

陈雪萍,赵学勇,王瑞雄,等.气候变化与土地利用/覆被变化对中国北方农牧交错带水资源影响研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):170-177.

# 气候变化与土地利用/覆被变化对中国北方农牧交错带水资源影响研究进展

陈雪萍<sup>1,2</sup>, 赵学勇<sup>1</sup>, 王瑞雄<sup>1,2</sup>, 宁志英<sup>1,2</sup>, 卢建男<sup>1,2</sup>, 赵思腾<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**中国北方农牧交错带对全球变化响应敏感,研究气候变化及土地利用/覆被变化(LUCC)背景下北方农牧交错带水资源问题,对变化环境下生态脆弱区的水资源利用与管理具有重要意义。通过对北方农牧交错带气候与LUCC演变特征及其对水资源影响等方面的综合研究,总结得出:(1)近几十年,该地区气候呈暖干化趋势,气温升高速率与降水减少速率均高于全球平均水平。(2)LUCC以农牧相互转化为主,土地利用结构未发生明显变化。(3)该地区流域径流、地下水位与气温负相关,与降水量正相关,且降水作用更明显;近几十年来,LUCC成为影响该地区生态水文过程的主导因素,对水资源影响的贡献率越来越大。同时,针对目前研究中存在的问题及薄弱环节,提出未来研究的发展趋势和亟需重点加强的研究方向。

**关键词:**北方农牧交错带;气候变化;LUCC;水资源变化

文章编号:1000-694X(2022)03-170-08

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00115

中图分类号:P641.8

文献标志码:A

## 0 引言

水是人类生存发展不可替代的资源<sup>[1]</sup>,水资源问题已成为全球性问题。参考狭义水供需关系,本文涉及的水资源指参加水文循环的径流性水,包括地表水和地下水<sup>[2]</sup>。变化环境下的水文与水资源是全球变化研究的热点<sup>[3]</sup>。气候变化和土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)是环境变化的重要组成部分,也是影响水资源变化的直接因素<sup>[4-5]</sup>。全球200条较大河流有22%的河流径流量减少趋势非常明显<sup>[6]</sup>。IPCC报告指出,气候变化引起全球降水模式的改变,从而改变了全球水循环,直接影响到水资源总量变化和时空再分配<sup>[7-8]</sup>。气候变化改变大气环流条件,气象因子发生变化影响水文与水资源过程<sup>[9]</sup>。此外,气候变化会增加区域极端水文事件发生概率和持续时间,极端干旱会导致区域地下水开采量增加<sup>[10]</sup>及地下水补给量的变化<sup>[11]</sup>。LUCC是人类活动的重要体现,也是水文变

化的重要驱动因素<sup>[12]</sup>,通过改变流域下垫面状况对流域产汇流过程、水循环空间格局以及时空配置产生影响<sup>[13-14]</sup>。LUCC还会影响地下水补给。对全球大部分地区而言,气候变化和LUCC将在未来50—100年发挥重要作用<sup>[15]</sup>。但二者共同作用对不同尺度水资源产生的影响差异较大<sup>[16]</sup>。

中国北方农牧交错带是中国生态系统较为脆弱的地区,也是全球变化反应敏感的生态系统过渡带<sup>[17]</sup>。该地区水资源贫乏且利用强度大。因此,水成为决定该地区社会经济和生态环境的限制性因素。随着农牧交错带人口迅速增长,耕地面积不断扩张,水资源需求日益增大,导致该地区出现河流水量减少、河湖萎缩、地下水位下降等一系列问题,严重影响该地区人类生活与经济发展。

因此,梳理变化环境对中国北方农牧交错带生态脆弱区水资源研究进展,能够系统了解变化环境对水资源作用的研究现状和发展态势。同时,针对目前研究存在的不足提出合理建议,为应对未来变

收稿日期:2021-07-27; 改回日期:2021-09-03

资助项目:国家科技基础资源调查专项(2017FY100200)

作者简介:陈雪萍(1993—),女,甘肃靖远人,博士研究生,研究方向为生态水文遥感。E-mail: chenxp0305@163.com

通信作者:赵学勇(E-mail: zhaoxy@lzb.ac.cn)

