

西北内陆流域下游区天然绿洲退变主因与机制

张光辉, 聂振龙, 崔浩浩, 王 茜, 严明疆, 田言亮, 王金哲

Main causes and mechanism for the natural oasis degeneration in the lower reaches of northwest inland basins

ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, CUI Haohao, WANG Qian, YAN Mingjiang, TIAN Yanliang, and WANG Jinzhe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系

Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin

曹乐, 聂振龙, 刘敏, 卢辉雄, 汪丽芳 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 25-33

西北内陆盆地降水入渗补给季节性变化——以新疆昌吉地下水均衡试验场为例

Seasonal variation in recharge of infiltration from precipitation for the inland basins of northwestern China: taking the Changji groundwater balance test station in Xinjiang as an example

齐子萱, 周金龙, 季彦桢, 孙英, 王新中, 郑玉莲 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 12-20

黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究

Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin

祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 康卫东, 刘振英, 邵新民 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 29-43

西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24

西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究

Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China

阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 赵富波, 孙彭成, 宋燕妮, 邱临静 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 20-30

格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203024

张光辉, 聂振龙, 崔浩浩, 等. 西北内陆流域下游区天然绿洲退变主因与机制[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 1-11.
ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, CUI Haohao, *et al.* Main causes and mechanism for the natural oasis degeneration in the lower reaches of northwest inland basins[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 1-11.

西北内陆流域下游区天然绿洲退变主因与机制

张光辉¹, 聂振龙^{1,2}, 崔浩浩^{1,2}, 王 茜^{1,2}, 严明疆¹, 田言亮^{1,2}, 王金哲¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要: 西北内陆流域平原区降水稀少、蒸发强烈, 近 50 a 来各流域下游区天然绿洲面积不断萎缩。以石羊河流域、艾丁湖流域为研究区, 针对下游区天然绿洲退变主因与机制问题, 基于农田面积、出山地表径流量及灌溉引用水量、地下水开采量和流入下游区地表径流量调查统计、潜水埋深及包气带水理指标原位监测和地下水水位统测, 以及植被类型、分布范围、覆盖度和 NDVI 指数等遥感解译获得的资料, 应用流域水循环和水量均衡理论、时间序列分析和地学多元相关分析方法开展研究, 得出如下认识: (1) 近 50 a 来, 西北内陆流域下游区天然绿洲严重退化的根源是天然水资源匮乏, 主因是人口数量不断增加和上、中游区拦用出山地表径流量大。(2) 灌溉耕地不断扩大是下游区天然绿洲面积萎缩的主要驱动因素, 每增加 1.0 km² 灌溉耕地导致石羊河流域下游、艾丁湖流域平原区的天然绿洲面积分别减少 1.35~2.07 km² 和 1.57~3.83 km²; 气候越干旱、上游出山年径流量越少, 灌溉引流出山径流量占当年总径流量的比率越大, 流入下游区地表径流量越少, 由此造成下游区天然绿洲面积减少越大。(3) 西北内陆流域天然绿洲退化可控, 但是由于水资源不足, 制约了天然绿洲退化的可控性。在水资源匮乏背景下, 现状人口数量驱动的农田用水规模难以继续调减, 需要有序促进经济社会用水规模与天然绿洲修复供水规模之间的和谐程度。因此, 本研究成果为西北内陆流域水资源合理开发利用和天然绿洲退化修复提供了重要科学依据。

关键词: 西北内陆流域; 天然绿洲; 灌溉耕地; 干旱程度; 退变主因与机制

中图分类号: P641.73

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0001-11

Main causes and mechanism for the natural oasis degeneration in the lower reaches of northwest inland basins

ZHANG Guanghui¹, NIE Zhenlong^{1,2}, CUI Haohao^{1,2}, WANG Qian^{1,2}, YAN Mingjiang¹,
TIAN Yanliang^{1,2}, WANG Jinzhe¹

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*)

Abstract: The plain areas of northwest inland basins have few precipitation and strong evaporation. In recent 50 years, the area of natural oases in the lower reaches of each basin has been shrinking. The Shiyang River Basin and the Aiding Lake Basin are taken as the research areas, and the main causes and mechanism for natural oasis

收稿日期: 2022-03-15; 修订日期: 2022-04-23

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0406100); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221773-04)

第一作者: 张光辉(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 国家重点研发计划项目主持人, 从事水循环与水土资源合理开发保护研究。

