

DOI: 10.5846/stxb201701180154

石万里, 刘淑娟, 刘世增, 袁宏波, 马剑平, 刘虎俊, 安富博. 人工输水对石羊河下游青土湖区域生态环境的影响分析. 生态学报, 2017, 37(18): 5951-5960.

Shi W L, Liu S J, Liu S Z, Yuan H B, Ma J P, Liu H J, An F B. Influence analysis of artificial water transfer on the regional ecological environment of Qingtu Lake in the lower reaches of the Shiyang River. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 5951-5960.

人工输水对石羊河下游青土湖区域生态环境的影响分析

石万里¹, 刘淑娟², 刘世增², 袁宏波², 马剑平², 刘虎俊², 安富博²

1 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

2 甘肃省治沙研究所 & 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 兰州 730070

摘要:通过对石羊河下游青土湖人工输水后水面形成区环境要素变化的调查研究, 分析了水面形成对区域地下水位、植被、大气温湿度、风速等的影响。结果表明:(1)由于输水方式、输水时间集中等因素影响, 区域水面形成快速; 且每个输水周期完成 6 个月后的区域保留水面积持续增大, 4a 间水面积增加 4.52 倍, 面积扩大的叠加效应明显。(2)输水作用和水面形成, 促使输水区域地下水埋深由 >6m, 提升到 0.6—3.2m。(3)水面形成促进了区域以白刺为代表的单一荒漠植被群落向芦苇草甸、盐化草甸等多样化群落演替。(4)水面形成的“冷岛效应”明显, 促进了区域小气候环境的改善; 输水区 500m 范围平均温度降低 55.67%, 湿度增加 3 倍。人工输水对青土湖区域生态环境的改善产生了明显的积极作用, 但输水政策的持续性、输水策略调整等不确定性影响, 以及水面形成对局部范围风沙活动、植物物种多样性等方面的负面影响值得关注 and 深入研究。

关键词:人工输水; 生态影响; 环境要素; 青土湖; 石羊河下游

Influence analysis of artificial water transfer on the regional ecological environment of Qingtu Lake in the lower reaches of the Shiyang River

SHI Wanli¹, LIU Shujuan², LIU Shizeng², YUAN Hongbo², MA Jianping², LIU Hujun², AN Fubo²

1 Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Gansu Desert Control Research Institute & State Key Laboratory Breeding Base of desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Lanzhou 730070, China

Abstract: This paper uses sample collection and position observation to survey and study changes of environmental elements in the aspect of 2010—2014 subterranean stage, vegetation, and narrow-scope climate of water-surface formation area for sake of making a quantitative assessment towards the effects of the regional ecological environment supplied water manually from Qingtu Lake off Shiyang River. In addition, the paper also analyzes the situation of water surface, depth of ground water at different time intervals, landscape structure of vegetation, species composition of vegetation community, and changes of quantity, air temperature, moisture, and wind speed. Some ecological factors were explored to respond to water surface formation. The findings show that (1) water surface becomes fast due to different delivery patterns and the duration of water delivery. Regional reserved water area increases to 6 months after each delivery, 4a water area increases by 4.52 times, the superimposed effect of area enlargement were apparent. (2) Water surface area increase and water delivery enlarges the regional ground water from 0.6 to 3.2m. The coefficient of association of reserved water area and ground water

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460134, 31260129); 甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金(GSAU-STS-1528)

收稿日期: 2016-00-00; 网络出版日期: 2017-07-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiwl@gsau.edu.cn

depth is 0.909. (3) The structure of original typical desert vegetation changed significantly after water body formation. Water body changes the regional plant community from a simple desert vegetation type before the water delivery, primarily dominated by *Nitraria tangutorum* Bobr, into reed meadows and salinized meadows around water surface. (4) Because of the formation of a water body and regional vegetation, a cold-island effect was evident during the present study, which improved the regional climate. The mean temperature 500m around water body decreased by 55.67%, and the humidity tripled. The influence of the water surface formation on wind speed was evident, which strengthened the surface erosion of the water surface. Artificial water delivery greatly improved the regional ecological environment of Qingtu Lake; however, due to the uncertainty of water delivery policy and its adjustment strategy, the relevant negative effects of blown sand and regional diversity of species should be addressed in future research.

Key Words: artificial water transfer; ecological influence; environmental elements; Qingtu Lake; Shiyang River

自然状态下的生态逆转是一个长期的动态变化过程^[1-2],为了加快退化生态系统的恢复,人们往往采取人工干预的方式,其中人工输水就是其中一种重要形式,以往的研究其具有良好的生态、社会效益^[3]。水资源不合理配置是干旱地区内陆河流域生态系统退化的主要原因,由上中游占用下游生态用水所引起。那么,对下游区域来讲,保证其一定质量和数量的生态用水将能够最小程度地改变天然生态系统的过程,保护区域物种多样性和生态整合性^[4]。而向生态退化区域实施输水工程,补偿地下水和改善水环境是河流生态系统恢复的基本行为和必然过程^[5],对促进区域环境逆转具有积极作用。以人工干预的形式输水恢复退化生态已经在塔里木河成功实施^[6],而且输水对该区域地下水位^[7-8]、植被、植物种^[9-11]、植物生理^[12]以及区域生态系统产生了明显的影响,证明人工干预输水是区域退化生态恢复的一种有效方法^[13-17]。

