

青海湖流域生态水文特征及其 对气候变化的响应

李舟 / 著



黄河水利出版社

青海湖流域生态水文特征及其 对气候变化的响应

李 舟 著

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书分析了近 55 年青海湖流域气象要素变化特征;针对流域三种典型生态系统冻融实验,解析了不同植被下垫面土壤水热、能量变化特征;基于 17 年遥感影像时序数据,探讨了流域高寒植被物候时空特征及其对气候变化下土壤水热条件的反馈。最后,基于前述研究成果,模拟分析了青海湖流域生态水文过程对气候变化的响应,并提出相应的减缓和适应气候变化的对策措施。

本书可适用于自然地理学、生态学、水文水资源学等专业的研究生和本科生阅读,也可供相关学科的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

青海湖流域生态水文特征及其对气候变化的响应/李舟
著. —郑州:黄河水利出版社,2018.4

ISBN 978 - 7 - 5509 - 2031 - 6

I. ①青… II. ①李… III. ①青海湖 - 区域水文学 -
关系 - 气候变化 - 研究 IV. ①P344.244②P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 096046 号

组稿编辑:李洪良 电话:0371 - 66026352 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9

字数:208 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 4 月第 1 版

印次:2018 年 4 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

青海湖是我国现存面积最大的内陆封闭咸水湖泊,其所处的青海湖流域位于青藏高原东北部,处于东亚季风区、西北干旱区和青藏高原的交会地带,地理位置独特,生态环境脆弱,流域表面广泛分布着季节冻土和多年冻土,具有显著的高寒半干旱生态系统特征,是维系青藏高原东北部生态安全的重要水体,也是国际重要湿地和国家级自然保护区。然而,现阶段,随着全球气候变化和人类活动的综合影响,青海湖流域内的水资源状况和生态环境面临较大的危机,气候变暖导致土壤融冻期提前、活动层增厚,永久性冻土层逐渐消失,从而失去了对植被根系层养分聚集和含水量的保护作用。人类引水截流以及过度放牧也导致流域草地鼠虫灾害频繁,湖滨地带、河流两侧洼地及河流三角洲地带沼泽植被退化并呈现萎缩趋势,土地沙漠化面积不断扩大,野生动物生存环境恶化。青海湖流域所出现的生态环境问题已经引起了我国政府和广大科研机构的极大关注。国务院在制定全国生态环境规划以及青海省在实施西部大开发战略时,都将青海湖流域列为全国生态环境建设的重点地区。中科院2008年启动了国家科技支撑计划项目“青海湖流域生态和环境治理技术集成与试验示范”,对青海湖流域生态恶化现象开展系统研究。

本书依托北京师范大学李小雁教授主持的国家自然科学基金重点项目“青海湖流域生态水文过程与水分收支研究”(41130640),针对当前青海湖流域所出现的生态环境问题和日益变化的全球气候,开展土壤冻融、高寒植被物候的生态水文特征分析及其对气候变化的响应研究,这对于理解高寒地区冻土和植被协同影响下的生态水文过程,提高生态预警能力和推进可持续发展具有重要的意义。

本书共分为8章,具体章节安排为:第1章简要介绍了青海湖流域的自然地理概况、社会经济状况、现有生态水文研究不足之处及主要研究目标、内容和技术路线。第2章分析了近55年青海湖流域气象要素变化特征。第3章针对流域三种典型生态系统冻融阶段的土壤温度、水分和能量实时数据进行了野外实验观测,解析了不同植被下垫面土壤水热、能量变化特征。第4章基于17年遥感影像(MODIS EVI)时序数据,采用非对称高斯函数拟合法和动态阈值法提取高寒植被关键物候期,探讨了流域高寒植被物候时空特征及其对气候变化下土壤水热条件的反馈。第5章和第6章在前述研究成果基础上,考虑土壤冻融对流域水循环的影响,通过改进SWIM分布式生态水文模型,从流域尺度上模拟预测水文过程和湖水位对气候变化的响应。第7章探讨了气候变化对水资源管理的影响及减缓和适应性对策。第8章对全书进行了总结,得出主要研究结论和创新之处。本书旨在为从事寒区流域生态水文研究的业内人士提供参考,同时推动行业内专家、学者对青

