

荒漠化地区水化学特性及其对胡杨林生长的影响

管文轲¹, 钟家骅², 霍艾迪², 易秀²,
侯志强³, 张敏⁴, 刘德林⁵, 何晓霞⁵

(1. 新疆林业科学院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 潍坊市水文局, 山东 潍坊, 261000; 4. 长安大学 外国语学院, 陕西 西安 710054; 5. 新疆塔里木胡杨林国家级自然保护区, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: [目的] 探讨荒漠化地区不同地表水水质特性对胡杨林更新演替的影响, 为胡杨林的保育及复壮更新工作提供理论支撑与科学根据。[方法] 以塔里木胡杨国家级自然保护区为研究区, 根据实地考察、采样及试验分析, 对塔河中游水质状况及其对胡杨生长的影响进行了对比研究。[结果] ①研究区地表水水化学类型为硫酸盐类钙组Ⅲ型或氯化物类钠组Ⅲ型水(按阿列金分类法), pH 值低于 8.0, 胡杨生长良好地区地表水样 pH 值在 7.42~7.82; ②漫溢河水总硬度、总碱度及 TDS 均高于干流水体, 分别为 325.3~769.5, 142.6~290.3 及 782.2~1 037.5 mg/L, 胡杨在地表水 TDS>1 000 mg/L 的环境下能正常生长; 区内地表水受到农田排水的不利影响, 氨氮含量在 0~0.45 mg/L。[结论] 研究区内地下水盐分含量远高于地表水, 不能满足胡杨幼苗的萌发与生长, 仅在濒临河道的狭窄地带能实现胡杨林的自然更新, 地下水盐碱胁迫是胡杨林更新复壮的重要制约因素。

关键词: 水化学特性; 胡杨林生长; 复壮更新; 塔里木河中游

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)01-0036-05

中图分类号: S719

文献参数: 管文轲, 钟家骅, 霍艾迪, 等. 荒漠化地区水化学特性及其对胡杨林生长的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1):36-40. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.007. Guan Wenke, Zhong Jiahua, Huo Aidi, et al. Hydrochemical characteristics and their effects on growth of *Populus euphratica* in desertification areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1):36-40.

Hydrochemical Characteristics and Their Effects on Growth of *Populus Euphratica* in Desertification Areas

GUAN Wenke¹, ZHONG Jiahua², HUO Aidi², YI Xiu²,
HOU Zhiqiang³, ZHANG Min⁴, LIU Delin⁵, HE Xiaoxia⁵

(1. Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang 830002, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Weifang Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Weifang, Shandong 261000, China; 4. School of Foreign Languages, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 5. Xinjiang Tarim *Populus Euphratica* National Nature Reserve, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: [Objective] To study the hydrochemical characteristics of the surface water and groundwater as well as their effects on the *Populus euphratica* growth in desertification area, in order to provide theoretical support and scientific basis for the conservation and rejuvenation of *P. euphratica*. [Methods] Field investigation was conducted and the samples were collected at Xinjiang Tarim *P. euphratica* national nature reserve. The hydrochemical characteristics of middle reaches of Tarim River and their effects on growth of *P. euphratica* were studied. [Results] ① In the studied area, hydrochemical types of the surface water were mainly SCa_{III} or ClNa_{III} (Based on the O. A. Arliekin's classification). The pH value of the surface water was

收稿日期: 2017-08-29

修回日期: 2017-09-12

资助项目: 新疆林业厅科技支撑专项“塔里木河中下游胡杨林恢复研究与示范”(2017-HY)

第一作者: 管文轲(1972—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 高级工程师, 从事荒漠化防治研究。E-mail: 455468441@qq.com。

通讯作者: 钟家骅(1991—), 男(汉族), 广东省惠州市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: jiahua.zhong@qq.com。

below 8.0. The pH value of the surface water was 7.42~7.82 where *P. euphratica* grew well. ② Total hardness and total alkalinity, TDS of overflowing river were ranged as 325.3~769.5, 142.6~290.3 and 782.2~1 037.5 mg/L, respectively. *P. euphratica* was able to grow normally in the environment of brackish water (TDS>1000mg/L). The water in this nature reserve was contaminated by the drainage of farmland, and the ammonia nitrogen content was 0~0.45 mg/L. [Conclusion] The distribution of the *P. euphratica* with different diameters characterized an inverted pyramid structure, thus its rejuvenation was confronted with difficulty.