石羊河下游地处腾格里沙漠西北缘、甘肃省民勤县东北 70km 处,属于石羊河干三角洲,海拔高度约为 1292—1310m。石羊河尾间青土湖区域水面积曾经超过 400km²,但在 1959 年完全干涸,随着湖水干涸,湿地植被演化为荒漠^[18-19],大部分地段已被流沙覆盖^[20],且区域环境持续恶化。为了改善石羊河下游区域生态环境,由政府推动和主导从 2010 年 9 月开始,以渠道输送的形式向其下游青土湖连续注入生态用水,区域水面持续扩大,截至 2016 年 11 月,青土湖形成了 25.16km²水面^[21]。青土湖注水和形成水面的预期是依靠生态注水改变区域水文环境,提高青土湖生态功能,促进湖区植被恢复、延缓区域生态系统退化、减缓沙漠化的不断推进,推动石羊河流域乃至整个区域环境整治和生态恢复。石羊河下游输水是以快速改善石羊河尾间区域生态环境现状,防止荒漠化扩展为目标,从而直接以渠道形式向下游注水形成面状水域,从而对区域生态环境的改善产生积极影响。青土湖水面的形成必然会对周边生态系统产生影响^[22-24],那么水面形成后该区生态要素响应如何?水面形成对周边生态系统的影响究竟有多大?能否改变该区域生态状况?这些就成为值得研究和探讨的问题,也是社会各界所关注的一个热点问题。本研究通过对青土湖水面形成区域地下水位、植被、以及小气候等三个方面的要素进行观测研究,旨在阐明水面形成的影响,以期定量地评价水面形成对区域生态环境影响提供依据。

1 研究区自然概况

研究区位于甘肃省民勤县东北的腾格里沙漠西缘(39°07'7.3"—39°08'3.2"N, 103°37'53.0"—103°38'40.6"E),属于石羊河下游干三角洲,海拔高度约为 1292—1310m。该区年平均气温 7.8℃,大于 10℃的有效积温 3289.1℃;年降水量 110mm 左右,且降水多集中于 7、8、9 月 3 个月,占全年降水量 73%,蒸发量达 2600mm 以上;无霜期 168d,光照 3181h,太阳辐射 630kJ/cm²;全年盛行西北、西北偏西风,夏秋季东风也比较盛行。年均风速 4.1m/s,主要害风为西北风;属典型温带大陆性干旱荒漠气候。研究区主要以湖相沉积物的砂土及壤质砂土为主;区域地形地貌以湖相沉积基质上分布 3—10m 高低不等的流动、半固定、固定沙丘与丘间低地相互交错分布的地貌类型。植被类型为典型的荒漠植被,白刺群落(*Nitraria tangutorum*)大面积连续分布,芦苇群

落(*Phragmites communis*) 偶见,伴生灌木有黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)和盐爪爪(*Kalidium foliatum*);草本植物种类主要有:刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago*)、戟叶鹅绒藤(*Cynanchum sibiricum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、砂引草(*Messerschmidia sibirica*)、碟果虫实(*Corispermum patelliforme*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)、画眉草(*Eragrostis minor*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、骆驼蒿(*Peganum nigellastrum*)等。

2 研究方法

2.1 定位植被观测样地设置

分别于 2011—2014 年 10 月下旬,以水面为中心向水面外围延伸设置 4 条典型调查样带,进行区域植被野外调查。每个样带宽 100m,样带长度以至沙漠边缘流沙区为界。在每个样带中以距水面边缘 0m 开始,每隔 50m 分别设置植被调查样地,每个样地各设置 1—2 个灌木调查样方、每个灌木样方对应 5—7 草本样方,共设 39 个灌木样方,260 个草本样方。乔灌木采用 20m×20m 样方,草本采用 1m×1m 小样方,分别调查记录植物种名、高度、冠幅及样方内出现的各物种的个体数量。调查的同时记录群落背景特征及经纬度、海拔、距水面中心的距离等信息。

2.2 水面积及地下水水位变化监测

选用的水面形成后(2010—2014 年)不同年份同一时间过境的高分辨卫星影像,采用面向对象的目标地物分类方法进行矢量化,得到研究区水面积变化及植被分布变化动态数据;地下水水位变化采用定位观测水井观测数据,2013、2014 年度增加水面周边 15 个深度 6m 坑井作为临时监测点,对地下水水位空间变化进行定期监测调查。

2.3 小气候要素观测

水面周边不同方向温度、湿度的影响主要受大气环流特征的影响,而本文主要探讨水面形成对周边小气候环境的影响及其范围。因此,本研究主要考虑风向变化的影响,观测点设置中,以受影响较为明显主风向各要素梯度变化作为主要观测内容,来代表水面形成对区域小气候要素变化的影响。分别于 2014、2015 年 4 月 11、15—18 日,采用 Kestrel 4500 手持气象站及风速梯度仪,设置对应植被样方小气候梯度观测点,对水面外围 500m 范围的风速、空气温湿度等小气候要素进行定位观测。

2.4 数据处理与分析方法

应用 Excel 软件进行野外调查、观测数据记录分类和绘图分析,应用 SPSS 18.0 统计分析软件进行观测数据的显著性检验、相关分析;使用 ENVI 4.8、ArcGIS 10.2 软件进行遥感影像分类和精度评价及水面积、植被变化数据统计。

