

BANGANHANQU NONGTIAN SHENGTAI XITONG
SHUIXUNHUAN YU YOUJITAN DUI GANHAN DE XIANGYING

半干旱区农田生态系统水循环 与有机碳对干旱的响应

肖国举 李永平·著

黄河出版传媒集团
阳光出版社

图书在版编目(CIP)数据

半干旱区农田生态系统水循环与有机碳对干旱的响应
/ 肖国举, 李永平著. -- 银川: 阳光出版社, 2020.12
ISBN 978-7-5525-5721-3

I. ①半… II. ①肖…②李… III. ①干旱区—农田—农业生态系统—水循环—研究②干旱区—农田—农业生态系统—有机碳—研究 IV. ①S181.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第266182号

半干旱区农田生态系统
水循环与有机碳对干旱的响应

肖国举 李永平 著

责任编辑 屠学农 李少敏
封面设计 晨皓
责任印制 岳建宁



黄河出版传媒集团 出版发行
阳光出版社

出版人 薛文斌
地址 宁夏银川市北京东路139号出版大厦(750001)
网址 <http://www.ygchbs.com>
网上书店 <http://shop129132959.taobao.com>
电子信箱 yangguangchubanshe@163.com
邮购电话 0951-5047283
经销 全国新华书店
印刷装订 宁夏凤鸣彩印广告有限公司
印刷委托书号 (宁)0020592

开本 720 mm×980 mm 1/16
印张 18.75
字数 250千字
版次 2020年12月第1版
印次 2020年12月第1次印刷
书号 ISBN 978-7-5525-5721-3
定价 50.00元

版权所有 翻印必究

编委会

著

肖国举 李永平

副著

胡延斌 仇正跻 王 静

编著者（按拼音顺序排序）

曹 谨 宁夏农业机械化技术推广站

仇正跻 固原市隆德县农业农村局

顾婧婧 兰州大学管理学院 固原市原州区人民政府办公室

郭占强 宁夏大学地理科学与规划学院

何宪平 固原市农业农村局

胡延斌 兰州大学大气科学学院

李秀静 宁夏大学地理科学与规划学院

李永平 宁夏农林科学院固原分院

刘世新 宁夏农林科学院固原分院

王 静 宁夏大学生态环境学院

肖国举 宁夏大学生态环境学院

张峰举 宁夏大学生态环境学院

前 言

干旱灾害是全球最为常见且危害极为严重的自然灾害之一，是影响我国社会经济发展、农业生产与生态文明建设的重要自然因素。伴随气候变暖，干旱极端气候事件发生频率和强度呈不断增加趋势，影响不断加重。我国是世界上干旱灾害发生频率最为频繁的国家之一，因干旱灾害造成的损失占据气象灾害损失的53%，居于各种气象灾害的首位。西北半干旱区的地形复杂，降水时空分布差异显著，生态环境脆弱，季节性干旱发生频繁高，干旱对农业生产损失严重，也给人民生活带来极大地影响。因此，持续深入开展农田生态系统干旱成因、致灾机理及早灾解除技术研究具有重要现实意义。

《半干旱区农田生态系统水循环与有机碳对于旱的响应》全书内容包括上篇、中篇和下篇三部分。上篇由肖国举提出撰写提纲思路，由胡延斌和李永平执笔，郭占强、顾婧婧、李秀静参加编写。主要介绍农田生态系统干旱形成机理、干旱持续历程、干旱致灾过程及干旱解除策略等；中篇由肖国举与李永平撰写提纲，由李永平执笔，刘世新、顾婧婧参加编写。主要论述农田生态系统水分时空变化与贮存潜力、土壤—植物水分迁移规律、水分生理生态循环、农田垄沟集雨抗旱节水高效种植对作物耗水特征、光合效率及其水分生产效率的影响、作物生理干旱与土壤干旱胁迫下致灾程度评价、作物生长关键期与土壤干旱胁迫导致生理需水缺水程度及水分循环特征、干旱胁迫下农田集雨系统模拟补充降水对解除旱灾关键技

术等;下篇由肖国举提出提纲建议,由胡延斌执笔,郭占强、李秀静参加编写;主要论述农田土壤—植物生态系统有机碳时空变化特征与贮存潜力、土壤—植物有机碳迁移规律、有机碳库对于旱的积极响应、农田生态系统有机碳对作物产量的影响、土壤和作物有机碳与作物品质的相关性、土壤有机碳库贮存技术及对策等。

