南水北调中线工程水源区和受水区旱涝特征及风险预估

方思达[1], 刘 敏[1], 任永建[2]

(1. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205)

摘 要: [目的] 了解南水北调中线工程水源区与受水区历史旱涝变化特征,分析及预估该工程因气候变化导致"无水可调"的风险,为科学调度与决策提供依据。[方法] 利用南水北调中线工程流域内近 500 a 旱涝资料及 1961—2015 年气象站日降水量资料,分析近 500 a 来南水北调中线工程水源区及受水区的旱涝遭遇特征及调水保障概率,同时利用 21 个 CMIP 5 全球气候模式降尺度后的模拟预估结果,对 RCP4.5 排放情景下未来的旱涝遭遇特征进行预估研究。[结果] ①近 500 a 来,水源区旱年出现概率呈先减少后增加趋势,20 世纪以来水源区干旱年出现概率处于历史高位,达 31.7%; ②受水区淮河流域的调水保障概率最高(达 87.3%),唐白河流域调水保障概率最低(为 78.4%); ③20 世纪以来各流域与水源区同旱概率均处于历史高位,汉—唐、汉—海持续同旱概率高于汉—淮; ④秋汛期(9—11 月)为调水最有利的时段,非汛期 3 个流域的调水保障概率均在 80%以上。⑤CMIP5 模式预估结果显示未来各受水区调水保障概率均在 87%以上。[结论] 20 世纪以来水源区与受水区同旱概率处于近 500 a 来高位,未来调水朝有利方向发展,但 21 世纪后期面临较大的同涝风险。

关键词: 南水北调中线工程; 旱涝特征; 风险预估

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)06-0263-05 **中图分类号**: P467

文献参数: 方思达, 刘敏, 任永建. 南水北调中线工程水源区和受水区旱涝特征及风险预估[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 263-267. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.040. Fang Sida, Liu Min, Ren Yongjian. Drought and waterlogging charateristics and risk prediction in different river basin areas of middle route of south-to-north water transfer project[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 263-267.

Drought and Waterlogging Characteristics and Risk Prediction in Different River Basin Areas of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

FANG Sida[1], LIU Min[1], REN Yongjian[2]

(1. *Wuhan Regional Climate Center*, *Wuhan*, *Hubei* 430074, *China*;
2. *Hubei Province Meteorological Service Center*, *Wuhan*, *Hubei* 430205, *China*)

Abstract: [Objective] The drought and waterlogging characteristics in the water source & receiving areas of the middle route of the south-to-north water transfer project were studied, and the risk of "both drought" caused by climate change was analyzed and predicted in order to provide a basis for scientific decision-making. [Methods] Based on daily precipitation data of 265 meteorological stations during 1961—2015 and drought & waterlogging data of past 500 years in the middle route of the south-to-north water transfer project region, the drought and waterlogging characteristics in one water source area(the upper reaches of Hanjiang River) and three water receiving areas(Tangbai, Huaihe, and Haihe river basins) were analyzed, and the efficiency of water transfer in three water receiving areas were calculated. This study also investigated the future drought and waterlogging characteristics under the RCP 4.5 scenario based on the simulation results of 21 CMIP 5 global

收稿日期: 2018-05-30 **修回日期**: 2018-06-27

资助项目: 2016 年中国气候局气候变化专项"丹江口水库水源区和受水区旱涝配置特征及调水适应对策研究"(CCSF201620); 2016 国家重点研发计划项目(2016YFE0102400); 2018 中国气候局气候变化专项(CCSF201821)

第一作者: 方思达(1987—),男(满族),内蒙古自治区赤峰市人,硕士,工程师,主要从事气候变化及气候评估方面的研究。E-mail: fang_star123@163.com。

通讯作者: 刘敏(1963—),女(汉族),湖南省澧县人,硕士,正研级高级工程师,主要从事应用气象及气候变化方面的研究。E-mail: liuminccg@sohu.com。

climate models. [Results] ① In the past 500 years, the probability of occurrence of drought decreased first and then increased in the water source area, In the 20th century, the probability of occurrence of drought in the water source area reached highest in the history(31.7%). ② The Huaihe River basin showed the highest efficiency of water transfer(87.3%) while the Tangbai River basin showed the lowest(78.4%). ③ Since the beginning of the 20th century, the unfavorable probability at each river basin and the water source region reached a maximum. The probability of simultaneously occurrence of multi-year droughts in the water source area and Tangbai & Hai river basins is greater than Huai River basins. ④ The water transfer efficiency during the autumn flood season(SON) is the highest, and that in all the 3 basins during the non-flood season is over 80%. ⑤ The efficiency of water transfer in each water receiving area in the future is above 87%. [Conclusion] The synchronous encounter probability of drought in water source & receiving areas in 20th century reaches a maximum in the past 500 years. The simulations show that it will benefit the water transfer of the project in the future. However, in late 21th century, the risk of waterlogging in both the water source and water receiving areas simultaneously will increase.