3 结果分析

3.1 青土湖水面形成分析

石羊河下游青土湖区域原为湖沼平原,20 世纪 50 年代末干涸^[17-18]。由于地处腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠之间,经过近 60a 的风沙作用,形成以原始干涸湖盆为本底,海拔高度 1292—1310m,湖盆边缘为 3—10m 高度流动沙丘,有较大面积流沙覆盖平沙地,湖盆中部间分布大量白刺沙堆。青土湖人工输水区位于原始干涸湖盆中部,由于大量白刺沙堆分布其间,使区域地形产生起伏变化。根据卫星影像分析(表 1),随着连续几年的不断输水,青土湖水面急剧扩大。2010—2014 年青土湖输水期间,形成水面面积随输水持续增大,输水量与水面面积呈正相关,相关系数为 0.894;2013 年形成水面面积 607.126hm²,比 2010—2012 年形成的水面面积总和略多,2014 年形成水面约为前四年水面总和。

各年度输水 6 个月后,保留水面积明显减少,且各年度水面保留度差异较大,从 2013 年开始保留水面积增长明显。2011 年的入湖水量是 2010 年的 1.67 倍,但保留水面积减少了 33.17%,2012 年的入湖水量是

2011 年的 1.60 倍,保留水面积是 2011 年的 1.84 倍;2013 年的人湖水量减少,但保留水面积增加了 2.51 倍,至 2014 年保留水面积增加了 4.52 倍。

表 1 2010—2014 年青土湖输水量及水面积变化

Table 1 Changes of water transfer quantity and the formation area of Qingtu lake in 2010—2014

年份 Year	入湖水量 The amount of water running into the lake /(10 ⁴ m ³)	输水当年水面积 The area of water at the delivery year /(10 ⁶ m ²)	净增加值 The net added value /(10 ⁶ m ²)	水面积与水量比率 The ratio of water area to the amount of water /%	6 个月后保留水面积 The reserved area of water after six months /(10 ⁶ m ²)	净增加值 The net added value /(10 ⁶ m ²)	保留水面积与水量比率 The ratio of reserved water area to the amount of water/%
2010	1290	3.00	—	0.23	1.96	—	0.15
2011	2160	10.00	7.00	0.46	1.31	-0.65	0.06
2012	3000	15.00	5.00	0.50	2.41	1.10	0.08
2013	2000	15.00	0.00	0.75	6.07	3.66	0.30
2014	3300	22.00	7.00	0.67	10.82	4.75	0.33

“—”未监测

总体来看,区域连续、集中的人工输水促使石羊河下游青土湖区在短期内形成了水面,由于水面形成区域原始地貌起伏较小,形成水面面积大小主要受白刺沙堆分布密度、大小及区域土壤入渗特征等影响,但从输水 6 个月后的保留水面面积来看,人工输水对于水域面积扩大具有明显叠加效应,有利于水域面积的扩大和对原始风沙地表的覆盖,增强了输水效应。

3.2 区域地下水位变化

青土湖生态输水后 4a 间,区域地下水位埋深明显上升(表 2,图 1),但水面形成对区域地下水的影响范围有限。从时间序列来看(表 2,图 1),青土湖区域近 5a 来地下水位整体表现出上升趋势。区域地下水位近 7a 持续上升,2010 年输水后水位上升明显,其中,输水前两年度水位上升速度明显加快,2012、2013 年上升有所放缓,但 2013—2014 年上升速度明显增大,上升达 0.26m。输水的 5a 时间,区域地下水位平均上升 0.58m。

表 2 2008—2014 年青土湖区域年平均地下水埋深变化

Table 2 Average annual groundwater depth change of Qingtu Lake in 2008—2014

年份 Year	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
地下水平均埋深 Mean depth of underground water/m	3.91	3.84	3.78	3.60	3.54	3.46	3.20
地下水埋深年变化 Annual variability of underground water depth/m	—	-0.07	-0.06	-0.18	-0.06	-0.08	-0.26

“—”未监测

从空间上来看(表 3,图 1),水面形成区地下水埋深随距水面距离变化呈梯级增加。水面形成对地下水的影响,主要体现在在 0—200m 范围。输水 4a 后,距水面 0—50m 地下水埋深达到 0—0.75m,50—100m 上升到 1.50m 内,距水面 150—200m,地下水平均埋深小于 5.50m,在 250m 后地下水埋深>6.00m。

表 3 2013、2014 年青土湖岸距水面不同距离的地下水埋深

Table 3 Change of groundwater table of different distance to the edge of water area in Qingtu Lake in 2013, 2014

年份 Year	距水面不同距离平均地下水埋深 Mean depth of underground water at different distance from the ground/m					
	0	50	100	150	200	>250
2013	0	0.750	1.000	3.200	5.440	>6.000
2014	0	0.600	1.400	3.500	5.500	>6.000
两年平均变幅 The mean amplitude of variation for two years	0	0.675	1.200	3.350	5.470	>6.000
空间变幅 The space amplitude of variation	—	0.675	0.525	2.150	2.120	>0.530
年际变幅 The interannual amplitude of variation	0	-0.150	0.400	0.300	0.060	—

“—”未监测

距水面 0—250m 范围的地下埋深变幅超过 6.0m;100—150m 平均变幅达 2.15m,是地下水埋深变化幅度最大的区域。200—500m 范围地下水位平均变幅为 1.12m。距水面 0—50m 的地下水埋深的年变率为 0.82m/a,变异系数达 69.38%。距水面 50—150m,地下水位变率是 0.21m/a,变异系数为 24.80%,是地下水埋深变化幅度最小的区域。距水面 250m 之外,地下水埋深大于区域平均地下水埋深。