《半干旱区农田生态系统水循环与有机碳对于旱的响应》一书是依托“宁夏科技创新领军人才计划”,国家气象行业科研重大专项“干旱气象科学研究—我国北方干旱致灾过程及机理”的资助。研究工作期间,感谢宁夏自治区科学技术厅、中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象科学研究院等项目主管部门领导给予的关心和支持。刘世新、仇正跻、王静、顾婧婧、何宪平、曹谨等同仁在开展田间试验、实验室项目化验分析、试验基地运行管理,研究资料采集整理等方面做了大量工作。西北农林科技大学董昭芸、张春和吴晓榕博士参与了部分田间试验及仪器相关测定内容,表示感谢!全书由肖国举和李永平提出整体研究工作框架思路,布设田间试验和实验室分析内容,统筹撰写总结提纲,并修改定稿。

全书围绕农田土壤—植物—大气生态系统干旱致灾过程及水分循环特征、水肥调控高效利用能力、土壤和作物有机碳库循环规律等科研工作进展进行论述,尽可能的注重各要素之间整体和局部的关联认识。读者对象适合于地理学、生态学、环境学、资源学、农学、水文学、大气科学等学科方面的科技工作者参考。

2020年10月肖国举于天润府

目 录

上篇 农田土壤——植物—大气生态系统干旱致灾机理及解除路径

- 第一章 宁夏地区干旱气候变化特征 / 003
 - 第一节 气温时空变化特征 / 004
 - 第二节 降水量时空变化特征 / 006
 - 第三节 干旱时空变化状况 / 007
 - 第四节 农田生态系统旱灾指标划分 / 010

- 第二章 农田生态系统干旱致灾过程及抗旱指标特征 / 016
 - 第一节 试验材料与方法 / 016
 - 第二节 干旱致灾的基本因素 / 018
 - 第三节 干旱胁迫机制及抗旱特征指标变化 / 020

- 第三章 农田生态系统干旱形成机理与干旱致灾过程 / 026
 - 第一节 大气——水循环不稳定下的环流异常 / 027
 - 第二节 高原屏障对西北地区气候的调节作用 / 028
 - 第三节 气候暖干化加速气象干旱与农业干旱的进程 / 029
 - 第四节 农田生态系统干旱致灾过程 / 032

第四章 农田生态系统干旱解除策略与展望 / 037

第一节 农田生态系统干旱监测、评估及解除策略 / 038

第二节 农田沟垄集雨抗旱节水高效种植技术成效 / 040

第三节 农田沟垄集雨抗旱节水高效种植技术应用前景 / 043

第四节 气象干旱的科学挑战与展望 / 045

参考文献 / 050

中篇 农田土壤——植物生态系统水分循环特征及其旱灾解除技术

第五章 宁南旱区旱灾发生频率及干旱预测 / 057

第一节 宁南旱区干旱分布状况 / 057

第二节 旱区干旱指标及发生频率 / 059

第三节 气候干旱振动及相关性 / 066

第六章 干旱胁迫下模拟降水对土壤水分时空变化的影响 / 073

第一节 干旱胁迫下模拟降水与作物土壤水分时空变化 / 073

第二节 农田覆盖方式与土壤水分时空变化 / 081

第三节 农田生态系统作物抗旱生理特征 / 084

第七章 农田生态系统土壤水分贮存潜力与水分迁移规律 / 091

第一节 土壤水分贮存潜力与水分利用 / 091

第二节 土壤贮水量对作物生产力的贡献 / 095

第三节 农田生态系统土壤水分循环及迁移规律 / 097

第四节 农田生态系统土壤水分入渗与能量平衡 / 105

第八章	农田集雨覆盖种植对作物耗水及水分利用的影响	/ 108
第一节	试验材料与方法	/ 108
第二节	覆膜、品种和密度对作物生长及土壤水分的影响	/ 110
第三节	农田垄沟集水种植对作物产量及水分利用的影响	/ 118
第四节	农田生态系统耕作措施与土壤水分转化	/ 126
第九章	农田生态系统田间模拟降水及其解除旱灾技术	/ 131
第一节	研究方案与试验设计	/ 132
第二节	干旱胁迫下作物抗旱性生理指标特征值及其评价	/ 137
第三节	干旱胁迫下模拟降水与作物抗旱相关性分析	/ 156
第四节	干旱胁迫过程抗旱减灾措施对作物生产能力的提升	/ 166
第五节	干旱胁迫过程模拟降水对作物生长量的影响	/ 184
参考文献		/ 195