化环境对该地区水资源影响以及开发管理提供有力的科学依据。

## 1 北方农牧交错带概况

### 1.1 北方农牧交错带范围

北方农牧交错带的范围划分标准各异,本文参考赵哈林等<sup>[18]</sup>研究成果,以降水年变率15%—30%、干燥度1.0—2.0为界限,界定北方农牧交错带位于34°48′—47°19′N、101°43′—126°00′E,沿400 mm等降水量线自东北向西南纵贯中国北部。北起大兴安岭西麓呼伦贝尔,向南延伸,跨越黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、北京、山西、陕西、甘肃和宁夏10个省(市区),面积约65万km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。依据自然地理位置、生物气候及自然经济特点,将整个区域大致分为3段(图1)。东北段包括黑吉辽西部和内蒙古东北部,水资源条件相对较好;华北段包括河北、北京、山西北部 and 内蒙古中部,是交错带最典型的地段;西北段包括陕甘宁的东北部,交错带较窄,降水少<sup>[20]</sup>。

### 1.2 北方农牧交错带水资源面临的问题

北方农牧交错带东西跨度大,大部分地区水资源匮乏,降水少蒸发强,难以形成地表水或补给地下水,河网不发达。

水资源匮乏,时空分布不均。北方农牧交错带属于半湿润半干旱气候。年降水量250—450 mm;降水集中在7—8月,占年降水量50%左右<sup>[21]</sup>。东北段位于季风气候区,降水多、蒸发弱,河流水系相对发

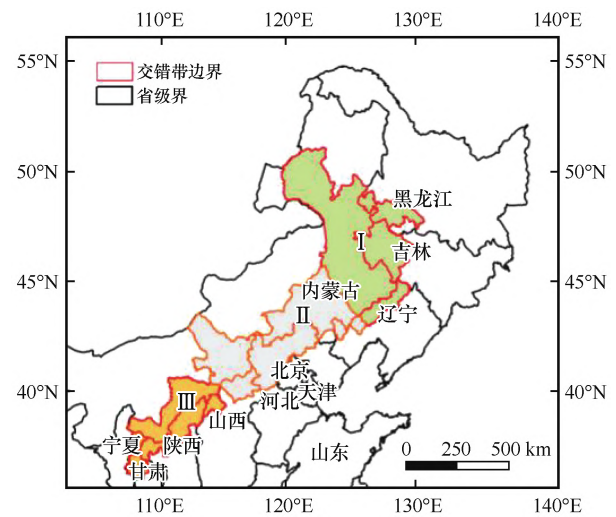


图1 中国北方农牧交错带区域位置(I.东北段、II.华北段、III.西北段)

Fig.1 The location of agropastoral transitional zone of northern China (I, Northeast part; II, North China part; III, Northwest part)

达<sup>[22]</sup>。华北段人口密集,工农业耗水量大,地下水超采严重<sup>[20]</sup>。西北段位于黄土高原,降水少、蒸发强;地表河流下切严重,地下水储量少且埋藏较深,水资源难利用<sup>[23]</sup>。

河湖萎缩、河道断流,湖泊水库干涸。受自然与人类社会综合影响,河流上、中游过量耗水,导致下游径流衰减、河道断流<sup>[24]</sup>。如2000—2019年赤峰境内老哈河流域,径流量从2.91亿m<sup>3</sup>减少为0.1亿m<sup>3</sup><sup>[25]</sup>。1995—2012年西拉木伦河,径流量减少率为每10年3.422亿m<sup>3</sup><sup>[26]</sup>。此外,该地区部分湖泊面积也呈现不同程度的缩减(表1)。

表1 近70年中国北方农牧交错带部分湖泊面积变化

Table 1 Changes in the area of some lakes in the northern agriculture-pastoral zone of northern China in the past 70 years

湖泊名称	时段(年份)	湖泊面积/km <sup>2</sup>	面积变化量/km <sup>2</sup>	面积变化率/(km <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	文献来源
呼伦湖	1961—2018	2 360—1739	621	72.84	王鹏飞等 <sup>[27]</sup>
奈曼西湖	1962—2001	25—0	25	0.64	张桂英 <sup>[28]</sup>
黄旗海	1975—2015	69—5.8	63.2	15.8	付意成等 <sup>[29]</sup>
达里诺尔	1983—2018	224.8—214.3	10.5	17.4	木希叶乐等 <sup>[30]</sup>
查干诺尔	1988—2017	99—29.8	69.2	2.38	丹旻 <sup>[31]</sup>
岱海	1989—2018	158.8—53.64	62.3	2.15	刘旭隆 <sup>[32]</sup>

地下水水位下降明显。地表水匮乏,工农业用水高度依赖地下水,使地下水开采量居高不下。开采严重地区形成地下水漏斗、地裂缝,地下水流场也出现了大幅变动<sup>[33-34]</sup>。朱永华<sup>[35]</sup>指出,1980—2015