3.3 区域植被变化

3.3.1 群落景观结构变化

青土湖水面形成后,区域典型植物群发生明显变化。水面形成前区域为干涸古湖盆地貌,植被总体呈现以白刺群落广泛布于研究区,是区域植被绝对主体。伴生盐爪爪形成的群落,局部地段少量苏枸杞、沙蒿等灌木物种;伴生草本植物主要有盐生草、骆驼瓣、芦苇主要呈零散、形片状分布。水面形成后则在时间、空间上均出现分化现象,主要变化体现在群落组成由原始白刺优势群落演变为白刺、芦苇为明显优势的群落。从时间序列的变化来看,主要体现在白刺水淹与芦苇扩张的过程,2010—2012 年,白刺依然广布于整个青土湖地区,并有部分区域的白刺被水面淹没,水面周围有大量白刺伴水分布。芦苇分布范围快速扩大,主要分布于水面周边及过水区域。2013、2014 年,经过 3—4a 的连续输水,区域保留水面积明显增加,较大范围白刺被水淹没。在近水区域,白刺群落的典型性受芦苇种群迅猛发展的影响,只呈点状分布于芦苇群落之中,优势度明显下降。

从空间变化来看,区域植被变化主要体现在近水面区域芦苇代替白刺成为群落优势种(表 4)。距水面边缘 0—50m 范围变为芦苇的绝对优势群落,原有白刺优势明显下降;距水面边缘 50—100m,芦苇优势明显增大,但形成为芦苇+白刺构成的共建群落;距水面 100m 以外范围,则仍以白刺为群落优势种。其它组成群落的植物并未体现出明显的规律性变化。

3.3.2 群落物种组成与数量变化

青土湖调查区域共有植物种 22 种,其中灌木和半灌木植物占总数的 18.18%,分别是白刺、盐爪爪、黑果枸杞和沙蒿;多年生草本植物有芦苇、戟叶鹅绒藤、骆驼蒿、砂引草和蓼子朴,占总数的 22.72%;1 年生草本植物所占比例为 40.90%,但只有骆驼瓣频度较大,均为伴生植物种。

植物群落 Cody 多样性指数变化比较大的区域为距水面较远处(图 2),但其时间和空间变化不同。Cody 多样性指数的时间变化是:2011—2014 年的 Cody 多样性指数增大。在距水面 0m 范围内,2014 年的 Cody 多样性指数是 2011 年的 2.3 倍,其中植物种减少了 7 种,增加了 5 种,年变化率为 30%—50%,消失的灌木种有沙蒿和黑果枸杞,多年生草本有骆驼蒿和戟叶鹅绒藤,1 年生草本植物有沙蓬等。增加的植物种均为 1 年生草本植物,如雾冰藜和画眉草等。在距水面 50m,植物种减少了 4 种,增加了 1 种,消失的灌木种有沙蒿,多年生草本有骆驼蒿和戟叶鹅绒藤,1 年生草本植物有沙蓬。增加的植物种只有戟叶鹅绒藤,年变化率为

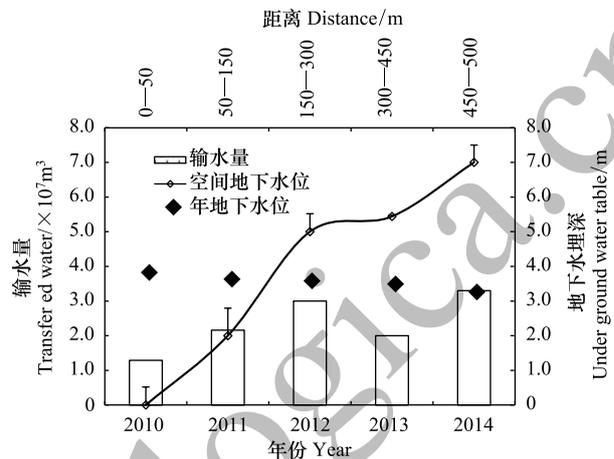


图 1 2010—2014 年青土湖岸距水面不同距离的地下水位

Fig.1 Changes of the water transfer quantity and groundwater table in Qingtu Lake in 2010—2014

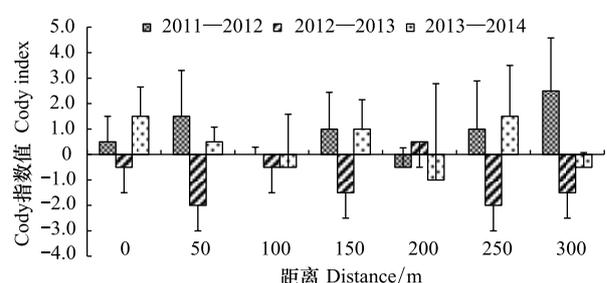


图 2 青土湖岸距水面 0—300m 范围的植物 Cody 多样性指数及地下水水位变化

Fig.2 The plant Cody index in 0—300m range of Qingtu lakeshore

表 4 2011—2014 年青土湖水形成区周边不同距离的群落物种重要值
Table 4 Species importance values of plant community in Qingtu Lakeshore in 2011—2014