下篇 农田土壤——植物生态系统有机碳迁移规律与贮存潜力

第十章	农田生态系统土壤与植物有机碳时空变化	/ 205
第一节	研究区概况及试验方法	/ 205
第二节	农田生态系统有机碳的主要影响因素	/ 208
第三节	农田生态系统有机碳对气候环境的影响	/ 211
第四节	农田生态系统土壤有机碳时空变化	/ 216
第五节	农田生态系统对作物根茎叶有机碳的影响	/ 228
第十一章	农田生态系统有机碳对作物产量的影响	/ 240
第一节	土壤有机碳对作物产量及产量组成的影响	/ 242
第二节	作物植株体有机碳对作物产量及产量组成的影响	/ 245

第三节	作物籽粒有机碳对作物产量及产量组成的影响	/ 251
第十二章	农田生态系统有机碳与作物品质的相关性	/ 255
第一节	农田土壤有机碳与作物品质的相关性	/ 255
第二节	作物植株有机碳与作物品质的相关性	/ 259
第十三章	农田生态系统有机碳固碳潜力及对策	/ 274
第一节	农田生态系统有机碳迁移	/ 274
第二节	农田生态系统土壤与植物固碳潜力	/ 278
第三节	提升农田生态系统固碳能力的对策及建议	/ 282
参考文献		/ 285

上篇

农田土壤—植物—大气生态系统 干旱致灾机理与解除路径



摘要:干旱灾害是影响社会经济发展、农业生产与生态文明建设的重
要自然因素,是全球最为常见且危害极为严重的自然灾害之一。伴随气候
变暖,极端气候事件发生频率和强度呈不断上升的趋势,影响不断加重。
干旱是一种周期性的气候异常,主要受气候自然变率驱动,具有发展缓
慢、持续时间长、影响范围广等特征。全球自然灾害中气象灾害约占到
70%,而干旱灾害占气象灾害的53%。中国是世界上干旱灾害发生频率最
为频繁的国家之一,因干旱灾害造成的损失占气象灾害损失的53%,居于
各种气象灾害的首位。全球干旱半干旱地区占陆地面积的45%,养育着世
界上38%的人口,是最脆弱的地区之一,也是降水变率最大的地区。中国
是世界上干旱半干旱面积较大的国家之一,旱地面积占全国总土地面积
的52.5%。干旱半干旱地区,地形复杂,降水时空分布差异显著,地区生态
环境脆弱,季节干旱发生频繁,农作物产量受损严重,给地区经济及人民
生活带来极大的影响。因此,持续深入开展对半干旱区农田生态系统干旱
成因及致灾机理,与解除的研究具有重要现实意义。

农业是受气候和天气制约影响最为密切的行业之一,关乎国家粮食安
全和社会稳定,因此农业干旱研究成为各国政府和学者共同关注的焦点问
题。西北地区受自然和人为因素影响,是干旱发生频率和影响深度最为明
显的地区之一。西北地区深居我国内陆,受气候和地形因素影响,降水量远
超出蒸发量,且时空分布不均,严重影响着区域农业的可持续发展。农田生
态系统是受气候变化影响最为明显的行业之一,气候变化背景下,全球陆
地大部分地区存在变干的趋势,且不同时空尺度干湿变化趋势存在不同。
半干旱区生态环境与农业可持续发展及其对气候变化背景下干旱的响应
研究,国家和地方就气候变化背景下先后启动了多项课题研究,围绕环境
气象条件与农业生产、农业生态的相互影响及其规律开展相关研究。主要
探索全球变暖背景下半干旱区农田生态系统干旱特征、干旱致灾机制、干
旱形成机理、干旱持续历程、干旱致灾过程、干旱解除策略以及在农田生
态系统干旱致灾机制等方面开展的相关国际合作。旨在说明气候变化对半干
旱区农田生态系统干旱的形成和发展重要背景的地理意义至关重要。