海湖流域的生态水文过程的深入思考和研讨。

由于作者研究水平所限,时间仓促,书中难免有不当和错漏之处,敬请广大读者批评指正。

作者
2018年3月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 青海湖流域自然地理概况	(1)
1.2 青海湖流域社会经济概况	(4)
1.3 青海湖流域生态水文研究现状及存在的问题	(4)
1.4 研究目标及研究内容	(6)
第 2 章 青海湖流域气候变化特征	(9)
2.1 气候特征分析方法	(9)
2.2 气温变化	(11)
2.3 降水变化	(17)
2.4 日照时数变化	(20)
2.5 风速变化	(22)
2.6 参考作物潜在蒸散发量变化	(23)
2.7 讨 论	(27)
2.8 小 结	(28)
第 3 章 青海湖流域典型生态系统冻融过程及土壤水热能量特征	(29)
3.1 寒区生态水文过程研究进展	(30)
3.2 青海湖流域典型生态系统冻融过程野外实验方法	(31)
3.3 青海湖流域不同生态系统冻融过程	(34)
3.4 冻结和融冻期土壤温度变化特征	(36)
3.5 冻结和融冻期土壤未冻含水量变化特征	(41)
3.6 冻融作用下的土壤水热耦合回归曲线	(46)
3.7 冻结和融冻期地表能量变化特征	(48)
3.8 冻结和融冻期土壤参考蒸散发变化特征	(52)
3.9 小 结	(53)
第 4 章 青海湖流域植被物候特征及对气候变化的响应	(55)
4.1 植被物候研究进展	(55)
4.2 植被物候观测方法	(57)
4.3 植被覆盖 <i>EVI</i> 指数变化特征	(59)
4.4 植被典型物候期变化特征	(61)
4.5 植被生长发育对气候变化的响应	(63)
4.6 讨 论	(71)

4.7 小 结	(74)
第5章 青海湖流域生态水文过程模拟分析	(75)
5.1 流域生态水文模型研究进展	(75)
5.2 SWIM 模型概述及组件描述	(76)
5.3 考虑冻融影响的 SWIM 模型改进	(84)
5.4 径流量模拟及冻融效应分析	(92)
5.5 布哈河和沙柳河径流变化特征分析	(97)
5.6 流域年水量平衡分量的空间分布	(101)
5.7 小 结	(103)
第6章 气候变化对青海湖流域水文过程的影响分析	(105)
6.1 气候变化对水文过程的影响研究进展	(105)
6.2 气候变化情景设置	(106)
6.3 布哈河流域气候变化的水文过程响应分析	(109)
6.4 沙柳河流域气候变化的水文过程响应分析	(115)
6.5 布哈河和沙柳河径流模拟差异分析	(119)
6.6 气候变化对青海湖水位的影响	(120)
6.7 小 结	(122)
第7章 气候变化对水资源管理的影响及减缓和适应性对策研究	(124)
7.1 气候变化的影响和危害	(124)
7.2 减缓气候变化措施	(124)
7.3 适应气候变化措施	(126)
第8章 结论与建议	(128)
8.1 主要结论	(128)
8.2 研究特色与创新	(129)
8.3 研究展望	(130)
参考文献	(131)
致 谢	(138)

第1章 绪论

水是重要的自然资源,也是环境不可分割的组成部分,是维系生命和保证生态系统健康发展的关键因素。位于青藏高原东北部和亚洲半干旱气候敏感带的青海湖,是我国面积最大的内陆封闭咸水湖泊,2015年湖泊面积 $4\,399.2\text{ km}^2$,其所属的青海湖流域也是世界七大湿地之一和重要的江河源头,流域总面积 $29\,661\text{ km}^2$,是维系青藏高原东北部生态安全的重要水体,也是阻挡西部荒漠化土地向东部蔓延的天然屏障。

青海湖流域海拔高,气候寒冷,流域表面广泛分布着季节冻土和多年冻土,土壤冻融过程是该地区生态水文过程中最为重要的组成部分,冻融作用下土壤活动层特殊的水热交换是维持高寒生态系统稳定的关键过程,冻结土壤的水分和热量将会影响能量传递、水量平衡以及高寒冻土生态系统对全球气候变化的响应,植被在高寒气候和冻土的双重影响下,通过特殊的水热交换,在长期的自然选择中形成了它们特有的形态和空间分布,并进一步影响着流域的水循环和区域的小气候,具有明显不同于无冻地区的生态水文特征。同时,积雪消融和冻土解冻过程也为青海湖流域所处的半干旱地区提供了可靠的春季径流,对当地灌溉、生态保护和供水具有重要的意义。然而,由于青海湖流域面积广大,地形复杂,自然条件恶劣,野外实验布设和观测难度较大,多数观测资料集中在夏季,对于整个冻融期不同植被下垫面土壤冻融过程的观测还较为稀缺,冻融作用下土壤水热过程的描述相对粗糙,与其他高寒流域,如黑河、塔里木河相比,基础观测工作薄弱,从而制约了对高海拔地区土壤水热变化规律和生态水文特征的认识。