距离 Distend/ m	年份 Year	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	芦苇 <i>Phragmites communis</i>	沙蒿 <i>Arenaria sphaerocephala</i>	黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>	盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	骆驼瓣 <i>Zygophyllum fabago</i>	戟叶锦鸡藤 <i>Cynanchum sibiricum</i>	刺沙蓬 <i>Salsola ruthenica</i>	盐生草 <i>Halogeion glomeratus</i>	骆驼蒿 <i>Peganum nigellastrum</i>	碟果虫实 <i>Conysernum patelliforme</i>	画眉草 <i>Eragrostis minor</i>	雾冰藜 <i>Bassia dasphylla</i>	砂引草 <i>Messerschmidia sibirica</i>	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>
0—50	2011	0.28	0.10	0.06	0.11	0.04	0.24	0.07	0.02	0.04	0.04	—	—	—	—	—	—
	2012	0.30	0.15	0.05	0.07	0.08	0.19	0.04	0.03	0.02	0.06	0.01	—	—	—	—	—
	2013	0.22	0.29	0.11	0.09	0.07	0.12	0.03	0.03	0.01	0.03	—	—	—	—	—	—
	2014	0.15	0.36	0.09	0.06	0.02	0.18	0.02	0.02	0.10	—	—	—	—	—	—	—
50—100	2011	0.25	0.15	0.11	0.09	0.04	0.15	0.05	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	—	—	—	—
	2012	0.30	0.16	0.12	0.07	0.08	0.12	0.08	0.04	0.02	0.01	—	—	—	—	—	—
	2013	0.25	0.28	0.10	0.03	0.05	0.03	0.08	0.05	0.07	—	0.06	—	—	—	—	—
	2014	0.14	0.35	0.09	0.06	0.02	0.15	0.10	—	—	0.04	—	0.05	—	—	—	—
100—150	2011	0.24	0.15	0.05	0.08	0.03	0.19	0.11	0.05	0.03	—	0.05	0.02	—	—	—	—
	2012	0.30	0.16	0.06	0.05	0.02	0.16	0.09	0.03	0.05	0.03	0.01	0.04	—	—	—	—
	2013	0.27	0.18	0.11	0.03	0.02	0.06	0.08	0.04	0.05	—	0.02	0.06	0.08	—	—	—
	2014	0.28	0.13	0.07	0.01	0.01	0.11	0.04	0.02	0.08	0.07	0.03	0.04	0.09	0.02	—	—
150—200	2011	0.36	0.18	0.04	—	—	0.22	0.12	0.02	0.01	0.05	—	—	—	—	—	—
	2012	0.32	0.19	0.05	—	—	0.16	0.11	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02	0.04	—	—	—
	2013	0.37	0.21	—	—	—	0.13	0.12	0.05	0.05	—	—	0.04	0.03	—	—	—
	2014	0.28	0.22	—	—	—	0.11	0.04	0.02	0.08	0.07	0.03	0.04	0.09	0.02	—	—
200—250	2011	0.32	0.18	0.09	—	—	0.20	0.06	0.03	0.01	0.05	0.01	—	0.02	0.03	—	—
	2012	0.39	0.20	0.04	—	—	0.12	0.02	0.04	0.04	0.04	0.01	0.06	0.02	0.02	—	—
	2013	0.42	0.14	0.09	—	—	0.01	0.06	0.06	0.09	0.01	0.01	0.01	0.08	0.02	—	—
	2014	0.37	0.18	0.09	—	—	0.11	0.07	0.03	0.01	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	—	—
250—300	2011	0.34	0.17	0.06	—	—	0.22	0.12	0.03	0.02	—	—	—	—	0.04	—	—
	2012	0.37	0.15	0.05	—	—	0.17	0.10	0.03	0.06	0.02	0.01	0.02	—	0.01	0.01	—
	2013	0.44	0.14	0.08	—	—	0.08	0.10	0.08	0.06	—	—	0.02	—	—	—	—
	2014	0.40	0.18	—	—	—	0.13	0.14	0.03	—	—	—	0.02	0.02	—	0.06	0.02
300—350	2011	0.29	0.16	—	—	—	0.26	0.13	0.03	—	0.03	—	—	—	—	0.10	—
	2012	0.32	0.15	0.04	—	—	0.10	0.02	0.06	0.04	0.08	—	—	—	—	0.16	0.03
	2013	0.40	0.14	—	—	—	0.04	0.07	0.05	0.09	0.08	—	—	—	—	0.13	—
	2014	0.28	0.10	0.15	—	—	0.08	0.01	0.05	0.03	0.06	0.03	—	0.04	—	0.17	—

“—”未监测

27%—36%。在距水面 50m 之后的 Cody 多样性指数随时间增加而呈减小趋势,其中距水面 250—300m 分别减小了 3.0—2.0 倍,增加的植物种为沙蓬、猪毛菜和盐生草等 1 年生植物种,消失的则为戟叶鹅绒藤和骆驼蒿等多年生植物。Cody 多样性指数的空间变化较大的区间为距水面 0—50m 的范围,Cody 多样性指数分别是 4.0 和 2.5,其次是 200—250m 的 Cody 多样性指数为 3.0。