第一章 宁夏地区干旱气候变化特征

以全球变暖为主要特征的全球气候变化已经成为科学界和社会各界广泛关注的热点问题。受全球气候变化影响,宁夏地区也呈现整体气温升高趋势,其中冬季升温最为明显;降水量呈现整体减少趋势。数据表明,宁夏地区降水减少概率大约为 73.3%。宁夏地区长期遭受干旱的威胁,是中国受旱率和成灾率最严重的省份之一。全球变化背景下,宁夏地区长期遭受干旱威胁。干旱作为该地区最常见、影响范围最广、损失最大的自然灾害,已经造成区域生态环境退化、农业生态安全、生命财产安全威胁以及区域经济发展受阻等多种危害,严重威胁区域自然和经济社会的可持续发展。

从气候、地形、水文、地貌以及生态类型上可将宁夏划分为 3 个等级生态功能区,从北向南依次为北部引黄灌溉区、中部干旱带和南部山区丘陵沟壑区(图 1-1-1)。北部引黄灌区以平原为主,虽然年降水量只有 200 mm 左右,但在黄河水的灌溉下,农业植被丰茂;中部干旱带多为缓坡丘陵山区盆地,年降水量在 200~400 mm 之间,干旱少雨,植被以典型荒漠化草原和退化干草原为主;南部山区是整个黄土高原西部的一部分,年降水量在 400~700 mm,为宁夏主要的雨养农业区。

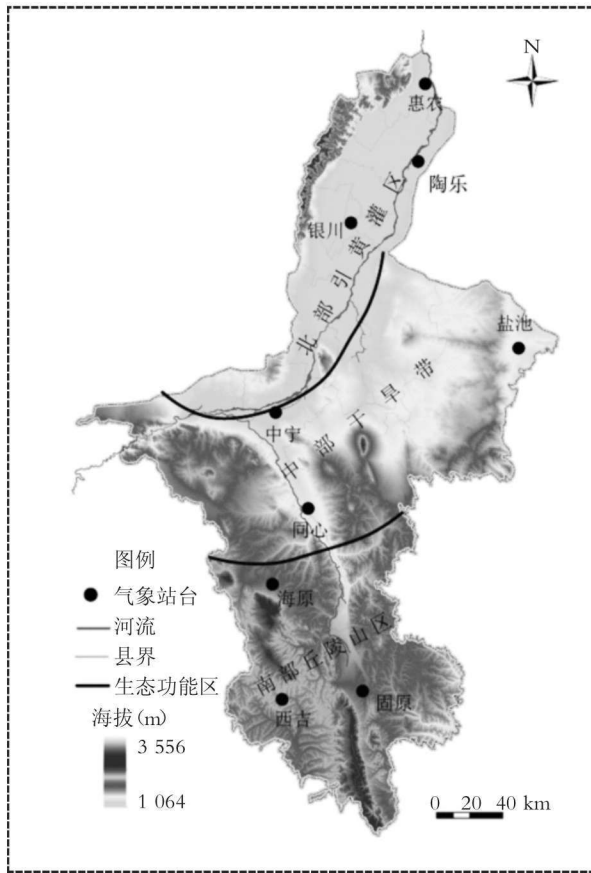


图 1-1-1 宁夏区域概况及生态功能区划

第一节 气温时空变化特征

一、气温时间变化

近半个世纪以来，宁夏地区平均气温显著升高，增温速率大于 $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。具体表现为全区全年显著增温，其中冬季增温速率最高可达 $0.62^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，其次为春季，增温速率可达 $0.52^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，夏秋季节增温速率相对较低，平均为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.61^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，均已通过 0.01 的显著性检验。与全国其他地方相比，该地区年或季节的增温幅度都明显高于全国平均水平。

宁夏地区年平均最高气温和最低气温表现为波动上升的趋势,其中,最高气温上升速率为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,而最低气温上升速率更快,达 $0.5^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。就最高气温来看,冬季增温速率最快,为 $0.54^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,春季次之,为 $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,夏秋分别为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。相比最高气温,最低气温升温速率更快,仍以冬季最高,为 $0.66^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,春季次之,为 $0.57^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,夏秋分别为 $0.46^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.43^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。由此可见,宁夏地区年和季节平均最低气温的增暖速度远高于最高气温的增暖速率,并且冬季气温上升对地区增暖的贡献最大。

