup>[48]</sup>。在北方荒漠区,未来春夏季降水增加,冬季降水减少,年降水增加;极端干旱区和干旱区降水增加,半干旱区大部分地区降水减少;西部趋于暖湿,中部趋于暖干,东部趋于干旱<sup>[49]</sup>。降水变化对各地区荒漠化的发展影响不同:北疆和南疆的降水增加,蒸发量减少,河川径流量的增加有利于荒漠化的逆转;而河西走廊降水量变化不大,蒸发量增加使当地的荒漠化发展更迅速<sup>[50]</sup>。内蒙古西部沙漠的降水总量在20世纪90年代增加,但是暴雨所占比例也增加,增强了对地表岩石的破碎作用,搬运大量泥沙,破坏植被和沙丘相对稳定的表层,加剧风沙流活动,最终导致沙漠化发展<sup>[51]</sup>。近20年来,毛乌素沙地的土地沙漠化逐渐减轻,植被覆盖略有增加。气候和人为因素是导致当地植被覆盖增加的主要因素。近20年来,该地区年际气候变化表现为增温和降水波动。人为因素的影响表现在20年来农田和林地的大面积增加<sup>[52]</sup>。近15年来,青海共和盆地的土地沙漠化总体趋势为整体面积缩小,恶化和逆转并存,程度略有加强。气候变化导致的蒸发量增加对当地土地沙质荒漠化有一定的促进作用<sup>[53]</sup>。模型预测未来大气中温室气体增加后,我国干旱区各气候类型区的面积基本上呈增加趋势,其中极端干旱区和亚湿润干旱区增加幅度较大;增加的面积以亚湿润干旱区为主<sup>[54]</sup>。

## 5 降水变化对干旱区水文变化的影响

干旱区降水的变化会影响河流的径流、湖水的水量以及洪水的发生,其中,暴雨对干旱区水文的影响较大,会明显增加河流径流量和湖水的水量并且可能诱发洪水。

干旱区河流的水源包括降水、冰川积雪融水和地下水等。降水变化,特别是暴雨对河流径流的影响较大。近50年,西北地区大部分河流的径流量呈现增加趋势,特别是天山南坡的河流径流量增加最明显,每10年增加14%<sup>[55]</sup>。近45年来,石羊河流域的年平均径流量在总体上降低,其中,石羊河流域东部和中部的年平均径流量减少,流域西部的年平

均流量增加。石羊河的径流量变化与当地降水量之间呈现显著正相关关系,与蒸发量之间呈现显著的负相关关系<sup>[56]</sup>。石羊河流域自1986年后明显变暖,山区的降水量下降而平原的降水量增加。20世纪80年代和90年代,气候变化是石羊河上游径流减少的主要原因,而人类活动(灌溉)导致同期下游径流减少<sup>[57]</sup>。近50年来,黑河的降水与径流的相关系数为0.393,气温与径流的相关系数为0.146,所以降水和气温与径流都呈现正相关关系。气温升高和降雨量增加导致黑河径流的总体趋势在波动中缓慢增大,未来10年径流仍将继续缓慢增大<sup>[58]</sup>。塔里木河流域过去50年的年均降水量增加,其中夏季降水显著增加的气象站数量更多;但是山区径流增加的主要原因是气温上升导致春季积雪和冰川融化<sup>[59]</sup>。塔里木河流域自20世纪80年代以来夏季和秋季降水增加,上游叶尔羌河和阿克苏河年径流量呈增加趋势<sup>[60]</sup>。在过去50年里,塔里木河三源流的径流量在总体上增加,特别是20世纪90年代以后丰水年出现次数较多。随着温度的升高,蒸发对径流的作用逐渐增大,但是当地降水量的增长远比蒸发量的增长更快<sup>[61]</sup>。新疆地表水资源(实际河流控制径流量)与年降水呈正相关,北疆地表水资源对年降水的响应幅度最大,东疆居中,南疆最小<sup>[62]</sup>。