Keywords: the middle route of south-to-north water transfer project; drought and waterlogging characteristics; risk prediction

南北方水资源配置极不平衡是中国水资源分布的重要特征[1-2]。南水北调工程,旨在通过跨流域的水资源合理配置,促进南北方经济、资源、环境等的协调发展。其中中线工程是从长江最大支流的汉江上游丹江口水库调水,跨越长江、淮河、黄河、海河 4 大流域,向唐白河区、淮河区、海河 3 个受水区输送。该工程的顺利实施将有效缓解京津地区的水资源危机,并将大大改善受水区的投资环境和生态环境,推动我国京津地区的经济发展。中线工程调水线路长,跨越亚热带和暖温带季风气候区,降水特点和变化规律不尽相同,导致旱涝配置呈现更为复杂的不确定性,特别是如果气候出现异常,水源区与受水区连续同旱,将直接影响调水工程的可靠性。国内学者对中线流域的旱涝变化特征进行了相关研究[3-5],周月华等[6]研究表明,汉江流域具有多连旱特征。随着南水北调中线工程的开展,不同水文区的丰枯遭遇研究近些年来受到广泛关注[7-8]。陈锋等[9]使用 Copula 函数方法,并基于 IPCC 第四次评估报告中大气环流模式的降水结果,用模型探讨了气候变化情景下南水北调中线工程水源区与受水区丰枯遭遇的变化;康玲等[10]联合 copula 函数和贝叶斯网络理论,建立了南水北调中线工程水源区和受水区降水丰枯遭遇风险分析模型,对南水北调中线工程调水最不利的丰枯遭遇风险概率进行了研究。本研究尝试使用旱涝等级资料及气象站降水资料,对气候变化背景下南水北调中线工程水源区与受水区旱涝配置的变化特征进行分析,并利用模式数据探讨未来水源区与受水区旱涝配置的可能影响,为南水北调中线工程水资源调度及决策提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

1.1.1 气象观测资料 旱涝资料使用中国气象局气象科学研究院提供的中国 120 台站五百年旱涝等级数据集。时间范围为 1470—2000 年,分辨率为年。该资料在中国近代气候旱涝变化研究中有着广泛应用[11-12]。本文选取其中位于南水北调中线工程地域范围内的 12 个站点,分别为:汉中、安康、郧县、南阳、郑州、信阳、石家庄、邯郸、安阳、北京、天津和保定。各站点依据降水量标准化距平分为:1 级(涝)、2 级(偏涝)、3 级(正常)、4 级(偏旱)、5 级(旱)共 5 个等级代表该站点该年降水旱涝情况。气象站降水资料使用 1961—2015 年南水北调中线工程内 265 气象站逐日降水资料。将南水北调中线工程划分为 4 个流域,其中汉江上游为水源区,唐白河流域、淮河流域和海河流域为受水区。

1.1.2 模式预估资料 CMIP5 耦合模式代表当前国际主要先进模式的最新版本,是当前气候预估研究的重要手段[13-15]。本文使用中国气象局制作的 21 个 CMIP5 全球气候模式集合平均模拟结果[16],经过插值计算将其统一降尺度到同一分辨率 1°×1°,选取 2020—2100 年南水北调中线工程区域内 RCP 4.5 排放情景下的月平均降水资料。

1.2 旱涝年划分方法

近 500 a 区域旱涝年划分标准:研究流域包含的站点在某年出现偏旱或旱(偏涝或涝)的个数达 1/2 以上,则认为该流域该年为旱(涝)年,其他情况为平年。1961—2015 年区域旱涝年划分标准:将所研究流域各站点逐年降水量序列进行标准化处理,得到各

站点标准化距平序列。若某站降水距平小于或等于-1.0σ(大于等于$+1.0\sigma$),且满足该标准的站点数超过研究区域站点总数的 30%,则定义流域该为旱年(涝年),其他情况为平年。