E-mail: Huanjing59@163.com

degeneration in the downstream areas are examined in this paper. Based on the investigation of farmland areas, surface runoff from the mountains and its irrigation reference water, groundwater exploitation and surface runoff flowing into the downstream areas, in-situ monitoring of shallow groundwater level depth and soil moisture physical indexes in the vadose zone, unified measurement of groundwater levels, and the type and distribution range of natural vegetation based on the data obtained from remote sensing interpretation such as coverage and NDVI index, the above problems are studied by using the theory of watershed water cycle and water balance, time series analysis and geoscience multiple correlation analysis methods. The results show that (1) the root cause of the serious degradation of the natural oases in the lower reaches of northwest inland watersheds in recent 50 years is the lack of natural water resources, the main reason are the continuous increase of population and the large-scale diversion of surface runoff from mountains in the middle reaches. (2) The continuous expansion of irrigated cultivated land is the main driving factor for the shrinkage of the natural oasis area in the lower reaches. Every increase of 1.0 km² of irrigated cultivated land leads to the reduction of the natural oasis area in the lower reaches of the Shiyang River Basin and the plain area of the Aiding Lake Basin, which are 1.35–2.07 km² and 1.57–3.83 km², respectively. The drier the climate is, the less the annual runoff from the mountains in the upstream is, the greater the ratio of the runoff from the mountains blocked by irrigated farmland to the total runoff in the current year, and the less the surface runoff flowing into the downstream areas, resulting in the greater reduction of the area of natural oases in the downstream areas. (3) The degradation of natural oases in the northwest inland basins is controllable, but it is restricted by the lack of water resources. Under the background of lack of water resources, the scale of farmland water use driven by the current population is difficult to reduce. It is necessary to orderly promote the harmony between the scale of economic and social water use and the scale of natural oasis restoration and water supply. Therefore, the results of this study may provide an important scientific basis for the rational development and utilization of water resources and the restoration of natural oasis degradation in northwest China.

Keywords: northwest inland basin; natural oasis; irrigated farmland; degree of drought; main causes and mechanisms of degeneration

自 20 世纪 80 年代初以来,我国西北内陆许多流域下游区自然湿地和天然植被分布范围(简称“天然绿洲”,下同)不断萎缩,自然生态环境严重退化^[1-6]。为了修复和保护生态环境,亟需研究影响该地区生态环境的主要因素与作用机制^[1,5,7-12]。在西北内陆流域下游区,降水稀少、蒸发强烈,天然绿洲生态对地下水生态功能具有强烈的依赖性^[8-21]。因此,本研究对西北内陆流域天然绿洲退化修复与生态保护具有重要意义。

有关西北内陆区天然绿洲退化问题研究较多^[2-4,7-14,22-28],但基于天然绿洲与灌溉耕地规模之间互动关系,以及依据流域水循环演变及水资源承载力探讨干旱区天然绿洲退变主因与机制研究较少^[2,23]。本文依托国家重点研发计划项目“我国西部特殊地貌区地下水开发利用与生态功能保护”(2017—2021)的资料和研究基础,以典型流域为研究区,开展相关研究。

1 研究区概况

研究区为极度干旱的艾丁湖流域和干旱半干旱的石羊河流域,具有西北内陆主要流域的共性特点。西北内陆区多为内流盆地,包括甘肃河西走廊、新疆准噶尔盆地、塔里木盆地和青海柴达木盆地,这些盆地周围矗立着如天山、祁连山和阿尔金山等高大山系,造成盆地内年降水量仅 50~200 mm、年蒸发量高达 2 000~3 500 mm。高大山系拦截了大气流中水汽,导致上游山区年降水量达 400~600 mm,由此形成自上游山区至下游平原(盆地)的半湿润、半干旱至干旱的明显干湿分带性,下游区自然生态环境极为脆弱,主要依赖上、中游区下泄地表径流量;在上、下游之间的中游区是灌溉耕地(人工绿洲)、人口和经济社会主要聚集区域,该区生活、生产用水规模对下游区生态水源影响占主导地位,由此下游区天然绿洲生态对当地地下水生态功能(水位埋深)形成强烈依赖性。

艾丁湖流域位于新疆维吾尔自治区东部的吐鲁番盆地,流域面积 $5.30 \times 10^4 \text{ km}^2$,平原区是夏季全国最热地区,年内最高气温 $49 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,日照达 $3\ 000 \text{ h}$,年降水量不足 30 mm ,本区为世界最大范围的野生阔叶

骆驼刺生长地。该流域年均天然水资源量为 $11.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、地下水资源量为 $5.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,年总用水量曾达 $14.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中地下水年开采量达 $9.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,年灌溉用水量占年总用水量的 92.3% (表 1)。

表 1 研究区自然环境与耕地和水资源开发利用概况

Table 1 Overview of natural environment and utilization of cultivated land and water resources in the study area