Keywords: hydrochemical characteristics; growth of *Populus euphratica*; rejuvenation; the middle reaches of the Tarim River.

水作为干旱荒漠区最关键的生态因子,不仅是绿洲生态系统构成、发展与稳定的基础和依据,而且决定着干旱区绿洲化与荒漠化极具对立与冲突性的生态演化过程^[1-2]。胡杨是绿洲生态系统的代表性树种,其更新繁衍受到水量与水质的共同制约。塔里木胡杨国家级自然保护区位于塔里木河(简称塔河)中游,在保护动植物资源方面发挥了极大作用,但区内胡杨林的种群径级结构呈倒金字塔型,严酷的环境抑制了幼苗的萌发与存活,种群维持面临困难。

塔河流域水质特征,在塔里木盆地山区多为低矿化度重碳酸盐水,在平原河流中段多变为硫酸盐水,塔河阿拉尔站流量达 90 m³/s 时,河水矿化度约为 0.5 g/L,矿化度增至 0.5~1 g/L 时,硫酸盐增加明显,钙、镁离子也随之增加^[3];塔河下游接受生态输水后,河道侧渗作用形成一定宽度的潜水淡化带,地下水矿化度和主要离子含量普遍下降,胡杨林复壮明显,近河道处由于地下水位升高及强烈蒸发,导致地下水中离子与矿化度升高^[4-5];而塔河中游输水堤防修建后,堤防外围地下水化学性质变化规律发生了较大变化,距堤防 800 m 成为近堤防处水盐排泄区,沿河淡化带大面积萎缩,生态负效应开始显现^[6-7],塔河中游地下水 pH 值平均值为 7.54,变化幅度较小,沿河道地下水化学类型由 Cl⁻—SO₄²⁻—Na⁺—Mg²⁺ 向 Cl⁻—Na⁺ 型转变,地下水矿化度在 1.8~2.4 g/L,埋深在 2.8~3.7 m 为水盐皆优区,该梯度下物种多样性水平较高,总盖度变化范围为 10%~60%;在地下水高盐分区,矿化度为 3.6~13.8 g/L,样地总盖度明显下降;在水盐皆劣区,矿化度最大值达 18.4 g/L,盐碱胁迫作用威胁植物生长;塔河中游地下水盐分水平仅足以维持现有的胡杨生长,而不能满足胡杨幼苗生长的需要,由于地下水的微碱性而对土壤产生的盐碱化是影响植被发育与分布的重要因素,在塔河中游地下水埋深还未对植被生长形成显著胁迫作用^[8]。人类工程活动中,河岸防护堤的修建影响到了胡杨个体的生长,降低了堤外胡杨群落物种数量,堤外植物种类不断减少,胡杨以中老齡个体为主,种群

结构为衰退型^[9]。据保护区 2015 年统计数据显示,有林地、疏林地和灌木林地较 2006 年分别减少 9.86%,13.67%,15.05%,拯救胡杨林行动迫在眉睫。其他类似的研究显示,在艾比湖湿地保护区,地下水矿化度为 4.866 g/L 的采样地中,胡杨仍能良好地生长^[10];在和田绿洲,地下水矿化度不高于 6.02 g/L,地下水水质并非天然植被发育的首要制约因素^[11];在黑河流域平原区,胡杨要求地下水矿化度小于 5 g/L^[12]。可见,环境因子与天然植被生长间的关系复杂,在不同流域,或同一流域的不同区段,不同环境因子对绿洲植被生长的影响,都呈现出不同的特点。目前的研究侧重于塔河流域水文地质与地下水溶质运移,而对中游地区地表水与潜水水质特性及其对胡杨林生长的影响方面研究较少。本文拟以塔里木胡杨自然保护区为例,研究地表水与潜水的水化学特征,探讨荒漠化地区不同地表水水质特性对胡杨林更新演替的影响,以为胡杨林的保育及复壮更新工作提供理论支撑与科学根据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔河中游(轮台县英巴扎至尉犁县恰拉),河段长约 398 km,塔河在中游段横贯天山南麓冲积、洪积平原与塔克拉玛干沙漠北缘的交错地带,地势平坦,泥沙淤积,汛期河水泛滥形成积水沼泽,河道弯曲且时常迁徙形成一个长达 100 km 的淤积平原^[13]。该区域绿洲与沙漠交错,生态环境脆弱,2000—2013 年年均植被覆盖度为 10.6%~12.44%,其中农田植被覆盖度显著增加,上游来水量大部分被农田利用,生态环境退化仍是主基调^[14]。塔里木盆地内部十分干旱,塔河沿岸地区年降水量仅 50~80 mm,塔克拉玛干沙漠年降水量仅有 10 mm^[15],而中游地区年均蒸发量达 2 024 mm,年日照时数 2 442~2 925 h,年平均气温 10.9℃,极端最低温-25.5℃,温度年均日较差 14.6℃,无霜期 180~224 d,≥10℃积温 4 125.3℃。草本植物是该区植物群落的主