年半干旱农牧交错带地下水埋深由2.39 m增加至6.23 m,上升变化率为每10年1.835 m;部分超采区达15.6 m。Feng等<sup>[36]</sup>利用GRACE模型反演华北地区2003—2010年地下水储量,结果显示地下水消耗

速率为  $8.3 \pm 1.1 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 是中国北部平原地下水消耗率  $2.5 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$  的3倍, 华北地区深层地下水已严重亏损。丁元芳等<sup>[37]</sup>发现2001—2016年西辽河流域地下水储量亏空超过100亿  $\text{m}^3$ 。北方农牧交错带地下水超采严重, 对生态保护和区域可持续发展埋下隐患。

## 2 北方农牧交错带气候变化和LUCC特征

### 2.1 气候变化特征

全球气候变暖背景下, 北方农牧交错带持续暖

干化现象明显, 干旱灾害频发, 极端气候事件增多<sup>[38]</sup>。过去半个多世纪, 该地区气温增长速率为每10年  $0.39 \text{ }^\circ\text{C}$ , 明显高于全球平均水平的每10年  $0.12 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[39]</sup>。闫冠华等<sup>[40]</sup>认为, 20世纪90年代以前北方农牧交错带气温、降水变率不大, 90年代以后气温急剧增长, 降水量下降趋势明显。方梓行等<sup>[22]</sup>指出1971—2015年, 北方农牧交错带增温明显。近70年北方农牧交错带气温和降水变率基本保持平稳, 东北段降水变率下降最明显; 华北段降水变率区域差异较大; 西北段气温变率上升最明显, 降水变率不大(表2)。

表2 近70年中国北方农牧交错带气候变化

Table 2 Climate changes in the northern farming-pastoral zone of northern China in the past 70 years

序号	时段(年度)	研究区	每10年气温变率/ $^\circ\text{C}$	每10年降水变率/mm	文献
1	1960—2011	东北段	0.34	-9.88	[41]
2	1951—2006	华北段(科尔沁沙地)	0.28	—	[42]
3	1951—2015	华北段	0.26	-15.6	[43]
4	1955—2014	华北段	0.45	—	[44]
5	1961—2018	华北段(科尔沁沙地)	0.33	-0.04	[45]
6	1960—2016	西北段	0.34	-2.7	[46]
7	1960—2010	西北段	0.38	—	[47]
8	1974—2006	西北段(榆林市)	0.46	-1.0	[48]
9	1980—2013	西北段(武川县)	0.50	-0.06	[49]
10	1961—2012	全区	0.33	-4.98	[50]
11	1964—2011	全区	0.40	-2.6	[51]
12	1971—2015	全区	0.39	-4.60	[22]

### 2.2 土地利用/覆盖类型变化特征

北方农牧交错带土地利用类型以耕地、林地和草地为主, 面积约  $43 \text{ 万 km}^2$ , 占  $91.83\%$ <sup>[52]</sup>, 为该区主要的土地利用类型, 对其变化特征的解释具有代表性。刘军会等<sup>[53]</sup>指出, 1988—2000年北方农牧交错带土地利用类型相互转换复杂, 但仍以耕地、草地相互转化为主, 1995年前后土地转化数量相差3倍, 前期土地转化面积达  $2.2 \text{ 万 km}^2$ , 后期转化较缓。土地利用结构未发生重大变化。刘孟竹等<sup>[54]</sup>研究2000—2018年北方农牧交错带土地利用类型变化, 发现2010年以前耕地、林地、草地发生急剧变化, 18年间, 耕地与草地互相转化面积最大, 超过  $1.67 \text{ 万 km}^2$ 。

总之, 近30年来, 中国北方农牧交错带土地利

用类型处于快速变化之中, 以农牧间相互转化为主。这与该区农业与畜牧业此消彼长、反复进退的特点密不可分。土地利用结构未发生明显变化, 仍以耕地、草地为主。近年来国家实施的生态建设工程如“三北”防护林工程、退耕还林还草工程等在LUCC过程中起到了不可忽视的作用, 使土地利用结构向良性方向发展, 但土地退化问题仍然十分突出<sup>[55]</sup>。