1.1 青海湖流域自然地理概况

1.1.1 地理位置

青海湖流域($36^{\circ}32' \sim 37^{\circ}15' \text{N}$, $99^{\circ}36' \sim 100^{\circ}47' \text{E}$)位于青海省东北部(见图1-1),东为日月山、南为青海南山、西为天峻山、北为大通山,流域面积为 2.97 万 km^2 ,海拔 $3\,194 \sim 5\,291\text{ m}$ 。在流域内部地势最低处发育了巨大的水体——青海湖,其水面面积达 $4\,399.2\text{ km}^2$,是我国现存面积最大的内陆封闭咸水湖泊。

1.1.2 地形、地貌

青海湖流域四周被高山环绕,是一个封闭式山间内陆盆地,位于青海省西部的柴达木盆地与东部湟水谷地以及南部江河源头与北部祁连山地之间。整个盆地由西北向东南倾斜,海拔逐渐递减,最高处为 $5\,200\text{ m}$,最低处为 $3\,000\text{ m}$ 。地貌类型分为湖滨平原、冲积平

原、低山、中山和高山、冰原台地和现代冰川,十分复杂。其中以湖区山地为主,占到青海湖流域总面积的 68.6%,山势陡峻、沟谷密布并多冰蚀地形,而河谷及湖积平原较小,约占流域总面积的 31.4%。在湖边及低洼地带分布有沼泽地,在湖的西部和北部发育着河漫滩、三角洲及河流堆积阶地,湖岸周围分布有沙堤阶地,在山麓与平原交替地带分布有洪积扇。

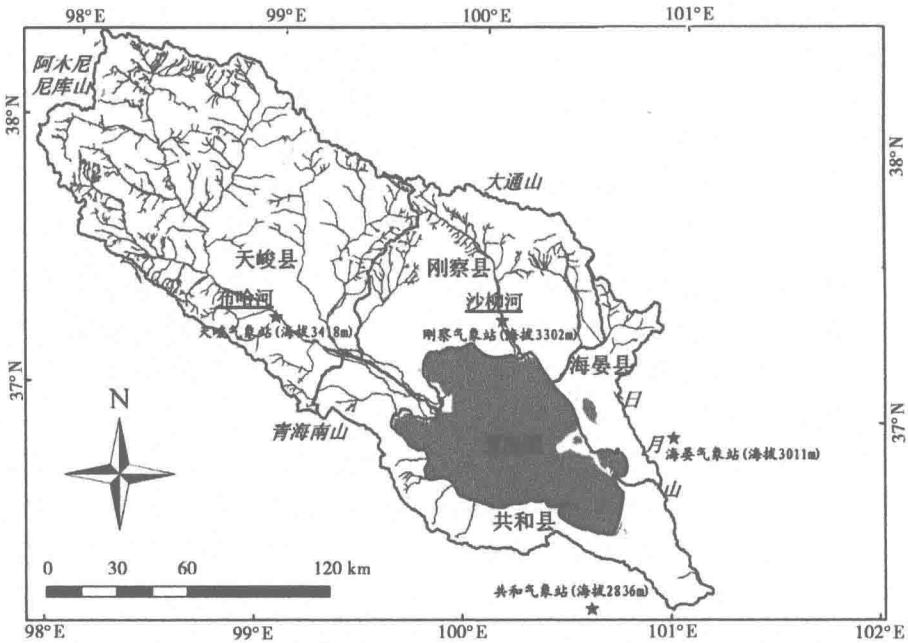


图 1-1 青海湖流域地理位置

1.1.3 气候

青海湖流域属于青藏高原温带大陆性半干旱气候,表现为冬季寒冷漫长、夏季温凉短促、气温日较差大、降水较少且集中于夏季、蒸发量大、太阳辐射强烈、日照充足、风力强劲等气候特征。流域年平均气温在 $-1.1 \sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气温自流域东南向西北递减,由于“湖泊效应”,湖区气温较高,边远山地较低,海拔 3 800 m 以上的广大地区,年平均气温均在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。流域年平均降水量在 291 ~ 579 mm,受地形、海拔差异等因素影响,降水空间分布不均,湖北岸降水量由北向南递减,大通山一带约为 500 mm,至湖滨地带降水约 340 mm;而湖区的南岸则正好相反,降水量从南向北递减;湖西在布哈河下游河谷地带自东向西递减;湖区东部则从东向西至湖滨递减;湖滨四周向湖中心递减。青海湖流域地处高寒干旱半干旱区,蒸发量大,多年平均蒸发量为 1 300 ~ 2 000 mm,蒸发量空间分布特征与降水量相反,海拔较低的湖滨平原和河谷地带蒸发量较大,而海拔较高的山区蒸发量较小。由于受高空西风带和东南季风带共同影响,境内常年多风,夏秋两季以东南风为主,冬春两季则偏西风盛行且风力强劲,年均风速 $3.0 \sim 4.2\text{ m/s}$ 。由于青海湖地区地处内陆高原,日照充分,年日照时数达到 2 480 ~ 3 400 h,年总辐射量为 $590 \sim 690\text{ kJ/cm}^2$ 。