全球气候变暖导致冰川融化加速,融雪时间提前也对干旱区河流的流量产生明显影响。从1956—2001年,黑河上游山区积雪流域年均降水基本平稳,而年均气温缓慢上升,累积降雪量波动变化,融雪期提前,春季融雪径流量显著增加<sup>[63]</sup>。河西走廊祁连山东部地区气温升高,降水减少,山口径流明显下降;中部降水量略增加,气温上升,径流增加不明显;西部山区降水量增加,气温上升,山口径流明显增加<sup>[64]</sup>。

我国干旱区有近400个湖泊,面积大于10 km<sup>2</sup>的有29个,多分布在新疆;面积小于10 km<sup>2</sup>的有334个,多分布在新疆和巴丹吉林沙漠<sup>[65]</sup>。近50年来,内蒙古和新疆的湖泊水量变化受降水影响显著,主要表现在水位和面积方面,其中,内蒙古的湖泊在19世纪50年代为高水位,1970—1980年水位普遍下降,面积显著萎缩,到2000年面积增加或降低速率减慢;而新疆的湖泊在19世纪80年代中期降水显著增加以后扩张,如艾丁湖由1986年的干涸发展到2000年湖面超过50 km<sup>2</sup><sup>[66]</sup>。2002年新疆准噶尔盆地西部艾比湖和天山南麓博斯腾湖的面积都明显

增加;近年来,祁连山西段哈拉湖湖面逐渐扩大,这是当地气温升高、融雪增加和降水增加共同作用的结果<sup>[67]</sup>。

我国西北干旱区各地区从20世纪80年代以后,多雨发生的频率增加,但是各地在不同年代的趋势不同,北疆50年代偏雨,60年代和70年代偏旱,80年代后期偏雨,90年代旱涝交替;南疆50年代和60年代偏旱,70年代旱涝交替,80年代偏雨,90年代旱涝交替;河西走廊50年代和60年代偏旱,70年代偏雨,80年代和90年代旱涝频率都减少<sup>[68]</sup>。暴雨的增加导致干旱区局部地区发生洪水。例如,2002年7月上旬,黑河上游莺落峡7月10日的最大洪峰流量为 $931 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[68]</sup>。1996年7月18—20日,上游大西沟三日总降水量达107.2 mm,乌鲁木齐市的总降水量也达到57.7 mm,导致乌鲁木齐河发生洪水,19日最大洪峰达 $352 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[69]</sup>。1999年7月26日,塔里木河上游的开都河发生1次百年一遇的洪水,洪峰流量达 $1870 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[70]</sup>。

## 6 总结

近年来,我国极端干旱区和干旱区的降水有总体增加趋势,而部分半干旱区和亚湿润干旱区的降水则出现减少趋势。降水的增加能够促进生物结皮的发育,改善土壤水分状况,促进植物生长,提高植被盖度,使荒漠植被向草原植被方向发展,有利于土地荒漠化的逆转;另外,降水增加会增加河流的径流量和湖泊水量,促进洪水的发生。降水减少则具有相反的效应。

目前,很多关于干旱区降水变化及其影响的预测是基于模型模拟而得出的结果,还需要进一步通过实验来验证。因此,今后应加强相关的实验研究,特别是野外的增雨实验,这样才能得到更接近实际情况的结果。今后还需要继续研究降水的各个方面,包括降水量、降水时间、降水频率和极端降水事件等对干旱区生态系统过程的影响。此外,还可以将降水变化与升温、模拟氮沉降、 $\text{CO}_2$ 浓度增加等其他气候变化因素综合,研究干旱区在不同尺度上对未来气候变化的可能响应。这些研究有助于了解干旱区对气候变化的响应机制,据此采取合理的措施来应对气候变化对这些地区可能导致的不利影响,包括保护天然植被,维持生物多样性和防治荒漠化等,从而维护干旱区的生态安全。