要组成部分,有芦苇(*Phragmites communis*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)等。乔木树种有胡杨(*Populus euphratica*)、灰叶胡杨(*Populus pruinosa*);灌木有怪柳(*Tamarix chinensis*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)等^[16-17]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与介绍 2016年9月,时值塔河汛期,

于塔里木胡杨国家级自然保护区,采用布设样地、植被调查、样品采集与试验分析的方法,研究在胡杨林不同生境下,区内地表水与潜水的水化学特性。样地均位于塔河中游南岸,编号分别为 W_1 、 W_2 、 W_3 ,样地在汛期均可被向两岸漫溢的河水浸淹,形成沿河岸的湿地景观,采集地表水较为方便,其中 W_3 样地水域面积最大, W_2 样地次之, W_1 样地水域面积最小。在塔河中游干流尉犁大桥下设置 W_4 采样点,采集干流水样。各样地的胡杨长势特征详见表 1。

表 1 塔里木河中游典型区域胡杨长势特征

项目	W_1 样地	W_2 样地	W_3 样地
生境	过渡地带	过渡地带	河岸地带
主要物种	怪柳(优势种)、胡杨	胡杨、怪柳、红柳、芦苇、骆驼刺、盐生草	胡杨、怪柳
总盖度/%	30~60	80~100	80~100
繁殖方式	根蘖繁殖	种子,根蘖繁殖	种子,根蘖繁殖

1.2.2 样品采集与测试方法 依据胡杨林的不同发育状况, W_1 样地胡杨生长衰弱,高度 6~8 m,部分已死亡; W_2 样地胡杨长势良好,与灌木、草本植物种群共同构成结构稳定的河岸林群落; W_3 样地胡杨长势旺盛,种群处于稳定增长阶段。

在这 3 个样地中采集地表水样,使用 GPS 系统定位,记录采样点的经纬度及海拔高度,并在 W_2 采样点进行挖掘,至潜水出露处,取得潜水样;并在塔河干流尉犁大桥下取河水样。每个水体取 3 份平行样进行水质分析测试,结果取平均值。化学指标及试验方法是:pH 值—酸度计法,溶解性总固体—质量法,总碱度、碳酸根离子、重碳酸根离子—双指示剂滴定

法,硫酸盐—EDTA 二钠容量法,氯化物—硝酸银容量法,氨氮—纳氏试剂分光光度法,游离二氧化碳—中和法,钙离子、镁离子、总碱度—EDTA 二钠络合滴定法。

2 结果与分析

2.1 塔里木河中游水化学特性

对研究区各采样点取得的水样进行化学分析(表 2),结果表明,各样地采样点的地表水样总硬度较高,测定值在 $16^\circ\sim 43^\circ$ (德国度),属于硬水($16^\circ\sim 30^\circ$)和极硬水($>30^\circ$), W_2 采样点潜水样硬度达 170.5° , W_4 河水样硬度最低,为 16.9° 。

表 2 塔里木河中游各样地水体水质分析

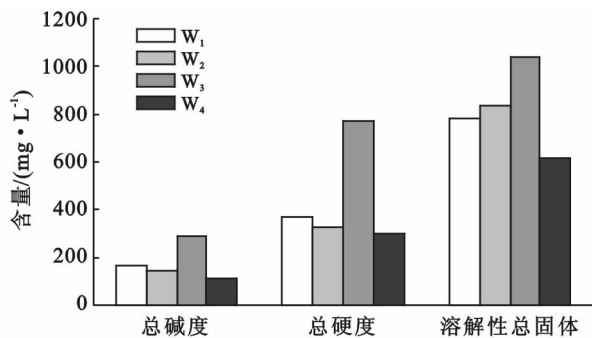
项目	W_1 样地	W_2 样地	W_2 样地	W_3 样地	W_4 样地
水体类型	地表水	地表水	潜水	地表水	地表水(塔河干流)
pH 值	7.62	7.82	7.32	7.42	7.82
总硬度(CaCO_3)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	369.1	325.3	3 034.3	769.5	300.3
总碱度(CaCO_3)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	165.2	142.6	665.7	290.3	115.1
溶解性总固体/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	782.2	838.0	14 476.3	1 037.5	615.3
硫酸盐/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	252.2	216.1	3 452.2	486.3	204.1
氯化物/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	164.0	239.9	5 340.7	70.9	133.0
钙/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	77.7	67.6	438.4	132.8	70.1
镁/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	42.5	38.0	471.0	106.4	30.4
氨氮(NH_4^+-N)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.20	0	0	0.45	0
重碳酸根/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	201.4	173.9	799.4	353.9	140.3
碳酸根/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0	0	0	0	0
游离 CO_2 /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	16.5	6.6	69.3	27.5	4.4

在塔河丰水期,保护区内干流河水及漫溢河水属于淡水及微咸水。塔河中游尉犁大桥下水样的 TDS 为 615.3 mg/L ,按生活饮用水卫生标准(GB 5749-

2006),溶解性固体低于 $1\ 000\text{ mg/L}$ 可认为是淡水。 W_2 采样点的地表水矿化度为 838 mg/L ;在 W_2 样地胡杨林下挖掘深度至 65 cm 时即有潜水出露,潜水样

矿化度达 14 476.3 mg/L,属于盐水(10~50 g/L)。W₃ 样地地表水样 TDS 为 1 037.5 mg/L,属微咸水,其 TDS 值较干流水体高 68.6%。

地表水与潜水样的 pH 值在 7.32~7.82,尉犁大桥下塔河干流水样 pH 值最高,为 7.82,W₂ 采样点潜水的 pH 值最低,为 7.32。各样地地表水样总碱度(CaCO₃)在 100~300 mg/L,相对于其余样地处地表水样,塔河干流水样总碱度最低,为 115.1 mg/L;各样地地表水体水化学特性基本指标对比详见图 1。



注:W₁,W₂,W₃,W₄ 为 4 个不同样地。

图 1 塔里木河中游不同区域地表水化学性质对比

研究区内潜水主要来源于地表水的下渗补给,在水质上,W₂ 采样点潜水 TDS、总硬度、总碱度分别是地表水的 17.3、9.3、4.7 倍。同一区域内地表水与潜水的的水质对比详见图 2。

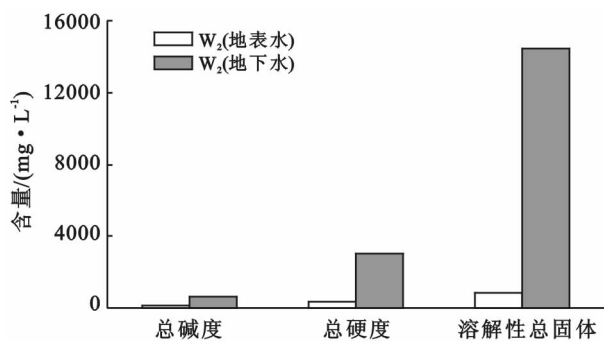


图 2 塔里木河中游相同区域地表水与潜水水质对比

保护区内地表水硫酸盐与氯化物含量分别在 204.1~486.3 及 70.9~239.9 mg/L,塔河尉犁大桥断面处河水样的氯化物含量为 133 mg/L,硫酸盐含量达 204.1 mg/L,均低于国家生活饮用水水质卫生规范中相应的限值(250 mg/L)。W₃ 采样点地表水硫酸盐含量为 486.3 mg/L,属于苦咸水。在 W₁ 与 W₃ 样地的地表水中,氨氮含量超出地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中适用于国家自然保护区的 I 类标准(≤ 0.15 mg/L),相应的,水体中游离 CO₂ 含量较高,分别为 16.5 与 27.5 mg/L。

2.2 塔里木河中游胡杨林生长状况

塔河中游荒漠河岸林中的胡杨在 9 月已开始进入落叶期,叶片变黄。常见植被组成为旱生、盐生植物,有胡杨、灰杨、沙枣、枸杞、盐穗木、铃铛刺、骆驼刺、甘草等。依据植被种类、数量、总体盖度等,将胡杨林群落的生境分为荒漠化区、过渡带与河岸辐射区 3 种区域类型。野外调查结果显示,该区胡杨与灰胡杨种群幼龄期个体较少,更新资源匮乏,种群径级结构呈倒金字塔型。

W₁ 样地位于塔河南岸阶地,属过渡带,地表有盐结晶表层,受季节性洪水影响,淹没期较短;其植被生长模式以怪柳为优势种,呈丛状生长,高度 2~4 m,丛径 2~6 m,近地表处可固沙高度 20~40 cm;胡杨生长稀疏。W₂ 样地属河岸辐射区,汛期有河水流经此地,水量较大,胡杨林种群结构相对稳定,树龄多为中龄和近熟林阶段;主林层高度 7~10 m,每 1 hm² 株数 170 株以上,最上层树高 16 m 以上,幼树层高 3~5 m,每 1 hm² 幼树 320 株左右;怪柳呈丛状散生或片状分布,高 2~4 m,盖度 10%~30%;草类有芦苇、盐生草、骆驼刺等。W₃ 样地位于河漫滩,具有成片胡杨林,草类较少,胡杨更新演替相对较易;新冲积物上可见胡杨种子苗和根蘖树苗,高 15~30 cm;胡杨幼树树龄一般在 10 a 以内,高 2~4 m,每 100 m² 面积上约 20~40 株,幼树已开始分化,发生大量凋亡而自然稀疏;胡杨群落的伴生种类不稳定,主要是怪柳幼株。

3 讨论

(1) 塔河干流区流经的塔克拉玛干沙漠外围地区地下水主要补给方式为汛期漫溢河水的下渗,汛期过后,河水以侧渗的形式补给河道两侧地下水^[18-19],因此地表水与地下水间水力联系密切。本研究发现在塔河中游沿岸典型的河岸林带下,地下水 TDS 值远高于同区域地表水,最高可达 14 g/L 以上,主要是由于中游堤防的修建,使地下水沿河淡化带范围大幅度萎缩,主要离子含量大幅度增加^[20-22],同时,汛期地下水水位的抬升,排水不畅,土壤上层盐类通过漫溢河水下渗而转移至地下水中亦是重要因素。研究区地表水水质的恶化,是自然与人为因素共同作用的结果,一方面由于地表积盐的溶解;其次是积水沼泽中水流缓慢、蒸发强烈,而区内大面积种植棉花、油菜、红枸杞、瓜类等经济作物过程中,大量农田排水的汇入已经对该区地表水质产生了不利影响。

(2) 由于输水堤坝生态闸在洪水期引水漫灌河岸两侧胡杨林,在塔河中游地区扩大了水域面积,季节性洪水的冲刷使得河流沿岸的地下水淡化带不至

于过度萎缩,减缓了堤坝修建所引发的生态负效应,维持了现有胡杨林的生长。但生态闸对沿岸地下水的淡化范围是有限的,仅在濒临河道的狭窄地带能满足胡杨幼苗的萌发和生长。当地下水矿化度达 2.2 g/L 以上,胡杨幼苗无法生存^[4],地下水矿化度 10~20 g/L,耐盐性最强树种才能适应^[23-24],地下水化学性质的改变对生物进行了自然选择与淘汰,因此区内胡杨林演替自然更新资源匮乏,多为中、老龄胡杨和怪柳、红柳等耐盐灌木。此外,塔河流域严酷的气候条件对胡杨幼苗萌发与存活的抑制;上游高强度的水土资源开发导致中游来水量减少;过度开垦耕作、放牧等人为活动的不利影响;土壤贫瘠、盐碱化;种间、种内竞争等因素均有可能造成胡杨种群的衰退。

4 结论

(1) 塔河中游较大的水域面积维系着沿岸天然胡杨林的生长,随着河水向河道两侧漫溢,地表水化学组分由原来的以硫酸盐、钙离子为主逐渐转变为以氯离子、钠离子为主,其矿化度、总碱度、总硬度等均有上升,同时区内大范围的农业生产活动亦对地表水产生了污染。地下水盐分含量过高,仅能维持现有中老龄胡杨的存活。

(2) 研究区植被组成主要为旱生、盐生植物,该区胡杨与灰胡杨种群幼龄期个体较少,更新资源匮乏,属于衰退型种群,仅在濒临河道的狭窄地带适宜胡杨幼苗萌发与生长。

[参 考 文 献]

- [1] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等.塔里木河下游地下水位对植被的影响[J].地理学报,2003,58(4):542-549.
- [2] 陈亚宁,崔旺诚,李卫红,等.塔里木河水资源利用与生态保护[J].地理学报,2003,58(2):215-177.
- [3] 魏忠义.塔里木盆地地表水化学特征及在人类活动影响下的变化[J].干旱区资源与环境,1994,8(2):23-30.
- [4] 陈永金,陈亚宁,李卫红.输水作用下的地下水水质变化与胡杨林更新:以塔里木河下游英苏断面为例[J].干旱区研究,2005,22(1):101-105.
- [5] 陈永金,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河下游输水条件下浅层地下水化学特征变化与合理生态水位探讨[J].自然科学进展,2006,16(9):1130-1137.
- [6] 李卫红,陈永金,张保华,等.塔里木河中游地下水化学变化及其影响因素[J].环境化学,2011,30(2):439-465.
- [7] 陈永金,陈亚宁,刘加珍.堤防修建对塔里木河中游湿地地下水化学特征及水盐运移的影响[J].聊城大学学报,2009,22(4):79-85.
- [8] 朱海勇,陈永金,刘加珍.塔里木河中游水盐梯度下的物种多样性研究[J].生态环境学报,2011,20(8/9):1226-1234.
- [9] 郑潮州,张希明,吴俊侠,等.输水堤防对塔里木河中游胡杨群落及种群的影响[J].生态学报,2010,30(5):1356-1366.
- [10] 赵枫,金海龙.艾比湖湿地自然保护区阿克苏河地下水特征与胡杨生长关系研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(8):156-160.
- [11] 乔云峰,王晓红,沈冰,等.和田绿洲地下水特征及其对生态植被的影响分析[J].长江科学院院报,2004,21(4):28-31.
- [12] 张光辉,石迎新,聂振龙.黑河流域生态环境的脆弱性及其对地下水的依赖性[J].安全与环境学报,2002,2(3):31-33.
- [13] 王亮,王夏楠,周正立,等.塔里木河中游典型样地土壤主要理化性质比较研究[J].北方园艺,2014(23):148-151.
- [14] 郭辉,黄粤,李向义,等.基于多尺度遥感数据的塔里木河干流地区植被覆盖动态[J].中国沙漠,2016,36(5):1472-1480.
- [15] Chen Ya'ning, Xu Changchun, Hao Xingming, et al. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008,30(6):921-929.
- [16] 张海涛,梁继业,周正立,等.塔里木河中游荒漠河岸林土壤理化性质分布特征与植被关系[J].水土保持研究,2016,23(2):6-12.
- [17] 霍艾迪,康相武,王国梁,等.基于 MODIS 的沙漠化地区植被覆盖度提取模型的研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):217-223.
- [18] 陈永金,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河下游输水条件下浅层地下水化学特征变化与合理生态水位探讨[J].自然科学进展,2006,16(9):1130-1137.
- [19] Huo Aidi, Dang Jian, Song Jinxi, et al. Simulation modeling for water governance in basins based on surface water and groundwater[J]. Agricultural Water Management, 2016,174:22-29.
- [20] 陈永金,李卫红,刘加珍,等.输水堤防工程对塔里木河中游荒漠河岸林生态系统的影响[J].自然科学进展,2009,19(5):505-511.
- [21] Huo Aidi, Chen Xunhong, Li Hua, et al. Development and testing of a remote sensing-based model for estimating groundwater levels in aeolian desert areas of China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011,91(1):29-37.
- [22] Huo Aidi, Peng Jianbing, Chen Xunhong, et al. Groundwater storage and depletion trends in the Loess areas of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(16):1167.
- [23] 孙保平.荒漠化防治工程学[M].北京:中国林业出版社,2000.
- [24] 霍艾迪,张广军,武苏里,等.利用 MODIS-NDVI 进行沙化土地评价研究;以陕西省北部地区为例[J].干旱地区农业研究,2008,26(2):154-158.