2　水源区旱涝变化特征

2.1　近 500 a 来水源区旱涝特征

使用近 500 a 来旱涝资料对水源区旱涝特征进行分析,结果表明水源区旱、平、涝的出现频率分别为 33.3%,46.2%和 20.5%,但存在较大年代际变化。1470—2000 年南水北调水源区(汉江上游)旱涝状况年代际变化如图 1 所示。

由图 1 可以看出,1470—1800 年旱年出现频率呈下降趋势,但随后出现上升趋势,尤其是 20 世纪,干旱出现频率达 31.7%;涝年出现频率基本在各年代均高于旱年频率,在 19 世纪达到顶峰,为 47.0%,进入 20 世纪有所回落,出现频率为 34.7%。平年频率在 1 800 a 以前较平稳,基本维持在 50%左右,但受 20 世纪以来枯丰年出现频率波动较大影响,平年出现频率较低,仅为 33.7%。以上分析表明,近 500 a 来汉江上游旱涝出现较大变化,尤其是 1 800 a 以来,旱涝事件增多,这可能与全球气候变化导致的极端事件增多相关。

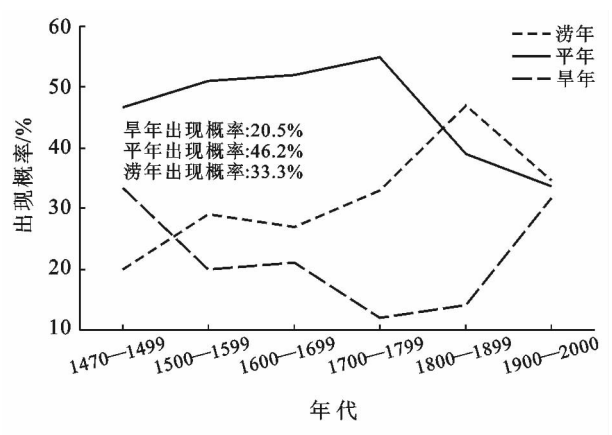


图 1　1470—2000 年南水北调水源区旱涝出现概率年代际变化

此外,水源区还体现出一定的连旱及连涝特征,表 1 给出了近 500 a 来水源区连旱(涝)出现次数,可以看到,近 500 a 来,汉江上游连旱连涝现象均有发生,连旱(涝)持续年数越短,出现次数越多,其中连旱出现总次数少于连涝。历史上最长连旱为 7 a,出现在 1635—1641 年;而最长连涝年份为 6 a,共出现过 2 次,分别为 1930—1935 年及 1979—1984 年。

表 1　近 500 a 来水源区连旱(涝)出现次数

持续年数	2	3	4	5	6	7
连旱	17	4	4	—	—	1
连涝	22	9	5	2	2	—

2.2　1961—2015 年水源区旱涝变化特征

使用气象站降水资料对 1961—2015 年水源区旱涝情况分析如图 2 所示。由图 2 可以看出,近 55 a 来,汉江上游降水正常年份占 60.0%,旱年占 21.8%,涝年占 18.2%。同时旱涝结构有着较明显的年代际特征,20 世纪 90 年代以前,丰枯年份出现频率相对较低,但近 20 a 余来,汉江上游旱涝年出现概率明显增加,尤其是旱年出现概率达 28.0%,涝年概率也有所上升,达 20.0%。这意味着,汉江上游气候近年来较易出现极端旱涝事件,南水北调工程风险增加。