## 参考文献:

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being: Desertification Synthesis [R]. World Resources Institute, Washington, DC, 2005
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, formally approved at the 10th Session of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: IPCC, 2007
- [3] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164
- [4] 杨维西. 全球变化中的中国干旱区——响应与趋势[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 124-130
- [5] 张翀,李晶,任志远. 西北地区1962年至2000年降水变化的时空特征分析[J]. 资源科学, 2010, 34(12): 2298-2304
- [6] 靳立亚,李静,王新,等. 近50年来中国西北地区干湿状况时空分布[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 847-854
- [7] 张生军,王天明,王涛,等. 新疆近50a来降水量时空变化及其突变分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 668-674
- [8] 刘洪兰,白虎志,张俊国. 河西走廊中部近53年降水变化及未来趋势预测[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 146-150
- [9] Gong D Y, Shi P J, Wang J A. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59: 771-784
- [10] 苏立娟,邓晓东,达布希拉图,等. 内蒙古东部近40年气温降水变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 40(21): 11214-11215, 11239
- [11] 姚玉璧,肖国举,王润元,等. 近50年来西北半干旱区气候变化特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2): 159-165
- [12] 高庆先,徐影,任阵海. 中国干旱地区未来大气降水变化趋势分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 36-43
- [13] 张存杰,高学杰,赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 157-164
- [14] 任朝霞,杨达源. 近40a西北干旱区极端气候变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 10-13
- [15] 赵庆云,张武,王式功,等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 904-909
- [16] 赵庆云,赵红岩,刘新伟. 西北东部极端降水事件及异常旱涝季节变化倾向[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 745-749
- [17] 杨金虎,江志红,杨启国,等. 中国西北汛期极端降水事件分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 320-325
- [18] 李耀辉,李栋梁,赵庆云,等. ENSO对中国西北地区秋季异常降水的影响[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(2): 205-213
- [19] 杜建会,严平,俄有浩,等. 强降雨事件对不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤水分的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 20-24
- [20] 魏雅芬,郭柯,陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355
- [21] 王少昆,赵学勇,左小安,等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛下土壤水分对降雨响应的空间变异性[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 389-393
- [22] 王彦平,孟军,宋卫士,等. 呼伦贝尔市土壤水分与气候变化的关系[J]. 水土保持研究, 2009, 25(4): 255-258, 263
- [23] 唐红艳,么文,尹肖飞. 气候变化对内蒙古兴安盟半干旱区土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 130