1.1.4 土壤特征

青海湖流域内地形、地貌复杂多样,气温、降水垂直变化显著,土壤的主要成土母质因地形地貌的不同而有所差异。从地形地貌看,地势较低的冲积和洪积平原、河谷和湖滨地区,成土母质主要是冲积物、洪积物及湖积物;地势较高的山坡为岩石风化的残积物、坡积物以及冰积物。

青海湖流域的土壤类型主要包括草甸土、栗钙土、黑钙土、风沙土、沼泽土、草毡土、黑毡土、寒钙土等。流域地带性土壤为栗钙土,主要分布在海拔较低的湖滨平原和冲积平原;其上为黑钙土,主要分布在海拔3 200~3 500 m的山前冲积、洪积平原,在山地阳坡,海拔3 400~3 750 m的低山丘陵和平缓山顶分布有山地草甸土,海拔3 700~4 200 m的山地缓坡分布着高山草甸土,海拔3 800~4 400 m的山地河谷和缓坡地带分布着高山草原土,海拔3 900 m以上、雪线以下的高山流石坡还有高山寒漠土。此外,海拔3 300~4 000 m的中低山地阴坡有山地灌丛草甸土分布,石乃亥南部山地有少量灰褐土分布,非地带性风沙土主要分布在湖滨沙地。

1.1.5 植被特征

草甸是青海湖流域内分布最广的植被类型,其草本物种种类丰富,成分复杂,草本层普遍较低,但生长茂密,群落盖度在0.7~0.9,分布在海拔3 100~4 000 m,占到流域总面积的60%;高寒草原和温性草原次之,多分布在青海湖丘陵平原,约占流域总面积的14%,高寒草原以紫花针茅草原为主,其覆盖面积约为3 100 km²,物种组成相对较少,伴生种以菊科和禾本科植物为主。温带草原以芨芨草草原为主。芨芨草属于较为高大的密集草丛,为禾本科植物,呈斑点状或片状分布,具有耐盐、抗寒、抗旱等特征,流域内典型灌丛有金露梅灌丛、毛枝山居柳灌丛以及水柏枝灌丛,其中水柏枝灌丛主要分布在河岸带,是河岸带生态系统的代表植被类型。金露梅灌丛呈斑块状分布在嵩草草甸周围,总面积在1 700 km²左右,伴生有老芒麦、珠芽蓼、青藏苔草等物种。水柏枝灌丛的生长需要有充分的水分供应,因此该植被类型主要分布在河谷附近,范围较小,其伴生种也相对较少。

1.1.6 水文状况

青海湖流域地处我国内陆半干旱区,是一个内陆封闭微咸水湖,除青海湖外,青海湖流域还有众多湖泊分布,且大多为间歇性河流,其特点是:干流较短,但雨季流量较大,流域多年平均径流量16.68亿m³,径流分布与降水分布基本一致,湖北岸为高值区,布哈河南岸和湖东地区为两个低值区,水系分布明显不对称,区域西部和北部河流数量较多,流量也较大;东部和南部则与此相反。主要的河流有布哈河、沙柳河、哈尔盖河及泉吉河等,四条河的年总径流量达13.71亿m³,占入湖地表径流量的80.19%。

其中,布哈河是该流域最大的河流,发源于青海省天峻县疏勒南山,位于流域的西北部,全长270 km,流域面积为14 337 km²,占青海湖流域的48%,海拔从3 188 m到5 279

m 不等,年均径流量约为 7.9 亿 m^3 ,约占青海湖入湖流量的 51%,从西北向东南流入青海湖,流域内海拔 4 000 m 以上常年冰雪覆盖,4 000 m 以下主要为草原,间有块状水柏枝林、沙棘林等,植被率较高,径流主要由冰川雪水、降水、地下径流补给组成。降水周期是 5~9 月,而径流集中在 6~10 月,在冬季几乎没有降水。沙柳河流域位于青海湖北部的刚察县境内,全长 106 km,面积为 $1\,442 \text{ km}^2$,年平均径流量为 2.2 亿 m^3 ,占到青海湖总入湖流量的 16%。区内流域以积雪融水和降雨补给为主。

1.2 青海湖流域社会经济概况

青海湖流域行政区划分别隶属于青海省海南藏族自治州的共和县、海西蒙古族藏族自治州的天峻县、海北藏族自治州的刚察县和海晏县,范围共涉及 3 州 4 县 25 个乡镇(镇)。此外,流域范围内还有 5 个省、州、县属国有农牧场,分别为青海省农牧厅管辖的三角城种羊场(刚察县境内)、三江集团公司管理的湖东种羊场和铁卜加草原改良试验站(共和县境内),海北藏族自治州管辖的青海湖农场(刚察县境内)、刚察县属黄玉农场。