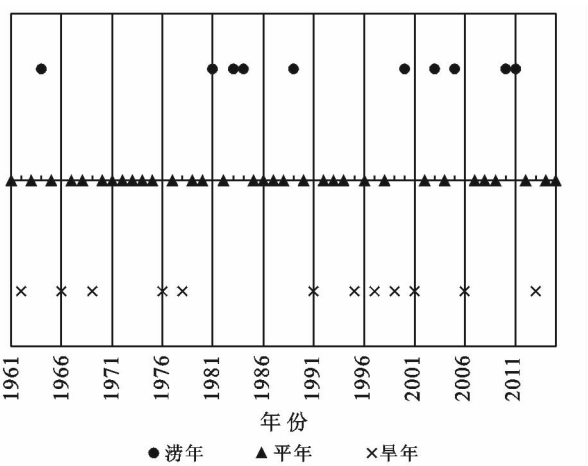


图 2　1961—2015 年汉江上游旱涝逐年变化

3　近 500 a 来水源区与受水区旱涝遭遇特征

正常或偏涝的年份,水源区有足够的水可供受水区调度,这种情形称之为调水保障概率(P_1)。但当水源区和受水区同时干旱时,将出现无水可调的情况,此外,由于受水区尤其是华北等地在正常年份仍需要调水,因此,当水源区发生干旱而受水区当年降水属于正常年景,仍然存在无水可调或调水量不够的风险,上述两种情形出现的概率之和,称之为调水风险概率(P_2)。后文将主要分析水源区和受水区调水风险概率和调水保障概率特征。

3.1　水源区与受水区旱涝遭遇分析及变化特征

近 500 a 来,南水北调中线工程水源区及受水区旱涝遭遇情况详见表 2。唐白河流域、淮河流域及海河流域 3 个受水区的调水风险概率分别为 21.6%,12.7%和 16.2%,同时汉—唐同旱概率也达 16.2%,也为 3 种遭遇情形最高。因此唐白河流域调水保障

概率最低，为 78.4%，海河流域次之，调水保障概率最高为淮河流域，达 87.3%。

表 2 1470－2000 年南水北调水源区与受水区旱涝遭遇概率

项 目	P_1	P_2（同旱概率＋水源区旱受水区平概率）
汉江上游—唐白河	78.4%	21.6%(16.2%＋5.4%)
汉江上游—淮河	87.3%	12.7%(11.9%＋0.8%)
汉江上游—海河	83.8%	16.2%(9.6%＋6.6%)

近 500 a 来，南水北调中线工程水源区和 3 个受水区逐百年的调水风险概率变化较为一致，呈现较大波动（图 3）。除去 1 400 年代资料较短外，20 世纪以来各流域调水风险均处于历史高位，尤其是汉—唐调水风险概率接近 30%，这使得各受水区的调水保障概率为近 500 a 来最低值，汉—唐、汉—淮及汉—海的保障概率分别为 70.6%，76.2%及 76.2%（图 3）。

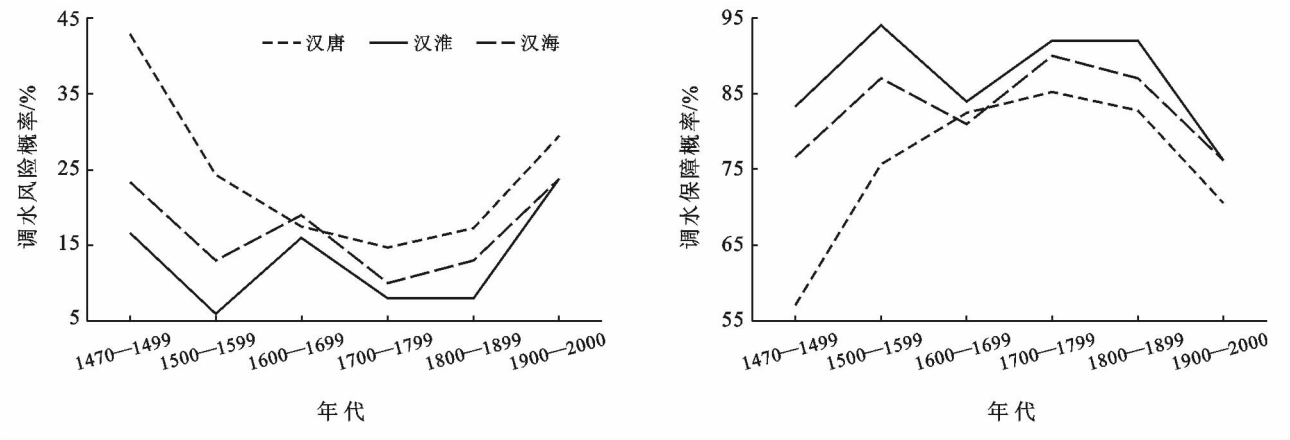


图 3 1470－2000 年南水北调水源区遭遇概率年代际变化

3.2 水源区与受水区持续旱涝遭遇特征

近 500 a 来水源区和受水区还具有连续同旱（涝）遭遇特征（表 3），可以看到各受水区连续同旱（涝）遭遇持续年数越短，出现次数越多。最长同旱持续年数为 6 a，出现在 1636—1641 年的汉唐遭遇中；3 种遭遇最长同涝持续年数均为 3 a。汉—唐及汉—海连续同旱次数多于汉—淮，同时，汉—唐及汉—海遭遇均出现了持续年数在 4 a 以上的同旱情形，这 2 个区域调水连续同旱风险较高。连续同旱出现频率大于连续同涝。3 种遭遇情景中，连续 2 a 同旱出现了 24 次，而连续 2 a 同涝出现了 20 次；连续 3 a 同旱出现了 7 次，连续 3 a 同涝出现了 4 次；连续 4 a 及以上同旱共出现了 3 次，而该强度的连续同涝事件未发生过。