- 134, 139
- [24] 徐杰, 白学良, 杨持, 等. 固定沙丘结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 545-551
- [25] 吕贻忠, 杨佩国. 荒漠结皮对土壤水分状况的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 76-79
- [26] 李守忠, 肖洪浪, 罗芳, 等. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 228-233
- [27] 房世波, 冯凌, 刘华杰, 等. 生物土壤结皮对全球气候变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3312-3321
- [28] 师庆东, 陈利军, 潘晓玲, 等. 利用20年遥感影像分析西部干旱区植被演变特征[J]. 资源科学, 2003, 25(5): 84-88
- [29] 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 308-313
- [30] 刘会军, 高吉喜. 气候和土地利用变化对北方农牧交错带植被 NPP 变化的影响[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 493-500
- [31] 张山清, 普宗朝, 伏晓慧, 等. 气候变化对新疆自然植被净第一性生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2010, 27(6): 905-914
- [32] 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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379-382
- [33] 李震, 李晓兵, 陈云浩, 等. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1054-1062
- [34] 郭锐, 朱燕君, 王介民, 等. 近22年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 319-327
- [35] 张凯, 司建华, 王润元, 等. 气候变化对阿拉善荒漠植被的影响研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 879-885
- [36] 王军邦, 陶健, 李贵才, 等. 内蒙古中部 MODIS 植被动态监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 15(6): 835-842
- [37] 房世波, 谭凯炎, 刘建栋, 等. 鄂尔多斯植被盖度分布与环境因素的关系[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 25-33
- [38] Runnström M C. Rangeland development of the Mu Us sandy land in semiarid China: an analysis using land sat and NOAA remote sensing data [J]. Land Degradation & Development, 2003, 14: 189-202
- [39] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 47-58
- [40] 季劲钧, 黄玫, 刘青. 气候变化对中国中纬度半干旱草原生产力影响机理的模拟研究[J]. 气象学报, 2005, 63(3): 257-266
- [41] 常学礼, 赵爱芬, 李胜功. 科尔沁沙地固定沙丘植物物种多样性对降水变化的响应[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 147-151
- [42] 赵哈林, 大黑俊哉, 周瑞莲, 等. 人类活动与气候变化对科尔沁沙地草地植被的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 408-414
- [43] Cheng X, An S, Li B, *et al.* Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in northwestern China [J]. Plant Ecology, 2006, 184: 1-12
- [44] 王娟, 倪健. 中国北方温带地区5种锦鸡儿植物的分布模拟[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 12-24
- [45] 於刚, 李克让, 陶波, 等. 植被地理分布对气候变化的适应性研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1326-1332
- [46] 孙羽, 张涛, 田长彦, 等. 增加降水对荒漠短命植物当年牧草生长及群落结构的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1859-1868
- [47] 苏志珠, 卢琦, 吴波, 等. 气候变化和人类活动对我国荒漠化的可能影响[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 329-335
- [48] Chen Y, Tang H. Desertification in north China: background, anthropogenic impacts and failures in combating it [J]. Land Degradation & Development, 2005, 16: 367-376
- [49] 徐利岗, 周宏飞, 梁川, 等. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 1002-1011
- [50] 任朝霞, 杨达源. 近50a西北干旱区气候变化趋势研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 299-300
- [51] 乌云娜, 裴浩, 白美兰. 内蒙古土地沙漠化与气候变化和人类活动[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 292-297
- [52] 房世波, 许端阳, 张新时. 毛乌素沙地沙漠化过程及其气候因子驱动分析[J]. 中国沙漠, 2009, 28(5): 796-801
- [53] 封建民, 李晓华. 近15年来共和盆地土地沙质荒漠化动态变化及原因分析[J]. 水土保持研究, 2010, 26(5): 129-133
- [54] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 287-294
- [55] 叶柏生, 丁永建, 杨大庆, 等. 近50a西北地区年径流变化反映的区域气候差异[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 307-311
- [56] 李玲萍, 刘明春. 石羊河流域出山口河流流量的变化趋势及特性分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 58-63
- [57] Huo Z, Feng S, Kang S, *et al.* Effect of climate changes and water-related human activities on annual stream flows of the Shiyang river basin in arid north-west China [J]. Hydrological Processes, 2008, 22: 3155-3167
- [58] 王录仓, 张晓玉. 黑河流域近期气候变化对水资源的影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 60-65
- [59] Xu Z, Liu Z, Fu G, *et al.* Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River basin during the past 50 years [J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74: 256-267
- [60] 陈亚宁, 徐长春, 郝兴明, 等. 新疆塔里木河流域近50a气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 921-929
- [61] 傅丽昕, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河源流区近50a径流量与气候变化关系研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 204-209
- [62] 何清, 袁玉江, 魏文寿, 等. 新疆地表水资源对气候变化的响应初探[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 493-496
- [63] 王建, 李硕. 气候变化对中国内陆干旱山区融雪径流的影响[J]. 中国科学D辑地球科学, 2005, 35(7): 664-670
- [64] 蓝永超, 康尔泗, 仵彦卿, 等. 气候变化对河西内陆干旱区出山径流的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 276-282
- [65] 王亚俊, 孙占东. 中国干旱区的湖泊[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 422-427
- [66] 丁永建, 刘时银, 叶柏生, 等. 近50a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632
- [67] 郭锐, 张杰, 梁芸. 西北地区近年来内陆湖泊变化反映的气候问题[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 211-214
- [68] 任朝霞, 杨达源. 西北干旱区近50a旱涝时空变化及其防御措施研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 118-121
- [69] 张淳, 龚建新, 亚生. 乌鲁木齐河“960719”洪水分析[J]. 干旱区地理, 1998, 21(3): 49-56
- [70] 陶辉, 宋郁东, 邹世平. 开都河天山出山径流量年际变化特征与洪水频率分析[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 43-48