## 3 变化环境对北方农牧交错带水资源影响

### 3.1 气候变化对北方农牧交错带水资源影响

目前, 国内外学者开展气候变化对水资源及其

水文过程影响的研究主要分两类。一是采用数理统计方法和相关关系法分析多种气候与水文要素的演变特征。王金凤等<sup>[56]</sup>认为治河流域径流与气温负相关、与降水量正相关,降水量与径流相关性更强。杨恒山等<sup>[57]</sup>发现西辽河平原地表径流减少、部分河流断流以及地下水位下降是对气候变化的响应,降水的减少和不稳定性增大了干旱和洪涝灾害发生的概率。因此,气候变化会对地表水和地下水产生明显影响。二是通过水文模型法定量研究气候变化对径流变化的贡献率,通过设置不同未来气候情景开展未来气候变化研究。史晓亮等<sup>[58]</sup>结合 SWAT 水文模型模拟了不同气候变化情景下滦河流域的水文过程,发现气温升高则径流量减少,降水量增加则径流量增加,认为降水对滦河径流的影响大于温度;李鸿雁等<sup>[59]</sup>指出洮儿河流域降水量波动平稳,气温升高地表径流减少,地下水埋深增加。在未来3种气候模式下,地下水埋深均会增加。秦欢欢等<sup>[60]</sup>发现地下水位与气候干湿程度正相关,降水量决定地下水水位变化。预测干旱气候情景下各观测井地下水水位将持续下降。

气候变化是区域水文变化的重要驱动因素,全球变暖背景下北方农牧交错带大部分地区年均气温升高,降水减少,年均径流量呈减少趋势。但是气候变化的不确定性是水资源影响评价存在的最大问题,是开展未来气候变化研究的重要方向和核心内容。

### 3.2 LUCC对北方农牧交错带水资源影响

土地利用类型变化通过改变原有土地利用格局,影响地表水入渗、蒸发、产汇流以及地下水补给等水文循环过程。王磊等<sup>[61]</sup>基于 SWAT 模型分析得出耕地对清水河径流的影响系数为正值,具有增加径流的作用;林地和草地为负值,具有截留径流的作用。吴杰昭<sup>[62]</sup>研究滦河部分流域发现1970—2015年建设用地产流量、地表径流量均比草地、耕地大。王晓勇等<sup>[63]</sup>研究干旱-半干旱地区下垫面与地下水位关系后指出,LUCC剧烈的地区均是地下水位急剧变化区域,二者空间分布呈正相关。孙标等<sup>[64]</sup>也得出同样的结论,认为LUCC加剧了地下水埋深的变化。不同土地利用类型对径流的作用不同,而且不同地区LUCC对水文过程的影响也存在一定的差异。

## 4 变化环境对水资源影响的量化研究

随着气候变化与LUCC对水资源影响不断加剧,各国学者开始研究从针对单个驱动因素到综合考虑两种驱动因素对水文循环的作用<sup>[65]</sup>;从定性到定量的角度区分二者对径流变化的归因分析,通过水文模型计算二者对径流变化的贡献率<sup>[66]</sup>。在长时间尺度,气候变化对水文与水资源的影响更显著<sup>[67]</sup>。在短时间尺度,LUCC是主要驱动因素且作用越来越显著<sup>[68]</sup>。Guo等<sup>[69]</sup>也认为,气候变化是影响年径流的主要因素,LUCC对季节径流影响比较明显。空间上,二者对水文与水资源效应研究多在中小尺度流域的径流量变化。由于大尺度流域运用模型所需变量多,对数据系统性要求较高,所以涉及大尺度流域研究并不多见<sup>[70-71]</sup>。随着数据获取手段多样化以及研究的不断深入,有关大尺度流域的相关研究将会有很大的发展空间。

宋小园<sup>[72]</sup>分析得出1960—2010年锡林郭勒河流域径流量逐年减少,与降水减少趋势一致;同时,LUCC贡献率逐年上升。李帅等<sup>[73]</sup>应用 SWAT 模型预测宁夏清水河径流量在未来气候变化中呈减少趋势,降水减少和气温升高组合效应下最显著;而在未来几种LUCC情景下径流量会增加。Zhang等<sup>[74]</sup>研究得出,1986—2012年桑干河流域气候变化导致径流减少39.1%,LUCC导致地表径流增加37.6%。朱永华等<sup>[75]</sup>认为1996—2016年西辽河平原气候变化和LUCC对地下水埋深动态贡献度分别为24.5%和75.5%。王随继等<sup>[76]</sup>分析了1960—2008年皇甫川流域径流量变化的两个突变年份,得出导致径流量减小的降水量和LUCC贡献率分别从36.43%和63.57%变化为16.81%和83.19%。吴立钰等<sup>[66]</sup>采用步进式方法划分了3个影响期,更加精准地指出LUCC在枯水期及平水期的影响程度越来越大。由于LUCC能直接体现并反映人类活动影响的剧烈程度,不少学者直接以LUCC来加以说明人类活动对径流影响(表3)<sup>[76-86]</sup>。