表 3 近 500 a 来水源区连续同旱（涝）遭遇出现次数

项 目	持续年数	2	3	4	5	6	7
汉江上游—唐白河	连续同旱	9	2	—	—	1	—
	连续同涝	8	1	—	—	—	—
汉江上游—淮河	连续同旱	7	3	—	—	—	—
	连续同涝	7	1	—	—	—	—
汉江上游—海河	连续同旱	8	2	1	1	—	—
	连续同涝	5	2	—	—	—	—

4 1961－2015 年不同时期内水源区与受水区旱涝遭遇特征

4.1 水源区与受水区旱涝遭遇特征

使用 1961—2015 年南水北调中线工程内气象站日降水资料，对水源区及受水区旱涝遭遇情况的分析如表 4 所示。唐白河流域、淮河流域及海河流域调水风险概率分别为 21.8%，21.8%和 18.2%，其中汉—唐和汉—淮同旱概率占调水风险概率的 1/2。通过以上分析可知，唐白河及淮河的调水保障概率均为 78.2%，而海河的保障概率为 81.9%。唐白河仍为调水风险概率最高的流域，这与使用 500 a 旱涝资料的分析结果一致。1961—2015 年南水北调中线工程各流域旱涝配置还具有以下特点：汉—唐—淮同旱概率较高，共 6 a 出现了汉—唐—淮同旱的情形，占总的同旱事件一半以上，这将在水源区干旱时增大南水北调调水量的需求，对南水北调工程产生较大不利影响；进入 20 世纪 90 年代后，各流域旱、涝事件增多，同枯、同丰出现几率增大。如 1997—2003 年这 7 a 中，汉江上游仅两年降水正常，旱涝转换频率加剧，同时出现了近 55 a 来仅有的一次全流域性干旱事件，这可能与气候变化加剧了旱涝急转相关，将使南水北调效益风险上升。

表 4　1961—2015 年水源区与受水区旱涝遭遇概率

遭遇情形	P_1	P_2(同旱概率+水源区旱受水区平概率)
汉江上游—唐白河	78.2%	21.8%(10.9%+10.9%)
汉江上游—淮河	78.2%	21.8%(10.9%+10.9%)
汉江上游—海河	81.9%	18.1%(3.6%+14.5%)

4.2　不同时期内旱涝遭遇风险特征

由于南水北调具有一定的时效性,因此对同时段内的各流域旱涝遭遇风险进行分析,方法与对全年分析相同,结果如表 5 所示。无论在任何时段,海河流域的调水保障概率最高,概率均在 80%以上,淮河流域次之,唐白河流域调水保障概率最低。

表 5　1961—2015 年不同时段水源区与受水区旱涝遭遇概率

时 段	遭遇概率	汉—唐	汉—淮	汉—海
汛期(5—9 月)	P_1	78.2%	78.2%	81.9%
	P_2	21.8%	21.8%	18.1%
	(同旱概率+水源区旱受水区平概率)	(10.9%+10.9%)	(7.3%+14.5%)	(7.3%+10.8%)
非汛期(10 月—次年 4 月)	P_1	81.8%	83.6%	85.4%
	P_2	18.2%	16.4%	14.6%
	(同旱概率+水源区旱受水区平概率)	(12.7%+5.5%)	(10.9%+5.5%)	(5.5%+9.1%)
秋汛期(9 月—11 月)	P_1	87.2%	87.2%	87.3%
	P_2	12.8%	12.8%	12.7%
	(同旱概率+水源区旱受水区平概率)	(9.1%+3.7%)	(9.1%+3.6%)	(3.6%+9.1%)