二、气温空间变化

受地形和地理位置等因素影响,近半个世纪以来,宁夏地区各地平均气温均呈现显著上升趋势。宁夏气温变化存在明显的空间差异性,其中北部引黄灌区多年平均气温为 9.3°C ,中部干旱带多年平均气温为 8.1°C ,而南部山区多年平均气温仅 5.0°C 。可见,全区平均气温呈现自北向南逐渐降低的空间局势。全区升温速率存在显著差异,其中引黄灌区气温平均增速为 $0.46^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,中部干旱带和南部山区分别为 $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。可见,宁夏地区气候变暖速度总体呈现北部快、中南部较为缓慢的空间变化特征。

气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出:全球平均气温由2012年上升 0.85°C 增加到2018年平均升温 1.5°C ,导致全球气候变暖。近50年全球气温线性增温速率为 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。宁夏地区各区域最高和最低气温变化与全区变化一致,均呈显著上升趋势,但在地域变化上存在明显的空间差异性。就最高气温而言,引黄灌区年平均最高气温增速相对较快,可达 $0.41^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,中部干旱带和南部山区相对较缓,增速分别为 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。就最低气温而言,引黄灌区增温速率最快,为 $0.53^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,而中部干旱带和南部山区分别为 $0.44^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.47^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,近50年西吉县气温升高了 1.7°C ,气候变化速率为 $0.345^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,四季气温呈上升趋势,降水量减少 25.3 mm ,海原县年际春、夏、秋、冬平均气温

增加速率分别为 0.324、0.261、0.352、0.406℃/10 a。同心县近 60 年来平均气温亦呈整体上升趋势,增幅为 2~3℃。银川地区平均气温增加了 1.7℃,春夏增幅 0.8~0.9℃。由此可见,宁夏地区最高温和最低温增温速率表现为北部地区相对较快,中部和南部地区较为缓慢的趋势。

第二节 降水量时空变化特征

一、降水量的时间变化

宁夏地区深处中国大陆内部,近半个世纪以来,年降水呈现波动减少趋势,减少速率为 2.1 mm/10 a。引黄灌区降水主要集中在 7~9 月,占全年降水量的 70%~80%,年平均蒸发量为 1 825 mm。就季节而言,春夏两季降水呈减少趋势,而秋冬两季降水略有增加(图 1-1-2)。降水减少主要发生在作物播种和生长发育的春夏两季,受季节限制,气象干旱进一步加剧了农田干旱,严重威胁农业生产安全。

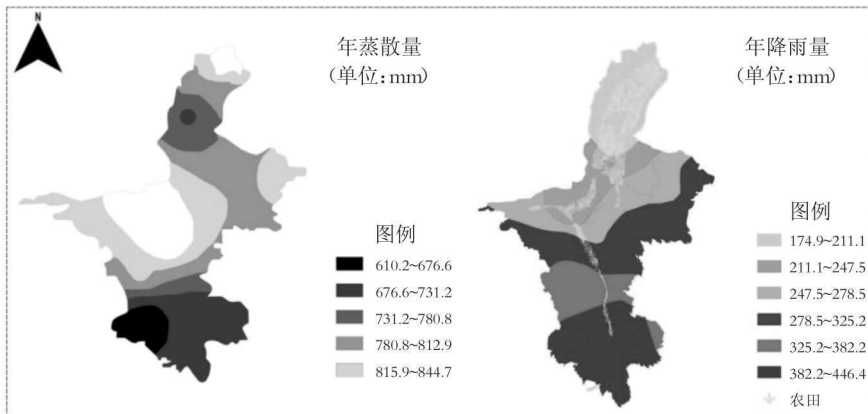


图 1-1-2 宁夏年蒸散量与降雨量分布图(单位:mm)