相对于气候变化的长期性特点,LUCC是导致短期内流域水文变化,甚至是突变的主要驱动因素<sup>[87]</sup>。不同流域气候变化和LUCC对流域径流变化的影响程度存在明显差异。不同方法分离气候变化和LUCC对流域径流贡献率具有不确定性<sup>[88]</sup>,综合利用定量分析气候变化和LUCC对径流影响的方法,有利于促进对流域的生态环境的认知,提升对

表 3 气候变化与 LUCC(人类活动)对区域水文过程影响贡献率

Table 3 The contribution rate of climate change and LUCC (human activity) to the regional hydrological process

研究区	时段(年份)	突变年份	减水贡献比例/%		文献
			气候变化	人类活动(LUCC)	
密云水库	1960—2016	1980	—	60.00	黄俊雄等 <sup>[77]</sup>
潮白河流域	1980—2001	1980	31.00	70.00	Wang 等 <sup>[78]</sup>
无定河流域	1978—2010	1996	53.75	46.25	曹钧恒 <sup>[79]</sup>
西辽河平原	1980—2016	1998	24.50	75.5	朱永华等 <sup>[75]</sup>
滦河流域	1960—2010	1980	26.30	73.70	张利平等 <sup>[80]</sup>
锡林郭勒河	1963—2015	1998	30.34	69.66	王威娜等 <sup>[81]</sup>
皇甫川流域	1960—2008	1998	16.81	83.19	王随继等 <sup>[76]</sup>
小理河流域	1971—2013	1998	29.80	70.20	付金霞 <sup>[82]</sup>
泾河上游	1973—2012	1985	40.30	59.70	党素珍等 <sup>[83]</sup>
北洛河流域	1956—2011	1964	40.00	60.00	樊晶晶等 <sup>[84]</sup>
泾河流域	1971—2010	1985	26.60	73.40	郑培龙等 <sup>[85]</sup>
		1996	7.60	92.40	
塔布河流域	1959—2018	2009	8.31	91.69	李芳芳等 <sup>[86]</sup>

流域水资源的管理水平。

## 5 结论与展望

北方农牧交错带是中国中东部地区重要的生态安全屏障和水源涵养带,但近几十年来,该地区资源环境压力越来越大,尤其是水资源开发强度已近极限。综合分析中国北方农牧交错带水资源的研究现状和发展态势,发现变化环境对水资源的影响研究取得了丰硕的成果,以地表径流的研究为主,对地下水影响的研究相对薄弱。研究方法上从单一驱动因素发展到两种驱动因素,从定性发展到定量的归因分析。随着技术进步,对预测模型的使用也日趋成熟。为此方向研究奠定了良好的基础,但目前仍有一些不足之处需要重视。

在全球极端气候事件增多的情势下,加强气候变化风险和不确定性分析是未来气候变化研究的重点;通过改进水文模型与掌握好模型尺度转化规律,揭示长期气候变化过程对水文系统产生的影响的内在机制。

重视 LUCC 影响下的水文与水资源效应研究。强化 LUCC 与水文过程的互馈作用机制是环境生态学亟待研究的科学问题。未来还要更加关注政策变化下 LUCC(如生态工程等)引起的水资源变化。

因受技术和区域地理环境影响,有关变化环境对地下水影响的研究相对薄弱。地下水的补给方

式比地表水更复杂,加上日益突出的用水矛盾,迫使我们有必要更加关注并不断完善地下水与变化环境的关系。

不同方法在量化气候变化和 LUCC 对径流影响贡献率方面结果存在差异。因此需要针对不同流域水文环境特征差异,合理选择优化方案,提高模型参数率定的准确性,精准识别地表径流变化突变位置,有利于对流域水资源进行更科学的管理。

### 参考文献:

- [1] 刘晓,陈隽,范琳琳.等.水资源承载力研究进展与新方法[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(3):312-318.
- [2] 郝杰,张伟.水资源评价现状及有关问题探讨[J].海河水利,2007,23(2):48-49.
- [3] Nian Y, Li X, Zhou J, et al. Impact of land use change on water resource allocation in the middle reaches of the Heihe River Basin in northwestern China [J]. Journal of Arid Land, 2014, 6 (3):273-286.
- [4] Piao S, Ciaisi P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010, 467(7311):43-51.
- [5] Wang R, Kalin L, Kuang W, et al. Individual and combined effects of land use/cover and climate change on Wolf Bay watershed streamflow in southern Alabama [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(22):5530-5546.
- [6] Walling E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers [J]. Global and Planetary Change,