汛期为南水北调工程最不利的时段,唐白河流域、淮河流域及海河流域调水保障概率分别为 78.2%,78.2%及 81.9%,而秋汛期为调水最有利的时段。非汛期作为受水区重要的缺水时段,3 个流域调水保障概率均在 80%以上。

5　水源区和受水区旱涝配置未来情景预估

使用 21 个 CMIP5 全球气候模式的模拟结果,对 RCP4.5 排放情景下南水北调中线工程 2020—2100 年的旱涝遭遇特征进行预估研究(表 6)。由表 6 可以看出,唐白河流域、淮河流域及海河流域未来的调水风险概率分别为 12.3%,12.3%和 11.1%,低于 21 世纪水平。预估结果显示未来海河流域调水保障概率最高,为 88.9%;淮河流域和唐白河流域略低,均为 87.7%,调水朝有利方向发展。此外,21 世纪旱涝遭遇具有明显的年代特征。2050 年以前,水源区降水异常年份主要为干旱事件,同时受水区干旱出现也较为频繁,因此该时期调水风险主要考虑干旱事件,约占总数的近八成;而 2050—2100 年,全流域气候特征发生较大转变,绝大部分异常年份为偏涝,该时段流域同涝事件多发。未来水源区与受水区的旱涝遭遇特征前期将以干旱事件为主,而后期将存在较大的同涝风险,这是当前较为忽视的情景,需提前做好应对措施。

表 6　2020—2100 年水源区与受水区旱涝遭遇情况

遭遇情形	P_1	P_2(同旱概率+水源区旱受水区平概率)
汉江上游—唐白河	87.7%	12.3%(7.4%+4.9%)
汉江上游—淮河	87.7%	12.3%(8.6%+3.7%)
汉江上游—海河	88.9%	11.1%(2.5%+8.6%)

6　结论与讨论

(1) 近 500 a 来,水源区涝年出现概率呈增加趋势,旱年出现概率呈先减少后增加趋势,尤其是 20 世纪以来水源区干旱年出现概率处于历史高位,达 31.7%;同时,近 20 a 来,旱、涝事件频繁发生,旱涝急转发生概率增大。

(2) 受水区淮河流域的调水有利概率最高,达 87.3%,唐白河流域调水有利概率最低,为 78.4%。各受水区调水总体趋于不利。20 世纪以来各流域与水源区同旱概率均处于历史高位,尤其是汉—唐同旱概率接近 30%,汉—唐、汉—淮及汉—海的有利概率分别为 70.6%,76.2%及 76.2%。

(3) 水源区与受水区持续同旱出现概率大于持续同涝,汉—唐、汉—海持续同旱概率高于汉—淮。

(4) 汛期为南水北调工程最不利的时段,而秋汛期为调水最有利的时段。非汛期作为受水区重要的缺水时段,3 个流域调水保障概率均在 80%以上。

(5) CMIP5 模式预估结果显示,2020—2100 年唐白河流域、淮河流域和海河流域调水保障概率分别为 87.7%,87.7%和 88.9%,海河流域调水保障概率略高;同时,由于未来降水趋于增加,调水朝有利方向发展,但 21 世纪后期也将面临较大的同涝风险。

(6) 需要注意的是,全球气候模式分辨率较低,而研究区域相对较小;同时未来情景值考虑了人类排放,未考虑自然强迫的影响,这些都导致结果具有一定程度的不确定性。

(下转第 276 页)

模型筛选出重点审计行政区，也可以根据模型筛选出重点审计地类。当然，本文主要立足于如何从土地景观生态格局视角提高特定省份土地资源资产审计的精准与便捷度，尝试研究地理学—资源经济学—国土审计学交叉研究领域，并没有探究土地资源资产负债表的编制，且基于遥感数据和地理信息系统可视化研究的数据繁衍达不到测算土地自然资源精细化质量的标准。这些研究议题对自然资源资产审计理论具有重要推动作用，也是未来应重点深化的研究方向。

[参 考 文 献]

[1] 中共中央办公厅，国务院办公厅印发.《开展领导干部自然资源资产离任审计试点方案》(厅字[2001]32号，2015年11月9日)[EB/OL].[2015-11-10](2017-05-27). http: // news. xinhuanet. com/finance/2015-11/10/c _ 128412212. htm

[2] 马仁锋.浙江自然资源资产评估及其地域管制[M].北京：中国财政经济出版社，2018.

[3] 马仁锋，候勃，窦思敏，等.森林资源资产地域审计重点筛选模型构建及应用[J].南京林业大学学报：自然科学版，2018，42(4)：46-52.

[4] 陈利顶，李秀珍，傅伯杰，等.中国景观生态学发展历程与未来研究重点[J].生态学报，2014，34(12)：3129-3141.

[5] 马仁锋，窦思敏，候勃，张悦.海岸带自然资源资产：概念、计量与浙江案例[J].上海国土资源，2018，39(1)：69-74.

[6] 陈帷胜，冯秀丽，马仁锋，等.耕地破碎度评价方法与实证研究[J].中国土地科学，2016，30(5)：80-87.

[7] 王建庆，冯秀丽，李加林，等.浙江省耕地利用集约度时空变化及其影响因素[J].水土保持通报，2014，34(6)：270-276.

[8] Forman R T T，Godron M. Landscape ecology[M]. New York：JohnWiley，1986：599-600.

[9] 李鑫，欧名豪，马贤磊.基于景观指数的细碎化对耕地利用效率影像研究[J].自然资源学报，2011，36(11)：1758-1767.

[10] 傅伯杰，陈利顶.景观生态学原理及应用[M].北京：科学出版社，2002：202-203.

[11] 王考，姚云峰，包金兰.县级尺度“三生”用地动态变化及其空间集聚特征[J].水土保持通报，2018，38(1)：306-312.

[12] 周丹，张勃，张春玲，安美玲，等.陕西省2001—2010年土地资源利用效益评价[J].水土保持通报，2014，34(2)：240-244，249.

[13] 王筱明.基于熵权法的济南市土地利用效益评价研究[J].水土保持研究，2008，15(2)：96-97.

[14] 裴欢，魏勇，王晓妍，等.耕地景观生态安全评价方法及其应用[J].农业工程学报，2014，30(9)：212-219.

(上接第267页)

[参 考 文 献]

[1] 李思悦，刘文治，顾胜，等.南水北调中线水源地汉江上游流域主要生态环境问题及对策[J].长江流域资源与环境，2009，18(3)：275-280.

[2] 张利平，秦琳琳，张迪，等.南水北调中线水源区与海河受水区旱涝遭遇研究[J].长江流域资源与环境，2010，19(8)：940-945.

[3] 谯季蓉，林锦瑞，章淹.南水北调中线地区旱涝变化的长期特征[J].气候与环境研究，1997，2(4)：18-25.

[4] 谯季蓉，章淹，林锦瑞.南水北调中线各段干旱的分类型研究[J].气候与环境研究，1998，3(3)：36-43.

[5] 褚健婷，夏军，许崇育，等.海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异[J].地理学报，2009，64(9)：1083-1092.

[6] 周月华，王海军，高贤来.近531年长江上中游与汉江流域水资源变化的初步研究[J].高原气象，2006，25(4)：744-749.

[7] 闫宝伟，郭生练，肖义.南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究[J].水利学报，2007，38(10)：1178-1185.

[8] 韩宇平，蒋任飞，阮本清.南水北调中线水源区与受水区丰枯遭遇分析[J].华北水利水电学院学报，2007，28(1)：8-11.

[9] 陈锋，谢正辉.气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇的影响[J].气候与环境研究，2012，17(2)：139-148.

[10] 康玲，何小聪.南水北调中线降水丰枯遭遇风险分析[J].水科学进展，2011，22(1)：44-50.

[11] 丁贤法，李巧媛，胡国贤.云南省近500年旱涝灾害时间序列的分形研究[J].灾害学，2010，25(2)：76-80.

[12] 严华生，万云霞，严小冬，谢屹然.近500年中国旱涝时空分布特征的研究[J].云南大学学报：自然科学版，2004，26(2)：139-143.

[13] Wu Jie，Xu Ying，Gao Xuejie. Projected changes in mean and extreme climates over Hindu Kush Himalayan region by 21 CMIP 5 models[J]. Advances in Climate Change Research，2017，8(3)：176-184.

[14] 吴佳，周波涛，徐影.中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应：CMIP5模式模拟评估和预估[J].地球物理学报，2015，58(9)：3048-3060.

[15] 陈晓晨，徐影，许崇海，等.CMIP5全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J].气候变化研究进展2014，10(3)：217-225.

[16] 中国气象局.中国地区气候变化预估数据集 Verision3.0使用说明[M].[2012-12-23][2017-02-03]. http：// ncc. cma. gov. cn.