青海湖流域是多民族聚居地区,区内有汉族、藏族、回族、撒拉族、蒙古族等 12 个民族,少数民族人口约占湖区人口总数的 62.90%,藏族人口占少数民族人口的 90% 以上。流域人口密度平均每平方千米不足 5 人,但人口分布很不均匀。在环湖的狭长地带,特别是河流沿岸或道路沿线,由于其地形平坦、水源充足、交通便利,成为人口主要集聚区。如以刚察县为中心的青海湖北岸湖滨三角地带、南岸共和盆地等,人口密度较大;而周围的山地,主要是牧民的夏季草场,没有定居点。

1.3 青海湖流域生态水文研究现状及存在的问题

现阶段,随着全球气候变化和人类活动的综合影响,青海湖流域内的水资源状况和生态环境面临较大的危机。流域内冻土对周边气候变化高度敏感,气候变暖导致土壤融冻期提前、活动层增厚,永久性冻土层逐渐消失,从而失去了对植被根系层养分聚集和含水量的保护作用。流域内植被同样表现出对气候变化的敏感性,气候变暖导致高寒植被生长发育时间、绿度、生产力等出现异常,引起生态系统的功能和结构发生明显变化,对原有的生态系统平衡造成严重影响。许多研究都发现,青海湖所处的青藏高原地区高寒植被出现返青期提前的反馈气候变化的物候现象。植物物候提前后,由于种子萌发和幼苗生长没有处于一个最佳的生态环境中,从而导致植物存活率下降。与此同时,受人类过度放牧等影响,青海湖流域草地鼠虫灾害频繁,湖滨地带、河流两侧洼地及河流三角洲地带沼泽植被退化并呈现萎缩趋势,土壤沙漠化范围不断扩大,导致生态环境持续恶化。

青海湖流域显著的增温趋势及其所出现的生态环境问题已经引起了我国政府和广大科研机构的极大关注。国务院在制定全国生态环境规划以及青海省在实施西部大开发战略时,都将青海湖流域列为全国生态环境建设的重点地区。中国科学院 2008 年启动了国

家科技支撑计划项目“青海湖流域生态和环境治理技术集成与试验示范”,对青海湖流域生态恶化现象开展系统研究。同年8月1日,国际著名自然科学学术期刊《Science》(321卷)发表了以青海湖流域为代表的青藏高原生态环境治理的报道。青海湖流域所出现的危机归根结底主要是水和生态的问题。因此,在气候变化背景下,深入分析和预估该地区生态水文动态变化特征及趋势,对于维持青海湖流域生态安全和可持续发展就显得尤为关键。

植被是陆地生态系统的重要组成部分,植被生长的物候现象可以动态地反馈生物对气候变化和水文情势的响应信息,能够指示大气、水、土壤等因素的变化,在生态系统碳循环和水文循环中发挥着重要的作用。然而,近年来有关青海湖流域的植被物候研究较少,大部分研究主要集中于整个青藏高原,侧重于探讨植被物候时空特征演变趋势,而对于影响植被返青期的气候因子方面研究相对薄弱。因此,开展青海湖流域植被物候变化特征及其影响因素研究,不仅有利于掌握该地区气候变化规律及其对生态系统的影响,也可对青海湖等高海拔地区植被的变化趋势及全球生态系统起到预警作用。

青海湖流域是一个复杂的生态水文系统,冻土、植被、气候等各环境因素相互作用机制复杂,且流域自然条件较差,水文站网密度严重偏稀。当前,分布式生态水文模型是探索和模拟高寒等无资料或缺少资料地区水文过程与生态格局间相互关系的重要工具,它充分考虑了自然生态系统的生物物理和生物化学作用及水文要素的空间异质性,在模型嵌套耦合、气候变化影响、流域水循环和水资源演变规律等方面具有明显的优势,对于我们理解寒区冻土和植被协同影响下的生态水文过程,执行水文模拟、水资源评价及流域水资源管理决策等方面发挥着重要的作用。