- 2003,39(1/2):111-126.
- [7] Jackson C, Meister R, Prudhomme C. Modeling the effects of climate change and its uncertainty on UK chalk groundwater resources from an ensemble of global climate model projections [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(1): 12-28.
- [8] 李向应, 秦大河, 效存德, 等. 近期气候变化研究的一些最新进展[J]. *科学通报*, 2011, 56(36): 3029-3040.
- [9] 刘启宁, 辛卓航, 韩建旭, 等. 变化环境下东北半干旱地区径流演变规律分析: 以洮儿河流域为例[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(5): 51-63.
- [10] 张建云, 贺瑞敏. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3): 303-310.
- [11] 栗士棋, 刘颖, 程芳芳, 等. 环境变化对水资源影响研究进展及其借鉴与启示[J]. *水利科学与寒区工程*, 2020, 3(5): 1-6.
- [12] Vorosmarty J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth [J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [13] 史晓亮, 李颖, 赵凯, 等. 诺敏河流域土地利用与覆被变化及其对水文过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(1): 23-28.
- [14] 赵阳, 郑江坤, 武巧英. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 252-260.
- [15] Yin J, Gentine P, Sha Z. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 233-254.
- [16] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(11): 2307-2318.
- [17] 丁美慧, 孙泽祥, 刘志锋, 等. 中国北方农牧交错带城市扩展过程对植被净初级生产力影响研究: 以呼包鄂地区为例[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(7): 614-621.
- [18] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J]. *地球科学进展*, 2002, 35(5): 739-747.
- [19] 史文娇, 刘奕婷, 石晓丽. 气候变化对北方农牧交错带界线变迁影响的定量探测方法研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(3): 407-419.
- [20] 张生军, 杨改河, 刘和林. 北方农牧交错带水资源与生态环境问题初探[J]. *安徽农业科学*, 2006, 21(9): 1945-1947.
- [21] 周一敏, 张昂, 赵昕奕. 未来气候变化情景下中国北方农牧交错带脆弱性评估[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(6): 1099-1107.
- [22] 方梓行, 刘志锋, 赵媛媛, 等. 中国北方农牧交错带气候变化特点及未来趋势: 基于观测和模拟资料的综合分析[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 358-370.
- [23] 殷小茜. 北方农牧交错带西段退耕对生态系统主要服务功能影响研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2019.
- [24] Li L, Jiang D, Hou X, et al. Simulated run off responses to land use in the middle and upstream reaches of Tao Er He River basin, Northeast China, in wet, average and dry years [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(24): 3484-3494.
- [25] 李亚光, 孙卫东, 杨绍峰, 等. 赤峰市老哈河流域实测降雨量实测径流量变化趋势浅析[J]. *内蒙古水利*, 2020, 23(9): 12-14.
- [26] 安娜, 于明洋, 吴建华, 等. 西拉木伦河流域气候与径流关系[J]. *北方农业学报*, 2016, 44(4): 85-89.
- [27] 王鹏飞, 郭云艳, 周康, 等. 1961-2018年呼伦湖水面面积变化特征及其对气候变化的响应[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(4): 792-800.
- [28] 张桂英. 奈曼西湖水库干枯后对附近降水的影响[J]. *内蒙古民族大学学报*, 2010, 16(5): 93-94.
- [29] 付意成, 赵进勇, 朱国平, 等. 基于M-K检验的黄旗海湖面积退化成因分析[J]. *中国农村水利水电*, 2017, 42(7): 79-84.
- [30] 木希叶乐, 秦福莹, 布仁吉日嘎拉, 等. 1983-2018年内蒙古达里诺尔自然保护区水域动态变化及其驱动因素分析[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(32): 62-68.
- [31] 丹喏. 内蒙古典型草原地区内陆湖面积变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
- [32] 刘旭隆. 岱海湖泊面积与水位动态变化及其驱动力分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [33] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北漳滏平原地下水下降与灌溉农业关系[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 228-234.
- [34] Sahoo S, Russo T A, Elliott J, et al. Machine learning algorithms for modeling groundwater level changes in agricultural regions of the U. S. [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 3878-3895.
- [35] 朱永华. 变化环境下半干旱区农牧交错带水-植被相互作用关系及地下水反演模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [36] Feng W, Zhong M, Lemoine J-M, et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2110-2118.
- [37] 丁元芳, 李月宁, 吴昊晨, 等. 西辽河流域地下水开发利用及问题成因分析[J]. *东北水利水电*, 2020, 38(5): 32-34.
- [38] 赵威, 韦志刚, 郑志远, 等. 1964-2013年中国北方农牧交错带温度和降水时空演变特征[J]. *高原气象*, 2016, 35(4): 979-988.
- [39] Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers* [R]. IPCC, 2013.
- [40] 闫冠华, 李巧萍, 吕冬红. 中国北方农牧交错带气候变化特征及未来趋势[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 34(5): 671-678.
- [41] 韩晓敏, 延军平. 东北农牧交错带旱涝特征对气候变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 257-262.
- [42] 渠翠平, 关德新, 王安志, 等. 近56年来科尔沁沙地气候变化特征[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2326-2332.
- [43] 陈永金, 马胜兰, 许婕, 等. 华北地区近65 a气候变化及其与相关因子关系分析[J]. *河北师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(3): 314-324.
- [44] 林长存, 王堃, 孙钰茗. 中国北方农牧交错带中段近60年气温序列变化研究[J]. *草地学报*, 2016, 24(4): 747-753.
- [45] 李思慧. 1961-2018年科尔沁沙地气候变化特征[J]. 内蒙古