二、降水量的空间变化

受地形和气流影响,宁夏全区年降水量总体上表现为自南向北逐渐递减的空间格局。近半个世纪以来,年平均降水量,北部引黄灌区和中部

干旱带分别为 185.0 mm 和 288.0 mm, 而南部山区年降雨量相对较高, 在 282.1~765.7 mm 之间。南部山区是宁夏地区降水量最为丰富的地区, 较高的土壤湿度为区域农业发展提供了一定的基础条件。近半个世纪以来, 宁夏地区降水变率存在明显的空间差异性。具体表现为北部引黄灌区降水量呈增加趋势, 增加速率为 0.75 mm/10 a, 而中部干旱带和南部山区呈减少趋势, 减少速率分别为 0.015 mm/10 a 和 19.335 mm/10 a。由此可见, 宁夏各地区降水量呈现北部弱增趋势, 而中部和南部呈现减少趋势。

第三节 干旱时空变化状况

一、干旱的时间变化

从年际尺度来看, 近半个世纪以来, 农业干旱呈现波动变化趋势, 平均干旱在最近几年呈现减弱的趋势, 其中在中部干旱带表现最为明显。就季节而言, 冬季升温速率最大, 而有效降水没有明显增加, 导致冬季耕层土壤水分含量不足, 造成土壤底墒不足。在此情况下, 春季快速增温, 降水减少, 导致春旱加剧。夏季为作物生长耗水量较大的季节, 降水量反而减少, 造成冬春夏 3 季连旱。秋季降水不显著增加, 但难以扭转严重的旱情, 造成作物减产受损。宁夏 3 个不同的生态功能区中, 春季干旱在 4 个季节中均表现最强, 但干旱波动幅度在不同生态功能区有较大差异。其中北部引黄灌区夏季干旱波动幅度最小, 而南部山区夏季干旱波动幅度最大。研究表明, 受气温持续升高, 以及气温与降水的综合影响, 宁夏地区多以春旱为主, 季节上以春夏连旱居多, 春夏连旱严重影响区域农业的可持续发展。

二、干旱的空间变化

宁夏地区是中国农业干旱发生次数最多、危害程度最严重的地区之一。年鉴记载, 近半个世纪以来, 宁夏共发生干旱超过 40 次, 平均每年 1.4 次以上, 并且每年干旱事件持续 3 个月以上, 重度干旱事件时间长达 1 个

月以上。在干旱事件次数持续增加的情况下,宁夏地区年平均最高气温和最低气温均显著上升,升温率分别高达 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.50^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,且最高气温于 1994 年发生了增暖突变。最高气温的急剧升高与突变会导致或加剧该地区的干旱灾害。

近半个世纪以来,宁夏地区各区域干旱均呈显著加重趋势,但空间差异显著。从干旱发生频率来看,在宁夏 3 个不同生态功能区中,南部山区干旱频率最高,中部干旱带次之,而北部引黄灌区最低。从多年干旱程度来看,农业干旱最弱的是北部引黄灌区,而最强的是中部干旱带。宁夏中部干旱带主要以降水不足单一因素驱动,而北部引黄灌区与南部丘陵山区主要是受降水、农业发展以及水文变化等多种因素复杂驱动影响造成的。

近半个世纪以来,宁夏不同生态功能区表现出以干旱为主的特征,但存在一定变化趋势。北部引黄灌溉区的极端干旱事件表现出先减弱后增强的态势,但平均干旱强度表现出先增强后减弱的态势;中部干旱带干旱强度和极端干旱事件表现出明显减弱趋势;南部丘陵山区的平均干旱强度明显减弱,但极端干旱事件表现出先减弱后增强的态势。按干旱尺度来看,不同季节干旱表现差异较大。春季干旱南北差异不大,全区发生春旱的频率都很高。夏季中部干旱带发生干旱频率略高于南部山区和引黄灌区;秋季中部干旱带易发生干旱,但从全区总体干旱情况来看,秋旱发生频率比春夏两季都要低;冬旱则主要发生在南部山区,其发生频率高达 20%以上,而引黄灌区的干旱发生频率则在 5%以下。

三、宁夏地区干旱风险等级分布

近半个世纪以来,宁夏地区气候总体呈现暖干趋势,平均气温、平均最高气温和最低气温均呈上升趋势。宁夏持续性旱灾是气温持续快速上升和降水量减少共同作用的结果,其中气温显著升高是该地区干旱灾害加剧的主要气候因素。

宁夏地区干旱主要以春旱为主,过去半个世纪,共发生春旱 43 年,夏