根据研究区域尺度,当前有关青海湖流域生态水文研究主要集中在两种尺度:一是点尺度,众多学者都在青海湖流域开展了典型生态系统的植被水分利用机制和水分胁迫的响应特征等方面相对微观尺度的生态水文研究,马育军等(2012)在青海湖流域选取具鳞水柏枝作为研究对象,通过野外实验,分析了冠层降雨再分配特征及影响因素,结果表明冠层降雨再分配各组成要素与降雨特征参数存在较强的相关性。宋理明和娄海萍(2006)通过近10年的土壤水分观测资料,研究了天然草地土壤含水率的时空变化规律,以及与降水的关系,发现融冻期土壤含水率主要受前期冻结时土壤储存的水量影响,而返青期土壤含水量与当期和前期降水具有显著的相关性。吴华武(2016)通过测定青海湖流域芨芨草植物茎水和各潜在水源中 δD 、 $\delta^{18}O$ 组成,探究其水分利用来源,结果表明芨芨草根系统主要利用不同深度的土壤水。在植被生态系统的蒸散发及其年内变化规律的研究方面,Zhang等(2014)在青海湖河岸地带测量具鳞水柏枝的蒸散发量和地表热通量,结果显示,由于冻土的存在,在植被生长季,植被蒸散发占据了全年蒸散发的80%,而在非生长季却很低,温度和净辐射是控制蒸散发的关键因素,并推测气候变暖将影响土壤冻融,并进一步影响具鳞水柏枝的蒸散发进程和地表能量收支。在流域尺度的生态水文方面,现有研究主要集中在青海湖水量平衡分析与水资源变化、青海湖水位变化及其成因,以及气候变化和土地利用对河川径流的影响等方面。刘吉峰等(2007)和孙永亮(2008)在青

海湖流域应用 SWAT 分布式水文模型分别模拟气候变化、土地利用覆被变化以及人类活动对水文过程的影响,发现气候变化对径流量的影响最大,在暖湿条件下有利于径流量的增加,青海湖水位下降的速度将得以减缓。

虽然青海湖流域生态水文研究取得了一定进展,但在以下几方面还存在不足:

(1) 由于青海湖流域自然条件恶劣,水文站网密度严重偏稀,对于整个冻融期不同下垫面土壤冻融过程的观测比较少,冻融过程的描述相对较少。

(2) 冻融区在水循环和“三水”转换方面与无冻地区具有明显的差异,现有青海湖流域水文模型研究中很少考虑冻土冻融过程等寒区水文要素,尚不能全面反映该地区特殊的水文特征。

(3) 气候条件是控制植被返青期空间格局的两个关键性物理环境因子,一些学者已从气温、降水等方面对青海湖流域高寒植被物候的影响进行了大量研究,而对于土壤水热的空间异质性对流域中植被返青期的影响研究还较为缺乏。

(4) 青海湖流域是一个复杂的生态水文系统,以往研究大多采用单纯的水文模型进行径流模拟,侧重于单一的水循环过程,具有局限性,忽略了植被变化对水文过程的影响,与其他高寒流域相比,在耦合生态过程与水文过程的流域生态水文模型模拟研究方面还较为缺乏。

综上,针对当前青海湖流域所出现的生态环境问题和日益变化的全球气候,本书首先从青海湖流域最典型的寒区生态水文特征——土壤冻融入手,对比分析流域中嵩草甸、金露梅灌丛和芨芨草草原三种典型生态系统土壤冻融过程及水热变化特征。其次,通过遥感反演探讨流域高寒植被生长发育的物候时空特征及其对气候变化下土壤水热条件的反馈。最后,在流域尺度上,借助流域生态水文模型,通过模拟和情景分析等手段,研究变化环境下冻融、植被两大生态水文要素对水文循环过程的影响,从而实现从多角度多尺度对青海湖流域独特生态水文特征进行综合研究。这对于加强青海湖地区的生态文明建设、推进可持续发展和减缓或预防青藏高原环境变化中的风险都有重要的意义,也为进一步揭示高海拔地区陆-气响应机制提供参考。

1.4 研究目标及研究内容

1.4.1 研究目标

本书基于水文气象和遥感等数据,综合运用数理统计法、野外实验、遥感观测和模型模拟等手段,研究并揭示气候变化下青海湖流域生态水文过程的变化特征,以弥补现有研究的不足,并重点解决如下问题:

(1) 深入认识以青海湖流域为代表的高寒地区典型生态系统冻融过程和土壤温度、水分及能量变化特征,定量预估气候变化对青海湖流域水文循环要素和湖水位的影响。

(2) 分析青海湖流域植被物候时空分布格局,揭示气候变化下土壤水热时空变化对

高寒植被返青期时空格局的影响。

1.4.2 研究内容

(1) 近 55 年青海湖流域气象要素变化特征分析。

基于 1961 ~ 2015 年青海湖流域及周边四个气象站历史资料,选取一元线性回归、累积距平法、滑动平均等方法,分析气温(平均气温、最高气温、最低气温)、降水量、日照时数、风速、参考作物潜在蒸散发量变化的基本规律和趋势,通过单调趋势的非参数统计检验 Mann - Kendall、Sen's 坡度检验法、Kendall 等级相关法及 Pettitt 方法对气象要素变化趋势的显著性和突变进行检验。