- 气象,2019,42(5):8-10.
- [46] 曾晟轩,顾娟,贺缠生.西北农牧交错带中部气候变化特征及其持续性[J].水土保持研究,2018,25(4):356-364.
- [47] 刘亚南,潘志华,李超,等.近50年北方农牧交错带气候月季变化和空间分布规律[J].中国农业大学学报,2012,17(4):96-102.
- [48] 刘晓琼,刘彦随,李同昇,等.高强度能源开发区气候变化的人文驱动力分析及对策研究:以陕西省榆林市为例[J].地域研究与开发,2014,33(2):159-164.
- [49] 李政,呼格吉勒图,李文通.阴山北麓农牧交错带1980年以来气候变化特征及对农作物产量的影响:以武川县为例[J].农技服务,2017,34(5):91-92.
- [50] 李敏敏,延军平,丁彩霞.北方农牧交错带气候变化与旱涝响应特征[J].水土保持通报,2014,34(5):304-308.
- [51] 裴宏伟,王飞泉,张红娟,等.中国北方农牧交错带水资源问题荟萃分析[J].河北建筑工程学院学报,2020,38(4):83-90.
- [52] 刘孟竹,张红娟,王彦芳,等.基于土地利用的北方农牧交错带生境质量研究[J].水土保持研究,2021,28(3):156-162.
- [53] 刘军会,高吉喜,耿斌,等.北方农牧交错带土地利用及景观格局变化特征[J].环境科学研究,2007,23(5):148-154.
- [54] 刘孟竹,王彦芳,裴宏伟.退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J].中国沙漠,2021,41(1):174-182.
- [55] An W, Li Z, Shuai W, et al. Exploring the effects of the "Grain for Green" program on the differences in soil water in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Ecological Engineering, 2017, 107(7): 144-151.
- [56] 王金凤,武桃丽.气候变化影响下洽河流域径流变化特征分析[J].山西师范大学学报(自然科学版),2019,33(3):62-67.
- [57] 杨恒山,刘江,梁怀宇.西辽河平原气候及水资源变化特征[J].应用生态学报,2009,20(1):84-90.
- [58] 史晓亮,杨志勇,吕杰,等.滦河流域气候变化的水文响应研究[J].水土保持研究,2016,23(2):123-127.
- [59] 李鸿雁,王凡,刘莹莹,等.洮儿河流域平原区气候变化情景下浅层地下水水位动态响应分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(3):345-352.
- [60] 秦欢欢,孙占学,高柏,等.气候变化影响下华北平原地下水可持续利用研究[J].灌溉排水学报,2020,39(1):106-114.
- [61] 王磊,刘亭亭,谢建治.基于SWAT模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J].水土保持研究,2019,26(4):245-251.
- [62] 吴杰昭.土地利用变化对滦河流域水文生态过程影响研究[D].天津:天津大学,2018.
- [63] 王晓勇,朱立峰,董佳秋,等.干旱-半干旱区下垫面变化对地下水水位的影响[J].西北地质,2019,52(2):227-235.
- [64] 孙标,朱永华,张生,等.通辽平原区近35年地下水埋深及土地利用变化响应关系研究[J].中国农村水利水电,2019,23(8):15-19.
- [65] Qi Y, Chang Q, Jia K, et al. Temporal-spatial variability of desertification in an agro-pastoral transitional zone of northern Shanxi Province, China[J]. Catena, 2012, 88(1): 37-45.
- [66] 吴立钰,张璇,李冲,等.气候变化和人类活动对伊逊河流域径流变化的影响[J].自然资源学报,2020,35(7):1744-1756.
- [67] 曾小凡,苏布达,姜彤,等.21世纪前半叶长江流域气候趋势的一种预估[J].气候变化研究进展,2007,34(5):293-298.
- [68] Croke B, Merritt W S, Jakeman A J. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments[J]. Journal of Hydrology, 2004, 291(1/2): 115-131.
- [69] Guo H, Hu Q, Jiang T. Annual and seasonal stream flow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 35(1): 104-122.
- [70] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. Nature, 2005, 438(7066): 303-309.
- [71] 雷鸣,孔祥斌,张雪靓,等.黄淮海平原区土地利用变化对地下水资源量变化的影响[J].资源科学,2017,39(6):1099-1116.
- [72] 宋小园.气候变化和人类活动影响下锡林河流域水文过程响应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [73] 李帅,魏虹,刘媛,等.气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J].生态学报,2017,37(4):1252-1260.
- [74] Zhang L, Karthikeyan R, Bai Z, et al. Analysis of stream flow responses to climate variability and land use change in the Loess Plateau region of China[J]. Catena, 2017, 154(7): 1-11.
- [75] 朱永华,张生,赵胜男,等.气候变化与人类活动对地下水埋深变化的影响[J].农业机械学报,2017,48(9):199-205.
- [76] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.
- [77] 黄俊雄,刘兆飞,张航,等.土地利用与气候变化对密云水库来水量变化的影响研究[J].水文,2021,41(1):1-6.
- [78] Wang G, Xia J, Chen J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: a case study of the Chao Bai River basin in northern China[J]. Water Resources Research, 2009, 45(2): 324-335.
- [79] 曹钧恒.气候变化和人类活动对无定河流域径流量影响的定量研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [80] 张利平,李凌程,夏军,等.气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J].自然资源学报,2015,30(4):664-672.
- [81] 王威娜,高瑞忠,王喜喜,等.锡林河流域径流变化规律及气候波动和人类活动影响的定量分析[J].水土保持研究,2018,25(2):347-353.
- [82] 付金霞.小理河流域径流泥沙对气候和土地利用变化的响应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [83] 党素珍,董国涛,蒋晓辉,等.气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):30-34.
- [84] 樊晶晶,黄强,刘登峰,等.人类活动和气候变化对北洛河径流变化的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(2):221-227.
- [85] 郑培龙,李云霞,赵阳,等.黄土高原泾河流域气候和土地利