3.4 小气候变化

3.4.1 空气温度和湿度变化

青土湖水面形成之后,距水面 0—500m 范围,大气温、湿度与距水面间距呈指数关系,温、湿度的空间分布形成以 150—200m 为界线的两个明显不同区域(图 3)。温度与距水面间距呈指数关系,温度的空间分布形成两个明显不同区域。距水面 0—150m,空气温度相对较低,变化相对较小,温差只有 0.25℃;距水面 150—200m 之间,空气温度发生急剧变化。150、200m 距离处,温度相差 1.79 倍,变异系数达 32.85%。而距水面 200—500m 范围,温差仅 0.23℃,变异系数也只有 1.23%。

近水区域 0—150m 范围湿度较高,平均 97.69%,空气湿度在距水面 150m 发生变化,距水面 150m 之后,空气湿度急剧减小,200m 处降为 73.24%,500m 处降为 29.45%,与区域周边荒漠环境湿度相当。水面外围 0—200m 范围的湿度变异系数为 33.58%。在距水面 200—500m 范围,湿度相差 43.80%,变异系数达 60.31%。

3.4.2 风速变化

青土湖水面形成对区域风况产生较大影响。从水面前至水面后 500m 的风速变化来看(图 4),经过水面后一定距离风速呈现先增大,再减小,又逐渐恢复至水面前风速大小的波动变化过程。本次测试中,水面前(0m)时的平均风速 3.81m/s,经过水面后(0m)处,风速增大到 4.6m/s,约增大 21.05%;随后急剧减小,在水面后 100m 处恢复至水面前 0m 大小;之后又逐渐增加,水面后 200—500m 距离段,风速持续减小,至水面后 500m 处,地表的风速大小与水面前 0m 处相当(图 4)。

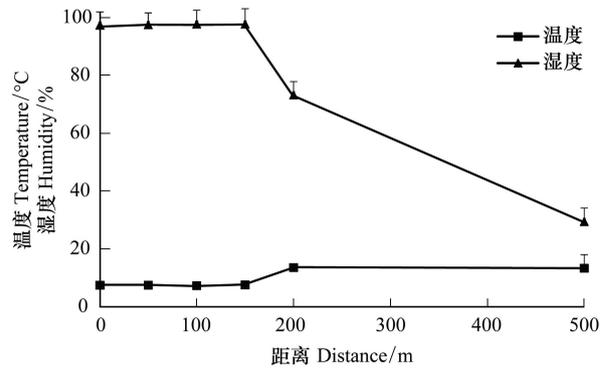


图 3 距水面 0—500m 范围的温度、湿度变化

Fig.3 Temperature and humidity changes in 0—500m range of the Qingtu Lake

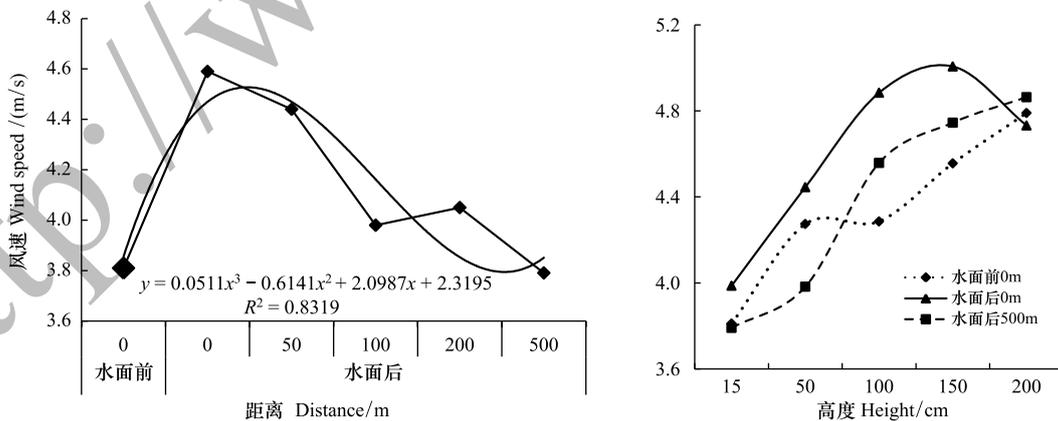


图 4 距水面 0—500m 水平范围,0—200cm 垂直高度风速变化

Fig.4 Wind speed changes in 0—500m horizontal distance and 0—200 height range of the Qingtu Lake

从不同垂直高度风速变化来看(图 4),经过水面后(0m),垂直高度 180cm 以下风速明显大于水面前 0m 及水面后 500m;水面后 500m 处,下层(80cm 以下)风速均小于水面前,但较高层风速均大于水面前;在 180cm

以上高度,水面后 500m 风速大于水面前和水面后 0m。

综合来看,水面对风速影响的垂直高度主要表现在 180cm 以下,水面后风速的变化与区域地貌的变化也有关系;水面对区域风速的影响范围在距水面 0—200m 距离段最为明显,水面后风速的增加,增大了水面边缘一定范围的风蚀强度。

4 结论

青土湖人工输水对石羊河下游尤其是水面形成区域产生了明显的影响,主要体现在:

(1)改善了区域水文环境,区域水面外围 0—300m 范围地下水位得到了明显提升。自 2010 年输水以来,石羊河下游青土湖区域形成的水面积持续增加,且随着输水时间增加的同时,水面积扩大的叠加效应明显,2014 年区域保留水面积表现出急剧增加,接近前 4a 增加水面之和。同时,输水促进了区域地下水位埋深持续上升,地下水埋深由输水前 >6m,提升到 0.6—3.2m;保留水面积与地下水埋深的相关系数达 0.909。输水 4a 后水面形成对地下水埋深的影响范围在距水面边缘 300m 范围最为明显。