(2) 青海湖流域典型生态系统冻融过程及水热、地表能量的变化特征。

选择青海湖流域内嵩草草甸、金露梅灌丛、芨芨草高寒草原三种典型陆地生态系统,在对流域季节性冻土冻融过程野外观测数据分析的基础上,描述土壤冻融过程,辨识影响冻融的主要因素变化情况,分析不同深度下土壤温度、土壤水分的月日变化特征和垂向变化规律及土壤水热耦合关系,研究冻融过程对地表能量收支和参考蒸散发的影响。

(3) 青海湖流域植被物候特征及对气候变化的反馈。

选取青海湖流域高寒草地生态系统为研究对象,基于 MODIS EVI(增强型植被指数, Enhanced Vegetation Index)时序数据和野外采集样点数据,应用非对称高斯函数拟合法和动态阈值法提取了青海湖流域 2000 ~ 2016 年 EVI 植被指数和典型植被物候期(返青期、枯黄期、生长季),分析其 17 年间平均状况的时间及空间格局变化特征。在青海湖流域气候增温背景下,应用温度植被干旱指数法遥感反演土壤水分,分析春季浅层(0 ~ 10 cm)土壤水分和地表温度时空变化对植被返青物候时空格局变化的影响。

(4) 青海湖流域水文过程模拟及对气候变化的响应。

针对青海湖流域高寒特征,结合土壤冻融水热过程观测实验,在 SWIM 分布式生态水文模型中考虑冻融影响因素,从而改进模型。选择青海湖流域布哈河、沙柳河子流域为研究对象,应用改进的 SWIM 模型进行流域尺度生态水文过程模拟,通过率定模型参数和验证模拟效果,评价模型的适用性。基于模拟结果,探讨土壤冻融作用下的水文效应,分析两大支流水量平衡分量的时空特征。基于青海湖流域近 55 年气候变化特征和 IPCC 气候评估,设置未来气候变化情景,分解降水、气温两大气候因子,利用改进型 SWIM 模型,定量预估不同情景下的水文要素的敏感程度和湖水位的变化趋势。