- 用变化对径流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 20-24.
- [86] 李芳芳, 梁文涛, 尹航, 等. 气候变化和人类活动对塔布河流域径流变化的影响分析[J]. 内蒙古水利, 2021, 54(5): 12-15.
- [87] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [88] 黄斌斌, 郝成元, 李若男, 等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 899-910.

## Research advances on the impact of climate change and LUCC for water resources in the northern agro-pastoral zone in China

Chen Xueping<sup>1,2</sup>, Zhao Xueyong<sup>1</sup>, Wang Ruixiong<sup>1,2</sup>, Ning Zhiying<sup>1,2</sup>, Lu Jiannan<sup>1,2</sup>, Zhao Siteng<sup>1,2</sup>

(1. Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The northern agro-pastoral interlaced zone is one of the most sensitive areas to climate change and human activity. The study of water resource change therefore in the interlaced zone under the background of climate change and land use/cover change (LUCC) provides an important scientific and practical significance for scientifically responding to the effective use and management of water resource in ecologically fragile areas in a changing environment. Through the research on the characteristics of the climate and LUCC evolution in the northern agro-pastoral interlaced zone and their impact on water resources. The conclusions are as follows: (1) in the past 70 years, the climate in the northern agriculture-pastoral zone has shown a warming and drying trend, and the rate of temperature increase and precipitation decrease are higher than that of the global average. (2) LUCC is mainly based on the mutual transformation of agriculture and animal husbandry, and the land use structure has not changed significantly. (3) The watershed runoff and groundwater level in the region are positively correlated with temperature, negatively correlated with precipitation, and the effect of precipitation is more obvious; in recent decades, LUCC has become the dominant factor affecting the ecological and hydrological processes in the region, and the contribution rate of the impact on water resources has increased. Considering the problems and weakness in studies, we proposed the development trends of future research and key problems to be solved in the study.

**Key words:** agro-pastoral interlaced zone in northern China; climate change; land use/cover change (LUCC); water resource