(2)改变了区域荒漠植被格局,增加区域植物群落多样性。水面形成后区域原有典型荒漠植被群落结构发生显著变化,水面外围白刺种群的生长状况得以改善,芦苇分布范围面积显著增加;同时,区域植物群落由输水前以单一类型的白刺群落为主,演变为以水面为中心、随距离由芦苇草甸-盐化草甸-多种组成的荒漠植被等多种植物群落类型的变化趋势,增加了区域植被类型的多样性。

(3)改善区域小气候环境,对区域气温和湿度产生显著影响,改变水面形成区域一定范围的风沙活动状况。水面形成后,水体及植被产生“冷岛效应”作用明显;距水面 0—150m 范围的温度降低了 55.67%,区域大气湿度增加了 3 倍。水面形成对区域一定范围风速影响明显,可能会增大区域地表风蚀强度。水面对区域风速的影响范围在距水面 0—200m 距离段最为明显,水面后风速的增加,增大了水面边缘一定范围的地表风蚀强度。

5 讨论

通过水面形成对区域环境要素的影响分析,青土湖人工输水对改善区域环境具有明显的积极作用,但仍然存在多种不确定性,面临多样的问题,在关注水面形成积极效应的同时,也应该注意其负面作用及影响机理研究。

(1)由于地处典型干旱荒漠区,研究区植被长期受水胁迫影响,并形成依水分梯度分布模式^[25],这种植被空间分布与其他荒漠地区的湖岸植物空间分布模式相似^[26]。输水作用及水面的形成,使周围空气和土壤湿度增加,土壤盐分富集^[5],植被生存环境发生明显变化。经过多年人工输水干预,区域植被群落类型、分布格局、群落物种多样性发生了变化,根据本研究结果来看,青土湖人工输水仅水面形成区域的植被影响明显,覆盖度明显增加,但却使周边 0—50m 范围植物多样性明显减少。这一结果与塔里木河下游生态输水恢复天然植被过程的植被覆盖度、植物多样性均增加的结果^[5, 16, 27-28]相异,这主要与两种输水方式及种源有关。塔里木河输水沿天然河道形成线形水面,水流不仅增加整个流域水量,并且促进河流两岸植被整体恢复。而青土湖输水则是以人工渠直接输入,仅在尾间区域形成面状水面,其影响范围较小;同时,植被多样性变化取决于植物种对环境的适应特征,可能由于青土湖输水作用集中,水面形成时间短,区域长期适应干旱环境的植物在短期内尚不能适应突然饱和甚至超饱和的土壤水分变化,而造成近水面局部范围植物群落中部分物种退出而使群落物种多样性减少。因此,需要加强区域植被变化的长期观测研究,并通过适当人为干预措施促进水面周边一定范围植被的正向演替恢复^[29],充分发挥水面形成的积极作用。

(2)目前来看,青土湖水面形成后区域小气候产生了明显变化,尤其是影响区域风沙环境变化。风经过水面会产生强劲的向岸风^[30],青土湖区域水面形成增强了过水面后的风速,使水面后 100m 范围地表风蚀作用明显增强,因此要加强水面形成后局地风况变化研究,同时,应加强水面周围一定范围风沙防治。随着水面

形成及大面积扩大,青土湖的“冷岛效应”可能增强,进而影响当地气候条件^[31-32]。据报道,2014年的青土湖年降水量较多年平均值增长15.5mm^[24],但这一变化是受全球气候变暖大背景影响还是主要受青土湖水面形成或保留水面积大小、深度变化的影响仍需继续关注和研究。

(3)青土湖水面形成对区域环境要素的综合效应及影响机理尚需更深入研究。本文针对环境要素对人工输水的响应进行了初步分析,但水面形成对区域多个环境要素都将产生深远影响,而水体自身的面积大小、深度等变化对区域环境要素的影响程度、范围各不相同^[32],因此,需要加强相关深入研究,以探究其深层变化规律及机制,客观评价区域水面形成的生态效应,为进一步改善区域生态环境提供依据。

(4)青土湖人工输水的预期是依靠生态注水改变区域水文环境,从而促进区域生态环境恢复。这一措施取得了积极的作用,但通过与相关研究的比较和本研究的实地调查来看,仍存在诸多问题和挑战。首先,青土湖人工输水目前以定时段渠道输送为主要形式,以促进水面形成为主要目标,输水策略相对单一,而输水方式、输水时间、周期及输水量调整等策略的变化对输水效应具有重要影响^[33]。其次,青土湖人工输水是基于石羊河流域综合治理工程的一项内容,虽然输水产生了积极的作用,但作为政策性人工干预措施,其持续性、措施力度,是区域输水效果得以保存和加强的重要挑战。第三,为达到提高水资源利用效率和促进生态恢复的最佳效果,需要加强针对输水方式、策略,输水效果,区域环境变化监测评价以及输水可能带来的负面影响等方面的研究。

参考文献 (References):