1.4.3 技术路线

本书技术路线如图 1-2 所示。

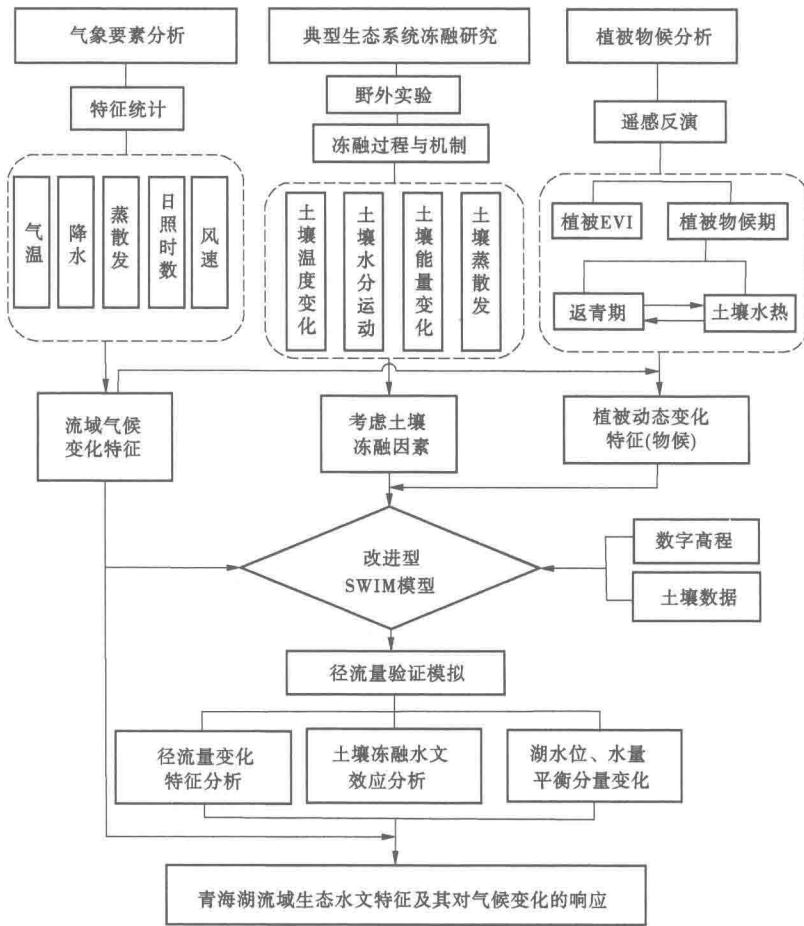


图 1-2 技术路线图

第2章 青海湖流域气候变化特征

气候是影响地表水资源的重要因素。气象和水文变量如温度和降水对气候变化极为敏感,水文过程的长期趋势还将可能受到气候变化的影响。青海湖流域地处高寒半干旱区,地形复杂,水文气象等要素变化独特,且对全球变化极为敏感。因此,深入认识青海湖流域各气象因子的历史变化规律,将有助于揭示气候变化对该地区水资源的影响。本章选取青海湖流域及周边地区主要气象观测站 55 年来的长系列气象观测资料,选取一元线性回归法、累积距平法、滑动平均法等方法,对气温、降水量、日照时数、风速和参考作物潜在蒸散发量进行趋势分析与判断,通过单调趋势的非参数统计检验 Mann - Kendall (M - K) 检验法和 Sen's 坡度检验法、Kendall 等级相关法及 Pettitt 突变检验法对气象要素变化趋势显著性和突变性进行检验,从而为流域水文模拟及气候变化响应分析提供重要依据。

2.1 气候特征分析方法

2.1.1 Mann - Kendall (M - K) 检验法和 Sen's 坡度检验法

对于长期气候变化趋势,假设检验有助于理解水文气象过程的内在机制。非参数统计检验 Mann - Kendall (M - K) 检验法常被用来检验气象要素变化趋势的显著性。给定 x_1, x_2, \dots, x_n 为一组平稳的时间序列变量,其长度为 n , M - K 检验法定义了统计量 S :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2-1)$$

式中: n 为样本系列数; x_j, x_k 为第 j, k 年对应的测量值,且 $j > k$, 而

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

M - K 检验法有两个重要的检测趋势参数,置信度显示趋势的长度,斜率大小表示趋势的大小和方向。假设有向上(或向下)趋势数据不会被排除,如果 S 有零平均和方差,就否定该时间内没有变化的假设。那么又定义了以下变量:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2-3)$$

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

式中: Z_{MK} 为正态分布的统计量; $Var(S)$ 为方差。 $Z_{MK} > 0$ 表示上升趋势, $Z_{MK} < 0$ 表示下降趋势。

如果时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 存在变化趋势, 则可采用 Sen's 坡度检验法(蔺学东等, 2007), 对时间序列的变化程度进行估算, 其公式为:

$$f(t) = Qt + A \quad (2-5)$$

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad k < j \quad (2-6)$$

式中: Q 为斜率, 表示变化趋势的大小, $Q > 0$ 表示时间序列为上升趋势, $Q < 0$ 表示为下降趋势; A 为常数。

若时间序列的长度为 n , 则可得到 $N = n(n-1)/2$ 个 Q_i , 且 Q 的大小由 N 决定:

$$Q = \begin{cases} Q_{(N+1)/2} & N \text{ 是奇数} \\ \frac{1}{2}(Q_{N/2} + Q_{(N+2)/2}) & N \text{ 是偶数} \end{cases} \quad (2-7)$$

2.1.2 Kendall 等级相关法

在气象要素等时间序列变化趋势的检验过程中, Kendall 等级相关法(又称 τ 检验法)被广泛应用。

对于一组平稳时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 确定所有对偶值($x_i, x_j, j > i$)中 $x_i < x_j$ 出现的次数 p 。顺序(i, j)的子集是: ($i=1, j=2, 3, 4, \dots, n$), ($i=2, j=3, 4, 5, \dots, n$), \dots , ($i=n-1, j=n$)。如果按顺序前进的下一个值均大于前一个值, 这是一种上升趋势, 则 p 为 $(n-1) + (n-2) + \dots + 1$, 即 $p = (n-1)n/2$ 。若按顺序前进的下一个值均小于前一个值, 即为下降趋势, 则 $p=0$ 。可知, 对于无趋势的序列, p 的数学期望:

$$E(p) = \frac{n \times (n-1)}{4} \quad (2-8)$$

构造检验统计量:

$$\tau = \frac{4p}{n \times (n-1)} - 1 \quad (2-9)$$

$$Var(\tau) = \frac{2 \times (2n+5)}{9n \times (n-1)} \quad (2-10)$$

$$N = \frac{\tau}{\sqrt{Var(\tau)}} \quad (2-11)$$

当 n 增加时, N 收敛于标准正态分布。如果 $|N| > N_{n/2}$, 则正的 N 值代表递增趋势, 负的 N 值代表递减趋势。

2.1.3 Pettitt 突变检验法

本研究采用 Pettitt 突变检验法对青海湖流域各气象要素时间序列进行突变检验。该检验法基于 Mann-Whitney 的统计量 $U_{i,N}$, 可以用来检验两个样本 x_1, x_2, \dots, x_i 和 $x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_N$ 是否来自一个总体, 其计算公式为: