

DOI: 10.5846/stxb202005111181

张彪,王爽,李庆旭,谢高地.京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空变化分析.生态学报,2021,41(19):7530-7541.

Zhang B, Wang S, Li Q X, Xie G D. Spatio-temporal changes of water conservation service in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7530-7541.

京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空变化分析

张 彪^{1,2,*}, 王 爽^{1,2}, 李庆旭³, 谢高地^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国生态文明研究与促进会, 北京 100035

摘要:水分是干旱、半干旱地区植物生长的主要限制因子,也是权衡生态修复工程措施的重要依据。基于区域水量平衡方程与GIS空间分析技术,评估了京津风沙源治理工程区水源涵养功能的时空变化,并分析了气象、地形、植被等因素对水源涵养功能的影响。结果表明:2000—2015年工程区的水源涵养量与涵养能力均有所增加,多年平均值分别为16.79亿m³和3.66mm。工程区水源涵养能力由西向东递增,高值区与较高区的面积占到工程区的32.45%;相比2000年,2015年有41.65%的地区水源涵养能力增大,其中22.01%的地区显著升高。但2000—2015年荒漠草原亚区水源涵养能力明显下降,农牧交错带草原亚区相对稳定,整体来看,典型草原亚区的水源涵养量最大,燕山丘陵山地水源保护亚区的涵养能力最高。主要原因在于工程区水源涵养能力易受降雨、气温以及植被覆盖度等因子影响,浑善达克沙地区与科尔沁沙地区的植被覆盖状况改善显著提升了其水源涵养能力,农牧交错带草原亚区和晋北山地丘陵亚区的水源涵养能力下降主要归因于降雨量减少,而荒漠草原亚区的涵养能力明显受到气候与植被的双重制约。

关键词:水源涵养功能;区域水量平衡;时空变化;区域差异;京津风沙源区

Spatio-temporal changes of water conservation service in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

ZHANG Biao^{1,2,*}, WANG Shuang^{1,2}, LI Qingxu³, XIE Gaodi^{1,2}

1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 China Ecological Civilization Research and Promotion Association, Beijing 100035, China

Abstract: Water is one of the critical restricted factors in arid and semiarid climates. Regional water cycles are a complex eco-hydrological process, and have become a research hotspot in the context of global and increasing human activities. As one of the important services of terrestrial ecosystems, water conservation is often defined as the interception of rainwater by an ecosystem within certain spatial-temporal conditions, and attaches great importance to regional hydrological improvements, regulation of water cycle, and drinking water protection. Therefore, a clear recognition of the water conservation changes in ecological engineering areas can provide important policy references for ecological protection and restoration measures. This paper estimated the dynamic changes of water conservation service in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area, using the regional water balance model and GIS techniques, and analyzed the influences of topographical, climatic and vegetation factors on water conservation capacity. The results indicated that the annual rainfall increased from 224mm to 383mm in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area during 2000—

基金项目:国家重点研发计划项目课题(2016YFC0503403)

收稿日期:2020-05-11; 网络出版日期:2021-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbiao@igsnrr.ac.cn

2015, and annual evapotranspiration and surface runoff changed in the ranges of 243—355mm and 36—62mm, respectively. So the water conservation service increased in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area during 2000—2015, the average amount of water conservation reached 1.68 billion cubic meters, with an average water conservation capacity of 3.66mm. The water conservation capacity in the project area gradually ascended from east to west; approximately 32.45% of the project area presented high and higher levels of water conservation capacity. Compared with 2000, 41.65% of the study area showed an improvement tendency in water conservation capacity in 2015, including 22.01% of the project area, which significantly enhanced. In addition, distinct differences in water conservation among eight subzones were observed. The water conservation capacity in Desert Grassland Subzone clearly descended, while it was relatively stable in Agro-pastoral Transition Zone Grassland Subzone. Therefore, the Typical Steppes Subzone provided the largest water conservation amount of the project area, and the Yanshan Hill Mountain Water Source Protection Subzone generated the highest water conservation capacity. The dynamic changes of water conservation service could be mainly attributed to rainfall, temperature, and vegetation coverage in the project area. The improvements of vegetation coverage in Hunshandake Sandy Subzone and Horqin Sandy Subzone enhanced their water conservation capacities. In contrast, the declining rainfall restricted the water conservation capacities in Agro-pastoral Transition Zone Grassland Zone and Shanxi Northern Hill Mountain Subzone, showing climate and vegetation constraints in Desert Grassland Subzone lowered its water conservation capacity. Therefore, multiple ecological restoration strategies should be implemented for different areas in water conservation capacity.

Key Words: water conservation service; regional water balance equation; spatio-temporal change; regional difference; Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

土地是人类赖以生存的物质基础和自然资源。由于人口数量持续增长和土地资源不合理利用,我国土地退化态势较严重^[1],截至2014年仍有荒漠化土地261.16万km²,沙化土地172.12万km²^[2]。为遏制土地退化趋势,我国相继实施了一系列重大生态保护工程^[3],并取得了显著的生态建设成效。但生态系统演化与恢复是一个漫长过程,开展生态系统状况评估与生态恢复成效监测尤为重要^[4]。由于我国重大生态工程区涉及到广大的干旱、半干旱地区,而水分状况是植被生长与生态修复的关键,因此清晰揭示生态工程区水分状况的动态变化可为生态保护与修复工程的规划布局提供重要参考。水源涵养是陆地生态系统的重要服务功能之一,对区域水文状况改善、水分循环调节以及饮用水源保护等具有重要意义^[5],但易受生态系统类型、土壤理化性质、地形地貌特征以及降水、蒸散和径流等因素影响^[6],因此准确评价水源涵养功能是当前研究的难点与热点。张彪等^[7]总结森林水源涵养功能的评估方法有土壤蓄水能力法、区域水量平衡法、年径流量法、多因子回归法等,王晓学等^[8]进一步明确了这些方法的基本假设和适用尺度,司今等^[9]则分析探讨了水源涵养功能计算方法的区域适用性。近年来,SWAT^[10]、SCS-CN^[11]、InVEST^[12]、DTVGM^[13]以及元胞自动机^[14]等模型也被应用于水源涵养功能评价中。但是,水源涵养是一定时空范围内生态系统截留与保持水分的过程和能力^[5],是多个生态水文要素与过程综合作用的结果,不同地区水源涵养的功能潜力及其影响因子可能不同,但是区域生态修复与保护工程规划布局的关键依据,为此需要清晰揭示区域降水的整体分配与利用情况。水量平衡方程是将区域生态系统视为一个黑箱,把大气降水作为输入水量,蒸散量和径流量作为输出水量,水量输入和输出的差值即为水源涵养量,可充分反映区域降水的整体分配情况^[15-16],而且使用频率较高^[6,11,17-18]。

京津风沙源治理工程是为遏制北京及周边地区土地沙化趋势、改善京津地区大气环境而实施的一项重大生态工程,其植被覆盖状况与生态系统功能受到重点关注。比如李庆旭等^[19]测算发现,2000—2015年京津风沙源区的植被覆盖度以0.4%/年的速率增加;张彪等^[20]采用修正风蚀方程估算发现,风沙源区的防风固沙功能也以年均0.71%的速率波动增加;吴丹等^[21]从生态系统结构、质量和服务功能的角度评估认为,2000—

2010 年京津风沙源治理工程的生态效应显著。但是京津风沙源治理工程集中分布在我国的干旱、半干旱地区,区域蒸散发与干旱化风险均较大^[22],区域水资源与土壤水分状况对工程区的植被及功能有重要影响^[23]。现有研究侧重工程区植被状况与防风固沙效益评估,对其水源涵养功能的变化规律及其空间差异研究较少。随着京津风沙源治理工程的持续推进,分区施策与精准修复已成为生态治理的重要任务,因此亟需分析揭示工程区水源涵养功能的时空变化差异。

为此,该文基于京津风沙源治理工程区的长序列遥感影像数据,采用区域水量平衡方程与 GIS 空间分析技术,评估分析 2000—2015 年工程区水源涵养功能的时空变化特征,分析揭示区域水源涵养功能差异及其影响因子,为京津风沙源治理工程的成效监测与分区施策提供参考依据。

1 研究方法及数据来源

1.1 研究区概况

京津风沙源治理工程区(109°30′—114°20′E, 38°50′—46°40′N)主要位于我国北方的干旱、半干旱地区,西起内蒙古达尔罕茂明安联合旗,东至河北省平泉县,南起山西省代县,北至内蒙古东乌珠穆沁旗。一期工程区面积 45.8 万 km²,涵盖北京、天津、锡林郭勒、承德、张家口等 11 个地市的 75 个县(旗、市、区)。

工程区地貌以平原、山地和高原为主(图 1)。其中,京津市区为海河平原的一部分,其西部与北部被太行山北端和燕山西部环绕,山地外侧为内蒙古高原;东部浑善达克沙地是锡林郭勒高原的重要组成部分,沙化土地广布;西部乌兰察布高原由阴山北麓的丘陵、地势平缓的凹陷地带及横贯东西的石质丘陵隆起带组成,境内多季节性河流;燕山山地和太行山地地形起伏较大,易造成水土流失。

工程区多年平均气温为 7.5℃,平均降水量为 459.5mm,且集中在 6—9 月,年蒸发量平均为 2110mm。工程区主要内流河有安固里河、大清沟,外流河有永定河、滦河、潮白河和辽河,水资源总量约为 229.16 亿 m³,其中地表水 132.93 亿 m³,地下水资源量 132.77 亿 m³。

工程区土壤种类繁多,内蒙古高原地带性土壤以黑钙土、栗钙土、棕钙土为主,燕山山地以石灰土、石质土为主。工程区植被类型复杂,内蒙古高原天然植被以冷蒿、大针茅、克氏针茅和短花针茅等为主,人工植被以阔叶乔木和旱生灌木为主;燕山山地及太行山北部山地天然植被多为次生杨桦林及荆条、胡枝子、山杏等针叶灌丛,人工植被以油松为主,高海拔地带以落叶松为主^[24]。

由于京津风沙源治理工程区面积广阔,地貌差异大,涉及不同的生物气候带和土壤类型区,且地表植被状况存在明显差异,参照石莎等^[25]划分方法,将工程区分为荒漠草原亚区、典型草原亚区、浑善达克沙地亚区、大兴安岭南部亚区、科尔沁沙地亚区、农牧交错带草原亚区、晋北山地丘陵亚区和燕山丘陵山地水源保护亚区等进行比较分析(图 1)。

1.2 研究方法

本文采用区域水量平衡方程评估工程区的水源涵养量与涵养能力。首先,利用工程区内气象站降雨数据插值得到每年的评估期降雨量(P),基于不同年份土地覆被数据与地表径流系数(r)估算地表径流量(R);然后利用 Thornthwaite Menorial 模型^[26-28]以及插值到的评估期温度(T)估算相应的最大蒸散量(L),并引入土地覆被蒸散发调整系数(e_i)估算蒸散发量(ET);水源涵养能力(WCA)为一定时间内评估单元的降雨量(P)与地表径流量(R)及蒸散发(ET)的差值,水源涵养量(WCQ)为某区域水源涵养能力(WCA)与土地覆被面积的乘积。计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^n r_i \times P \quad (1)$$

$$L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3 \quad (2)$$

$$ET = \sum_{i=1}^n e_i \times \frac{1.05 \times P}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05 \times P}{L}\right)^2}} \quad (3)$$

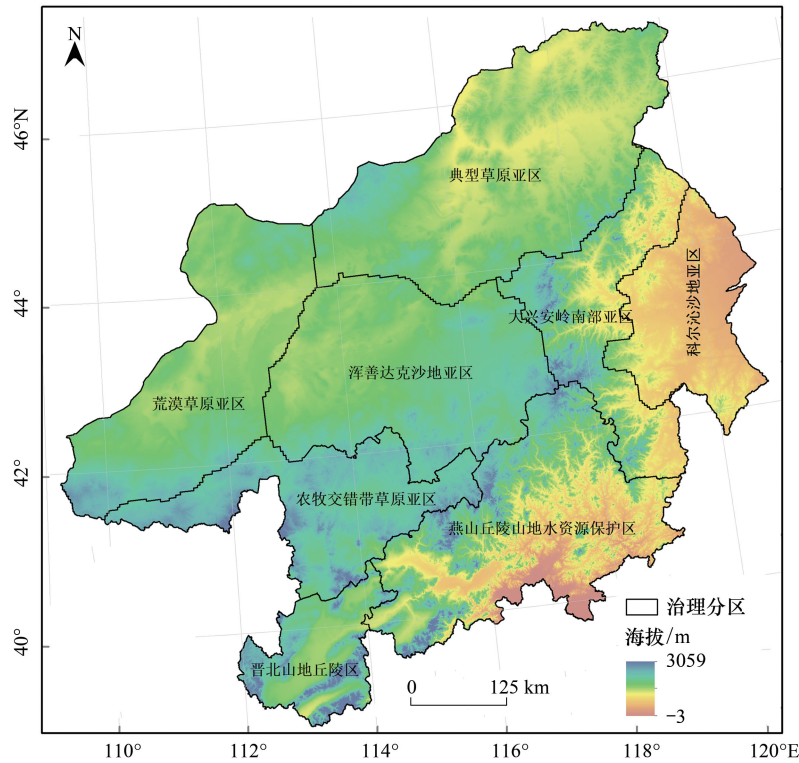


图 1 京津风沙源治理工程区海拔及分区组成

Fig.1 Altitudes and subzones in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

$$WCA = P - R - ET \tag{4}$$

$$WCQ = \sum_{i=1}^n WCA_i \times A_i \tag{5}$$

式中, P 为评估期降雨量(mm), R 为地表径流量(mm), r_i 为不同土地覆被类型的地表径流系数(表 1); L 为评估期最大蒸散量(mm), T 为评估期平均气温(℃), ET 为蒸散发估算量(mm), e_i 为不同土地覆被类型的蒸散发调整系数(表 1); WCA 为水源涵养能力(mm), WCQ 为区域水源涵养量(m^3), A 为土地覆被面积(hm^2), i 为土地覆被类型。考虑到工程区 80%降雨集中在 6—9 月份^[34], 本文将评估期设定为每年的 6—9 月,并估算相应年份的降雨量、蒸散量和径流量。

表 1 京津风沙源治理工程区径流系数与蒸散发调整系数

Table 1 Averaged coefficients of runoff and evapotranspiration in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area							
土地覆被类型 Land cover type	森林 Forest	灌丛 Shrub	草地 Meadow	农田 Farmland	湿地 Wetland	沙地 Sand	城镇 Built-up area
地表径流系数 ^[6,29] Surface runoff coefficient	0.03	0.04	0.11	0.18	0	0.7	0.9
蒸散调整系数 ^[30-33] Evapotranspiration adjustment coefficient	1.3	1.2	1	1.1	1.5	0.6	0.4

1.3 数据来源

本文中 2000—2015 年京津风沙源治理工程区的地表覆被类型及其面积均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)的土地利用数据(30m×30m 栅格),包括森林、灌丛、草地、湿地、农田、沙地、城镇等 7 类;气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)的位于工程区内的 81

个气象站,并采用6—9月降水数据插值成栅格数据。为保证不同数据精度的一致性,以上数据均重采样为100m×100m的栅格单元参与计算。

2 结果与分析

2.1 年际变化

结果表明,2000—2015年京津风沙源治理工程区的降雨量波动在224—383mm之间,其中2007年和2012年分别达到最小值和最大值,多年平均的评估期降雨量为289mm,且总体呈现小幅增加趋势(图2),对区域水源涵养功能的发挥与利用有一定积极意义。2000—2015年工程区蒸散量与降雨量变化趋势基本一致,评估期蒸散量变动在243—355mm之间,多年平均值为295mm,且受区域气温上升的影响^[35],评估期蒸散量整体有所增大,加剧了区域干旱化趋势^[36]。此外,2000—2015年京津风沙源治理工程区地表径流量介于36—62mm之间,且受降雨量与地表覆被变化的影响,径流量波动变化显著,多年平均值为46mm(图2)。

2000—2015年间京津风沙源治理工程区可涵养水源3.61亿—35.39亿m³,并分别于2007年和2012年达到最低值和最高值,多年平均的水源涵养量为16.79亿m³,约占工程区水资源总量的7.33%、地表水资源量的12.63%,对工程区植被生长需求与生态恢复有一定积极作用;2000—2015年工程区水源涵养能力变动在0.74—7.23mm,多年平均的涵养水源能力为3.66mm,不足平均年降雨量(459.5mm)的1.14%,说明大气降水的有效利用水平较低。此外,2000—2015年京津风沙源治理工程区的水源涵养量与涵养能力均呈现整体增加趋势(图3),原因在于工程区生态状况的改善提升了区域水源涵养功能,但相比之下,水源涵养量的变化幅度高于涵养能力,这是因为水源涵养量受涵养能力与地表覆被的共同影响。

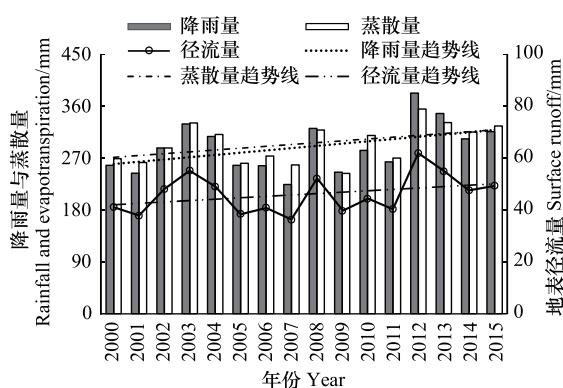


图2 京津风沙源治理工程区降雨量、蒸散量和地表径流量变化

Fig.2 Changes of rainfall, evapotranspiration and runoff in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

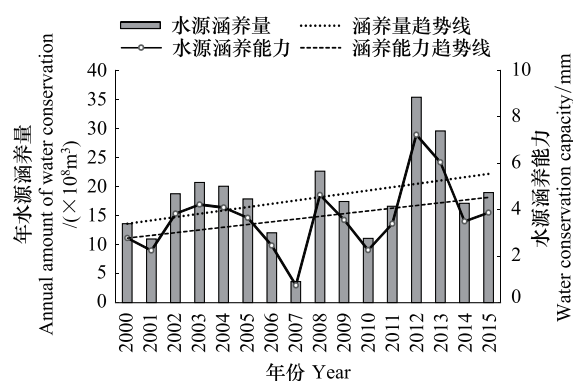


图3 京津风沙源治理工程区水源涵养功能变化

Fig.3 Changes of water conservation service in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

2.2 空间格局

基于京津风沙源治理工程区水源涵养能力空间差异发现,工程区东部水源涵养能力普遍高于西部,且高涵养能力的区域明显增加(表2),说明工程区水源涵养功能整体改善。水源涵养能力高值区主要为东乌穆沁旗的东北部以及宽城、蓟县、平谷、承德和兴隆县等南部地区,其面积约占工程区的7.52%;水源涵养能力较高区的面积较大,约占24.93%,集中分布在太仆寺旗、阿鲁科尔沁旗、西乌珠穆沁旗以及多伦、张北县等区域;涵养水源能力一般的地区面积最大,占到工程区的38.03%,且集中分布在西北部;另外有11.17%的水源涵养能力较低区,主要分布在治理工程区的西部以及西南部地区;而水源涵养能力低值区约有18.35%,且集中分布于达尔罕茂明安联合旗、四王子旗、苏尼特左旗和苏尼特右旗等西部地区(图4)。

表 2 京津风沙源治理工程区 2000—2015 年水源涵养能力变化统计
Table 2 Changes of water conservation capacity in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area from 2000 to 2015

涵养能力分区 Water conservation capacity zoning	涵养能力 (WCA) 分级/mm Grading value	分区面积占比/% Area proportion	涵养能力变化分区 Changed capacity zoning	变化幅度 (Δ) 分级/mm Grading value	变化区 面积占比/% Area proportion
高值区 Highest area	$WCA \geq 7$	7.52	明显增加区 RSignificant increase area	$\Delta \geq 3$	22.01
较高区 RHigher area	$5 \leq WCA < 7$	24.93	小幅增加区 Rslight increase area	$1 \leq \Delta < 3$	19.64
一般区 RGeneral area	$3 \leq WCA < 5$	38.03	无变化区 RNo change area	$-1 \leq \Delta < 1$	39.00
较低区 RLower area	$1 \leq WCA < 3$	11.17	小幅下降区 Rslight descending area	$-3 \leq \Delta < -1$	15.23
低值区 RLowest area	$WCA < 1$	18.35	明显下降区 RSignificant descending area	$\Delta < -3$	4.11



图 4 京津风沙源治理工程区多年平均涵养水源能力空间分布
Fig.4 Averaged water conservation capacity in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

相比 2000 年,2015 年京津风沙源治理工程区有 41.65%的地区涵养水源能力增加(表 2),其中 22.01%的地区显著增加,主要分布在东乌珠穆沁旗的东北部以及赤峰市、隆化县、滦平县以及北京市密云区等;19.64%的地区水源涵养能力小幅度增加,主要为锡林浩特市、克什克腾旗、西乌珠穆沁旗、巴林左旗等。工程区中西部地区水源涵养能力变化不明显,其面积占到 39%。此外,苏尼特左旗、苏尼特右旗、四王子旗和达尔罕茂明安联合旗等西部地区的水源涵养能力小幅下降,其面积约占 15.23%。另有 4.11%的区域水源涵养能力显著下降,主要分布在四子王旗南部、苏尼特左旗北部、朔州市、多伦县以及张北县等地区(图 5)。可见,2000—2015 年京津风沙源治理工程区东部和北部的水源涵养能力增加明显,而西部与中部的部分地区下降。

区年均涵养水源量为 0.70 亿 m^3 , 仅为工程区水源涵养量的 3.89%, 其水源涵养能力也不及 1mm。

从不同治理分区水源涵养变化来看(图 7), 2000—2015 年科尔沁沙地亚区的水源涵养能力上升趋势显著; 典型草原亚区、大兴安岭南部亚区、燕山丘陵山地水源保护亚区和浑善达克沙地亚区的水源涵养能力均波动增加, 不过 2007 年燕山丘陵山地水源保护亚区和晋北山地丘陵亚区的水源涵养能力出现负值, 浑善达克沙地亚区水源涵养能力的增幅较小; 虽然 2000—2015 年农牧交错带草原亚区的水源涵养能力均为正值, 但多在平均值附近波动(3.40mm), 其变化趋势相对稳定; 荒漠草原亚区的水源涵养能力明显较低, 且与年份变化负

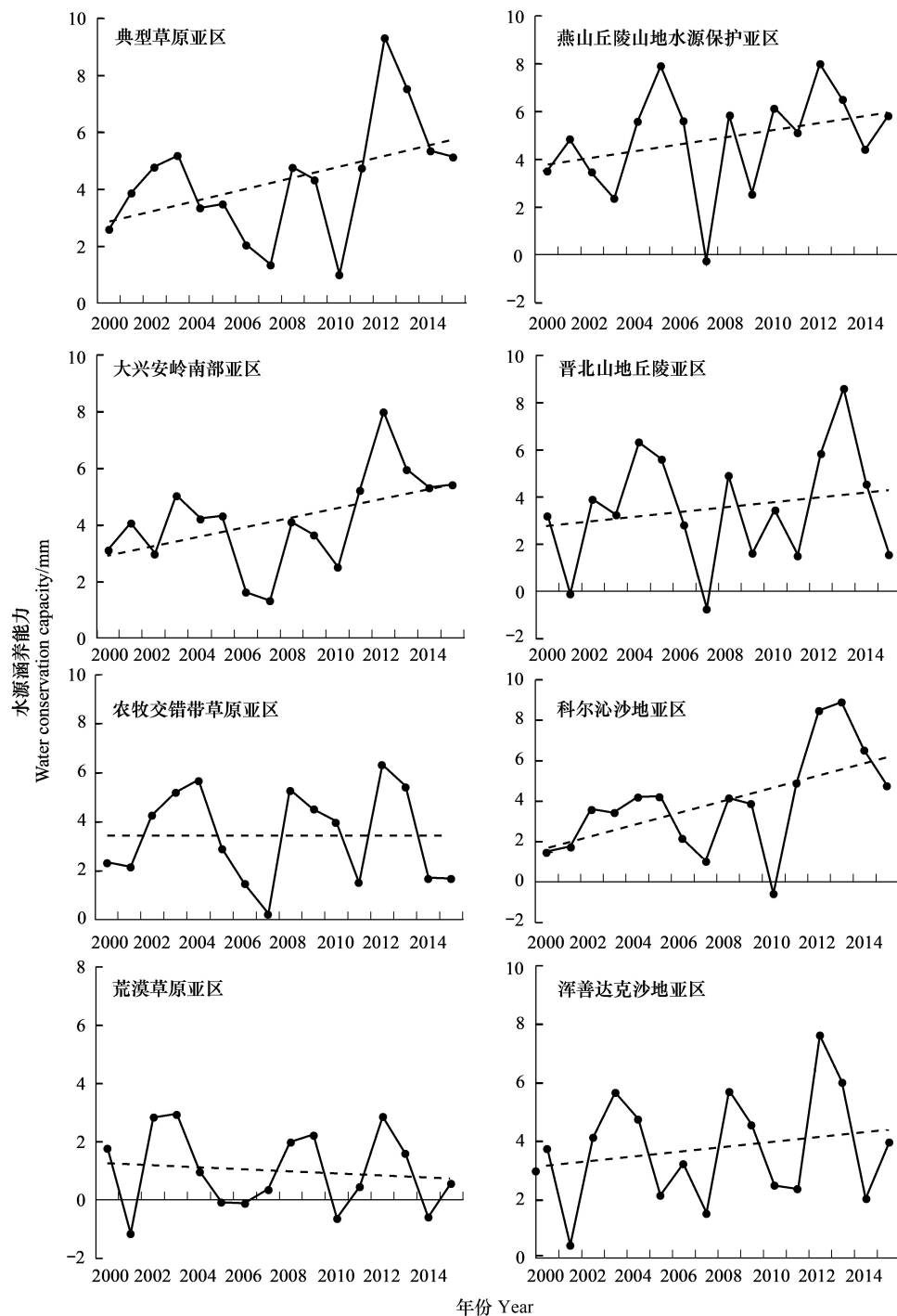


图 7 京津风沙源治理工程区不同亚区水源涵养能力变化趋势

Fig.7 Changes of the water conservation services in subzones of the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

相关,2000—2015 年其水源涵养能力多次出现负值,水源涵养功能下降趋势明显。

2.4 影响因子

区域水源涵养功能易受自然因素和人类活动的综合影响。为识别气象、地形以及植被格局等因素对水源涵养功能的影响,本文选取年均温、降雨量、海拔、坡度、植被覆盖度以及斑块聚集度指数(CI)等指标,分别与水源涵养能力进行敏感性或相关性分析。结果表明,京津风沙源治理工程区的水源涵养能力主要受降雨和气温的影响,且降雨量变化对涵养能力影响远大于气温变化的影响(表3)。如果工程区降雨量减少 10%,其水源涵养能力将下降 49%,而如果气温降低 10%,水源涵养能力则增大 2.47%。此外,工程区水源涵养能力与地形、植被等因子存在一定程度的相关性(图 8)。其中,区域涵养水源能力与植被覆盖度的正相关性最高(0.45),说明区域植被质量状况越好越有利于截留涵养雨水。随着地形坡度的增加,其水源涵养能力表现出一定程度的增加趋势(0.28),这可能与坡面汇流过程增加有关;但随着海拔高度的增加,区域水源涵养能力

表 3 京津风沙源治理工程区气候参数变化对水源涵养能力的敏感性

Table 3 Sensitivities of climatic factors in water conservation capacity in the Beijing-Tianjin sandstorm sourcer

气候参数变化 Climatic change	20%	10%	-10%	-20%	-30%
降雨量敏感性 Rainfall sensitivity/%	10.28	9.53	-49.15	-68.97	-88.78
年均温敏感性 Temperature sensitivity/%	-4.60	-2.25	2.47	4.82	7.18

敏感性是根据不同气候参数变化情景下水源涵养能力变化值与水源涵养能力值的百分比计算得到

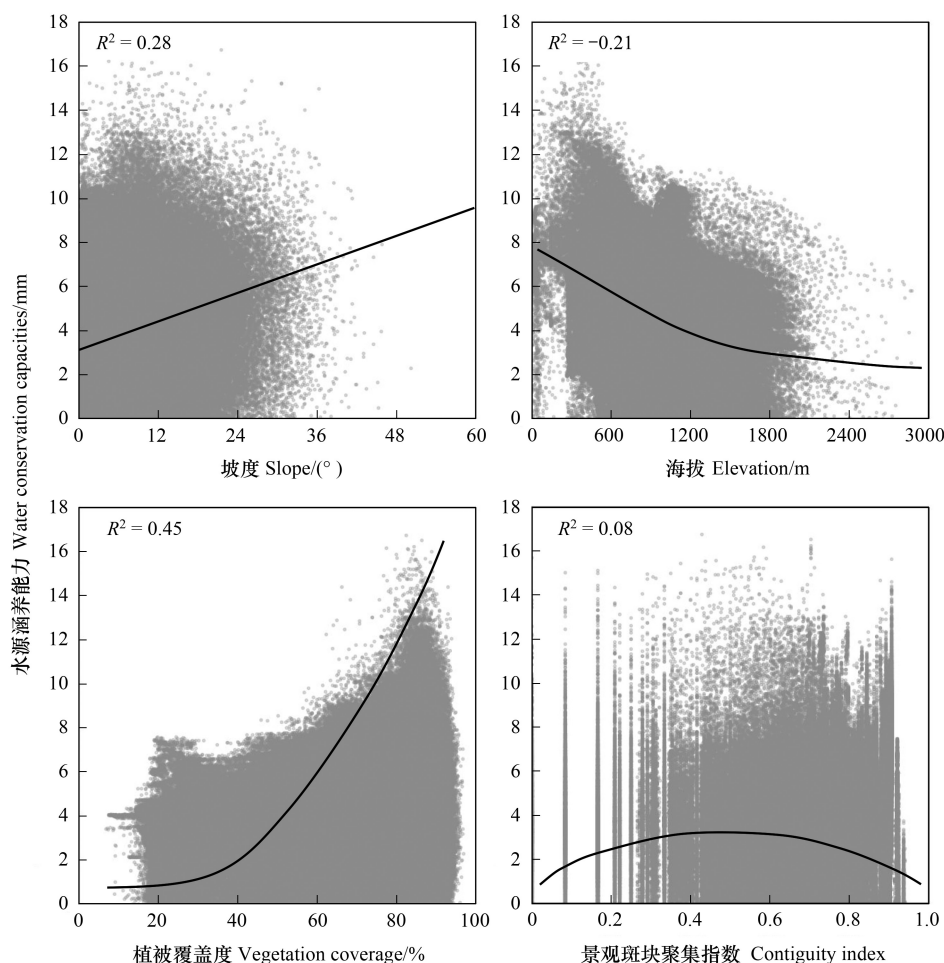


图 8 京津风沙源治理工程区水源涵养能力与影响因子的相关性

Fig.8 Relations of water conservation capacities and influence factors in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project area

有所下降(−0.21),主要是高海拔处的降雨与气温均有所降低所致。虽然景观斑块聚集度指数(CI)与涵养水源能力有一定关系,但相关趋势并不显著。整体来看,京津风沙源治理工程区的水源涵养能力与温度、降雨以及植被覆盖度的关系密切。

为分析不同影响因子对各亚区水源涵养能力的制约程度,利用 SPSS 软件统计水源涵养能力与气候(降雨、气温)、地形(海拔、坡度)和植被(覆盖度、聚集度指数)的复相关系数(表 4)。结果发现,燕山丘陵山地水源保护亚区的气候、地形因素对其水源涵养能力的影响程度较大,相比之下,晋北山地丘陵亚区的水源涵养能力主要取决于降雨、气温等气候因素,降雨量下降成为该地区水源涵养能力的限制性因子;典型草原亚区和农牧交错带草原亚区的涵养水源能力主要与气候、植被有关,但农牧交错带水源涵养能力较低的原因在于降雨量较低以及地表植被变化;大兴安岭南亚区较高的水源涵养能力主要受益于植被和地形因素;科尔沁沙地亚区与浑善达克沙地亚区的水源涵养能力主要与植被状况有关,2000—2015 年植被覆被状况改善明显提升了区域水源涵养能力;而荒漠草原亚区涵养水源能力主要受气候与植被因素制约,在植被稀疏、降水稀少的自然背景下,区域气温升高进一步加大蒸散发量而降低水源涵养能力。

表 4 京津风沙源治理工程区不同因子对水源涵养能力的影响

治理分区 Governance zone	相关系数 Correlation coefficient					
	气候 Climate		地形 Landform		地表覆被 Land cover	
	降雨 Rainfall	气温 Temperature	海拔 Altitude	坡度 Slope	植被盖度 Vegetation coverage	斑块聚集指数 Landscape contagion index
燕山丘陵山地水源保护亚区 Yanshan hill mountain water source protection subzone	0.452	0.039	0.413	0.008	0.208	0.056
典型草原亚区 Typical steppes subzone	0.621	0.413	0.077	0.159	0.613	0.135
大兴安岭南亚区 Greater Hinggan southern subzone	0.117	0.090	0.291	0.109	0.224	0.264
科尔沁沙地亚区 Horqin sandy subzone	0.063	0.021	0.181	0.033	0.251	0.044
浑善达克沙地亚区 Hunshandakesandy subzone	0.442	0.044	0.356	0.118	0.333	0.392
晋北山地丘陵亚区 Shanxi northern hill mountain subzone	0.448	0.447	0.038	0.263	0.240	0.193
农牧交错带草原亚区 Agro-pastoral transition zone grassland subzone	0.295	0.279	0.149	0.029	0.376	0.311
荒漠草原亚区 Desert grassland subzone	0.084	0.417	0.018	0.019	0.285	0.029

3 讨论与结论

3.1 讨论

京津风沙源治理工程区主要位于我国北方干旱半干旱地区,水资源供需矛盾突出^[37],尤其是随着二期工程的实施推进,统筹兼顾水资源差异的分区施策已成为区域生态治理修复的重点。该文基于水量平衡方程和 GIS 空间分析技术,评估分析了 2000—2015 年京津风沙源治理工程区的水源涵养功能动态变化,发现工程区水源涵养功能有所提升,这可能与 2000—2014 年京津风沙源区 NDVI 显著增加有关^[38]。本研究测算工程区内水源涵养能力多年均值为 3.66mm,稍低于张雪峰等^[39]应用 InVEST 模型测算的锡林河流域草地的涵养水

源能力(4.11mm),主要原因在于该文估算了区域植被的实际蒸散量而不是潜在蒸散量(表5)。单楠等^[41]分析发现,京津风沙源区年尺度潜在蒸散对最高气温敏感,且空间上对气温的敏感性从东北向西南减少。该研究证实,典型草原亚区、晋北山地丘陵亚区和荒漠草原亚区的水源涵养能力受气温影响较大,可能是区域气温升高带来蒸散发量的增加。孙斌等^[35]证实,1981—2010年京津风沙源区气温显著上升,区域气候的暖干化可能加剧风沙源区草地的退化^[42],从而引起地表水热条件的改变和地表径流的增加^[43]。

表5 本文研究方法结果的不确定性分析

Table 5 Deviation analysis on the methods and results of this study

影响因素 Factors	前人研究 Previous studies	本研究 This study	不确定性 Uncertainties
蒸散量 Evapotranspiration	SEBAL 模型 ^[30,33] 、METRIC 模型 ^[32] 、SEBS 模型 ^[31] 、Thornthwaite Menorial 模型 ^[27,35] 、Penman-Monteith 公式 ^[34,36]	Thornthwaite Menorial 模型的 实际蒸散量	根据研究目的与数据情况选用模型,增加地表覆被参数调整,有一定误差。
径流量 Runoff	基于径流系数的地表径流 ^[6,18] 、基于 Hydrus-1D 模型的水分入渗 ^[34] 、地下径流 ^[40]	基于径流系数的地表径流量	根据研究目的选用计算方法,利用地表覆被类型确定径流系数,有一定误差。
计算方法 Calculating method	SWAT ^[10] 、SCS ^[11] 、InVEST ^[12] ^[39] 、DTVGM ^[13] 、水量平衡方程 ^[6,18]	水量平衡方程	较简便,清晰反映水分分配过程,存在一定误差

生态水文过程是大气降水、蒸散发、土壤入渗、地表径流、地下水运动、积雪融雪等过程综合作用的结果,目前有关降水、地貌、土壤等自然环境因子以及植被组成结构对水文过程的影响研究尚不完善^[44]。本文重点关注研究区土地覆被及气候、地形因素对水文过程的影响,尤其是区域降水输入以及植被蒸发散和地表径流的输出,未考虑沙地土壤入渗、地下水补给以及地下径流与地表径流的互相影响^[45],因此水源涵养量的估算可能存在一定误差。此外,水源涵养计量方法与研究尺度及研究目的有较大相关性^[8],虽然 SWAT、InVEST、DTVGM 等模型可模拟不同尺度生态系统水文调节分量^[5],但该研究从区域水量平衡的角度更有利于水源涵养功能的时空差异对比分析,但地形地貌、土壤类型、植被条件等区域水文要素的空间异质性,以及降水、蒸发散、径流等水文通量的时空异质性降低了尺度外推的准确性^[45],如何将不同尺度的研究成果进行整合外推,以及研发优化适用于草原区水源涵养功能评估模型还需要深入的探索和研究。

为此,建议将京津风沙源治理工程区依据水源涵养能力、提升潜力以及关键生态功能划分为重点提升区、优化维护区与综合保障区,并施以不同的生态恢复管控措施。其中,重点提升区以荒漠草原亚区为主,此地区水源涵养能力较低,地势平坦且以荒地沙地为主,土壤下渗快,应重点施加人工生态修复与保墒措施,减缓土壤水分下渗,降低区域蒸散发;优化维护区以水源涵养能力较高且生态恢复较好区域为主,包括科尔沁沙地亚区、浑善达克沙地亚区、农牧交错带草原亚区和晋北丘陵山地亚区,应逐步减少生态工程与人工干扰措施,增强生态系统的自然演替;而综合优化区为雨水资源较丰富、高水源能力的区域,包括燕山丘陵山地水源保护区、典型草原亚区和大兴安岭山地保护亚区,提供着水源涵养、水土保持、防风固沙等生态屏障功能,应综合调控局地气候-植被-土壤系统,保护丰富多样的自然生境。

3.2 结论

该研究表明,2000—2015年京津风沙源治理工程区的水源涵养量与涵养能力增大,多年平均值分别为16.79亿m³和3.66mm,在一定程度上保障着区域水分供给,但涵养大气降水的能力仍有较大提升空间。工程区水源涵养能力由西向东递增的空间格局趋势明显,近32.45%的地区涵养水源能力高于5mm;相比2000年,2015年有41.65%的地区水源涵养能力增加,19.34%的地区涵养水源能力下降,需要加以重点关注。此外,燕山丘陵山地水源保护亚区和典型草原亚区是工程区水源涵养功能的主要供给地,荒漠草原亚区水源涵养能力下降明显。整体来看,京津风沙源治理工程区的水源涵养功能主要受制于温度、降雨量以及植被覆盖度等因素,浑善达克沙地与科尔沁沙地水源涵养能力的提升在于植被覆盖状况的改善,而荒漠草原亚区的涵养能力明显受到气候与植被的影响,因此不同治理分区需注重水源涵养能力、提升潜力以及关键生态功能的不同而

施以不同的生态恢复与管控措施。

参考文献 (References):

- [1] 张克峰, 李宪文, 张定祥, 彭晋福, 陈健, 宇振荣. 中国土地资源退化时空变化分析. 环境科学, 2006, 27(6): 1244-1251.
- [2] 屠志方, 李梦先, 孙涛. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析. 林业资源管理, 2016, (1): 1-5, 13-13.
- [3] 沈国防, 吴斌, 张守攻, 李世东. 新时期国家生态保护和建设研究. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] 黄麟, 曹巍, 徐新良, 樊江文, 王军邦. 西藏生态安全屏障保护与建设工程的宏观生态效应. 自然资源学报, 2018, 33(3): 398-411.
- [5] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [6] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖燚, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [7] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534.
- [8] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [9] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2100-2109.
- [10] Glavan M, Pintar M, Volk M. Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments-lessons for the future. Hydrological Processes, 2013, 27(26): 3964-3980.
- [11] 杜世勋, 郭新亚, 荣月静. 基于 Budyko 假设和 SCS-CN 模型的河源区水源涵养功能研究. 水土保持研究, 2018, 25(1): 147-152.
- [12] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. 地理研究, 2016, 35(4): 664-676.
- [13] 夏瑞, 张远, 杨辰, 周宇建, 杨中文, 彭菲, 马淑芹. 基于分布式水文模型的武夷山市水文调节服务评估. 环境科学研究, 2019, 32(6): 1033-1042.
- [14] 王晓学, 李叙勇, 莫菲, 江燕. 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法——概念与理论框架. 生态学报, 2010, 30(20): 5491-5500.
- [15] 曾莉, 李晶, 李婷, 杨晓楠, 王彦泽. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化. 地理学报, 2018, 73(9): 1809-1822.
- [16] 崔景轩, 李秀芳, 郑海峰, 付尧, 张斯屿. 典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征. 生态学报, 2019, 39(9): 3026-3038.
- [17] Wakode H B, Baier K, Jha R, Azzam R. Impact of urbanization on groundwater recharge and urban water balance for the city of Hyderabad, India. International Soil and Water Conservation Research, 2018, 6(1): 51-62.
- [18] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 甄霖. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5847-5856.
- [19] 李庆旭, 张彪, 王爽, 谢高地. 京津风沙源区 2000—2015 年植被覆盖状况的区域差异研究. 地学前缘, 2018, 25(5): 298-304.
- [20] 张彪, 李庆旭, 王爽, 谢高地. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1041-1053.
- [21] 吴丹, 巩国丽, 邵全琴, 等. 京津风沙源治理工程生态效应评估. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 117-123.
- [22] 马志婷, 武志涛, 卫洁. 京津风沙源区干旱时空特征及对植被变化的影响. 山地学报, 2018, 36(4): 536-546.
- [23] 李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性. 中国草地学报, 2015, 37(2): 88-93.
- [24] 石莎, 邹学勇, 张春来, 苏格日乐. 京津风沙源治理工程区植被恢复效果调查. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 86-92.
- [25] 石莎, 冯金朝, 周芸芸. 京津风沙源治理工程区植被地上生物量与净第一性生产力动态. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6): 886-894.
- [26] Han F, Miao B L, Guo R Q, Li X H, Na R S, Wang H. Spatial-temporal evolution characteristics of climate productivity for the plants on Inner Mongolia desert steppe. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(5): 76-79.
- [27] 代海燕, 那顺, 杨晓华, 魏玉荣. 近 50 年呼和浩特市植物气候生产力与气候变化特征. 安徽农业科学, 2012, 40(19): 10224-10226.
- [28] 包学峰, 占布拉, 特古斯. 近 40 年西乌珠穆沁旗牧草气候生产力变化特征分析. 草原与草业, 2015, 27(1): 24-27.
- [29] 樊杰. 资源环境承载力预警技术方法. 北京: 科学出版社, 2019.
- [30] 王强, 康慕谊, 邢开雄, 段锦. 基于 SEBAL 模型的冀蒙接壤区 ET 反演. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2011, 47(1): 91-96.
- [31] 金学杰, 周剑. 基于 SEBS 模型和 Landsat 8 数据的黑河下游蒸散发时空特性分析. 冰川冻土, 2017, 39(3): 572-582.
- [32] 张圣微, 张鹏, 张睿, 刘廷玺. 科尔沁沙地典型区生长季蒸散发估算及其变化特征. 水科学进展, 2018, 29(6): 768-778.
- [33] 李旭亮, 杨礼箫, 胥学峰, 田伟, 贺缠生. 基于 SEBAL 模型的西北农牧交错带生长季蒸散发估算及变化特征分析. 生态学报, 2020, 40(7): 2175-2185.
- [34] 王宇祥, 刘廷玺, 段利民, 童新, 王冠丽, 李东方. 半干旱地区半流动沙丘水分深层渗漏量及其对降雨格局的响应. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2710-2720.
- [35] 孙斌, 高志海, 王红岩, 吴俊君, 李长龙. 近 30 年京津风沙源区气候干湿变化分析. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 164-170.
- [36] 贾艳青, 张勃. 近 57 年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系. 土壤学报, 2019, 56(5): 1085-1097.
- [37] 李明志, 张学培. 实施京津风沙源治理工程的问题及对策. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2004, 3(3): 76-79.
- [38] 卫洁, 雷添杰, 孔冬梅, 王红岩, 武志涛. 基于遥感的京津风沙源区植被覆盖变化监测. 山西大学学报: 自然科学版, 2019, 42(1): 242-252.
- [39] 张雪峰, 牛建明, 张庆, 董建军, 张靖. 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局. 干旱区研究, 2016, 33(4): 814-821.
- [40] 张经天, 席海洋. 荒漠河岸林地下水位时空动态及其对地表径流的响应. 干旱区地理, 2020, 43(2): 388-397.
- [41] 单楠, 杨晓晖, 时忠杰, 赵西素. 京津风沙源区 1959—2011 年潜在蒸散发气候敏感性的时空变异. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1330-1337.
- [42] 马梅, 张圣微, 魏宝成. 锡林郭勒草原近 30 年草地退化的变化特征及其驱动因素分析. 中国草地学报, 2017, 39(4): 86-93.
- [43] 苗百岭, 梁存柱, 王伟, 王立新, 云文丽. 植被退化对典型草原地表径流的影响. 水土保持学报, 2008, 22(2): 10-14.
- [44] 王永利, 云文丽, 苗百岭, 梁存柱, 王伟. 内蒙古典型草原区地表径流的分布格局与动态. 水土保持研究, 2008, 15(4): 114-117, 122-122.
- [45] 刘贤赵. 论水文尺度问题. 干旱区地理, 2004, 27(1): 61-65.