- [1] 孙儒泳,李博,诸葛阳,尚玉昌.普通生态学.北京:高等教育出版社,1992:52-195.
- [2] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrell W M, Virginia R A, Whitford W G. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247(4946): 1043-1048.
- [3] 徐海量,王小平,叶茂,艾合买提·那由甫,吾买尔江·吾布力.塔里木河下游生态输水效益的民意调查. *地理研究*, 2007, 26(2): 346-354.
- [4] Gleick P H. Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 571-579.
- [5] 邓铭江.塔里木河下游应急输水植被恢复响应及生态修复研究. *中国水利*, 2004, (14): 15-18.
- [6] 石丽,吐尔逊·哈斯木,韩桂红.塔里木河下游生态输水的背景、效益和存在的问题. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 176-180.
- [7] 徐海量,陈亚宁,李卫红.塔里木河下游生态输水后地下水的响应研究. *环境科学研究*, 2003, 16(2): 19-22.
- [8] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,徐长春,张丽华.新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复. *生态学报*, 2007, 27(2): 538-545.
- [9] 陈永金,陈亚宁,刘加珍.塔里木河下游植被覆盖度变化与地下水水质关系. *环境科学*, 2010, 31(3): 612-617.
- [10] 沙代提·木沙,玉米提·哈力克,托乎提·艾合买提, Cyfka B, 柴政.塔里木河下游生态输水过程中荒漠河岸林活力恢复监测. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1898-1902.
- [11] 邓铭江.塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 380-386.
- [12] 阮晓,王强,陈亚宁,李卫红,许宁一.塔里木河流域荒漠河岸植物对应应急输水的生理响应. *生态学报*, 2005, 25(8): 1966-1973.
- [13] 崔旺诚.塔里木河下游输水后生态效应研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2004.
- [14] 李卫红,杨玉海,覃新闻,周海鹰.塔里木河下游断流河道输水的生态变化分析. *中国水土保持*, 2009, (6): 10-12, 19-19.
- [15] 桂东伟.塔里木河下游应急输水后的生态响应及生态用水保障研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2007.
- [16] 陈亚宁,张小雷,祝向民,李卫红,张元明,徐海量,张宏锋,陈亚鹏.新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2004, 34(5): 475-482.
- [17] 徐海量,陈亚宁,雷加强.塔里木河下游生态输水对沙漠化逆转的影响. *中国沙漠*, 2004, 24(2): 173-176.
- [18] 赵强,王乃昂,程弘毅,谌永生,郭剑英.青土湖沉积物粒度特征及其古环境意义. *干旱区地理*, 2003, 26(1): 1-5.
- [19] 赵强,王乃昂,薛翔燕,李秀梅,胡刚,谌永生.民勤盆地 12kaBP 以来的沉积旋回. *兰州大学学报:自然科学版*, 2004, 40(1): 90-95.
- [20] 李佳佳.石羊河流域青土湖全新世植被与环境变化[D].兰州:兰州大学,2006.
- [21] 樊醒民.民勤青土湖水面持续扩大. *甘肃经济日报*, (2016-11-23) [2016-11-26]. <http://www.gansudaily.com.cn/system/2016/11/23/016519463.shtml>.
- [22] 刘淑娟,袁宏波,刘世增,刘虎俊,李发明,郭树江,王琪,郭春秀,李菁菁.石羊河尾间水面形成区土壤颗粒的分形特征. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 285-289.
- [23] 董志玲,徐先英,金红喜,刘淑娟,张进虎,唐卫东,柴成武,赵鹏,王旭虎.生态输水对石羊河尾间湖区植被的影响. *干旱区资源与环*

- 境, 2015, 29(7): 101-106.
- [24] 马顺龙. 民勤湖区降雨增多表明什么. 甘肃日报, (2013-06-02) [2016-12-01]. <http://gsrb.gansudaily.com.cn/system/2013/06/02/014139862.shtml>.
- [25] 刘虎俊, 刘世增, 李毅, 杨自辉, 李银科, 张莹花, 郭春秀, 刘淑娟. 石羊河中下游河岸带植被对地下水位变化的响应. 干旱区研究, 2012, 29(2): 335-341.
- [26] 杜泉滢, 李智, 刘书润, 刘鸿雁. 干旱、半干旱区湖泊周围盐生植物群落的多样性格局及特点. 生物多样性, 2007, 15(3): 271-281.
- [27] 郭英杰, 许英勤, 马彦华. 新疆塔里木河下游应急输水的生态效益. 干旱区地理, 2002, 25(3): 237-240.
- [28] 陈永金, 刘加珍, 陈亚宁, 李新功, 朱海勇. 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系. 生态学报, 2013, 33(7): 2212-2224.
- [29] 杨戈, 郭永平. 塔里木河下游末端实施生态输水后植被变化与展望. 中国沙漠, 2004, 24(2): 167-172.
- [30] 宋春晖, 方小敏, 师永民, 王新民. 青海湖西岸风成沙丘特征及成因. 中国沙漠, 2000, 20(4): 443-446.
- [31] 马勇刚, 塔西甫拉塔·特依拜, 丁建丽, 徐成波. 塔里木南缘绿洲“冷岛”效应及与植被覆盖相关分析——以于田绿洲为例. 干旱区地理, 2007, 30(6): 865-870.
- [32] 王浩. 深浅水体不同气候效应的初步研究. 南京大学学报: 自然科学, 1993, 29(3): 517-522.
- [33] 杨鹏年, 吴文强, 买合木提·巴拉提, 魏光辉. 塔里木河下游生态输水策略分析. 干旱区研究, 2014, 31(5): 785-791.