研究区	时段	研究区面积 / 10^4 km^2	年均降水量 /mm	人口数量 /万人	耕地面积 / km^2	下游湿地水域 面积/ km^2	天然水资源量/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)		用水量/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)		农业用水量	
							总量	地下水	总量	开采量	占总用水量比率/%	单位面积灌溉量 /($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)
艾丁湖流域	1960以前	5.30	<30	28	433.5	>100	11.1	5.4	9.89	0.58	66.7	129.9
	2010之后			67	1 280.6	<20			14.79	9.69	92.3	102.0 ~ 118.2
石羊河流域	1960以前	4.16	220	92	1 334.0	>50	16.6	6.9	8.12	1.85	48.9	60.9
	2010之后			230	5 081.5	<20			27.92	13.83	87.2	64.5 ~ 77.4

石羊河流域位于甘肃省河西走廊的东部、祁连山北麓,流域平原区面积为 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$,下游民勤盆地年降水量不足 150 mm 。该流域年均天然水资源量为 $16.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、年均地下水资源量为 $6.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,年总用水量曾达 $27.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中地下水年开采量达 $13.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,年灌溉用水量占年总用水量的 87.2% (表 1)。

2个流域的下游区都分布有重要自然湿地,分别为艾丁湖湿地和青土湖湿地。在 20 世纪 60 年代之前,2个湿地的水域面积都显著大于目前水域面积(表 1),并且流域下游平原大部分区域的潜水位埋深小于 5 m ,一些区域土壤盐渍化严重。目前,2个流域平原大部分区域的潜水位埋深大于 15 m ,远大于旱区天然植被绿洲适宜生态水位(埋深 $2 \sim 5 \text{ m}$)的深度。

2 数据与方法

本次研究数据是基于国家重点研发计划项目(2017YFC0406100)的相关资料,包括灌溉耕地面积、出山地表径流量及灌溉引用水量、地下水开采量和流入下游区地表径流量调查统计、潜水位埋深及包气带水理指标原位监测和地下水水位统测,以及植被类型、分布范围、覆盖度和 NDVI 指数等遥感解译获得的数据及资料。其中,生态数据是基于样方调查、监测和高分辨遥感解译获得,原始数据源为 Landsat MSS/TM/ETM/OLI 数据,GF1/2、Google Earth 数据作为补充。本次研究的生态数据是采用 1970 年以来逐年 5—10 月遥感数据进行辐射校正、正射校正、图像增强处理和数据融合等多层次筛选,辅以 GIS 技术和表面能量平衡模型处理得到的(表 2)。

本研究主要应用流域水循环和水量均衡理论,采

用时间序列分析法和地学多元相关分析方法,包括湿地水域面积、天然植被绿洲面积与灌溉耕地面积、用水量、开采量、地下水水位埋深和气象因子之间相关性识别。

表 2 遥感解译研究区地表生态基本分类特征

Table 2 Basic characteristics of ecological remote sensing interpretation content classification in the study area

生态区类型			属性基本特征	
一级	二级	三级		
自然 绿洲	天然 林地	有林地	郁闭度大于30%的天然林,成片或沿河带状分布	
		灌木林地	郁闭度大于40%、高度2 m以下的矮林地及灌丛林地	
		疏林地	郁闭度10% ~ 30%的稀疏林地	
		其它林地	未成林地	
	天然 草地	高覆盖度 草地	覆盖度大于50%的草地,多分布于河流或湖泊周围	
		中覆盖度 草地	覆盖度20% ~ 50%的草地,多分布于河流或湖泊周围	
		低覆盖度 草地	覆盖度4% ~ 20%的草地	
	水域 湿地	河道带 湖泊、沼 泽	天然河流,人类活动影响较少 天然湖泊,季节性积水或常年积水,生长湿生植被的土地	
	人工 绿洲	耕地	水田	常年灌溉,种植水稻等水生农作物的土地
			水浇地	有水源和灌溉设施,能正常灌溉的土地
旱地			无灌溉水源和设施的农田	
建设 用地		城镇、农村居民点、工矿和人工公园等景观用地		
未利用地		无人类活动、植被覆盖率小于4%的土地,包括戈壁荒漠、沙漠等		

3 结果与分析

3.1 地下水开发利用与天然绿洲退变情势

自 20 世纪 60 年代石羊河流域开始大规模开采地下水以来,随着中游区水资源开发利用规模不断扩

大,该流域中、下游平原区地下水水位不断下降,导致山前溢出带泉水流量不断衰减,造成引泉水灌区被迫不断增加开采井和开采水量,以弥补灌溉水源不足。该流域地下水开采量由 1965 年的 $1.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,增大到 1977 年的 $6.76 \times 10^8 \text{ m}^3$,至 21 世纪初期达 $13.83 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,中、下游区地下水水位年均降幅曾达 1.20 m 以上。中游武威盆地的金羊、清源、环河和吴家井灌区 10%~30% 的固沙植被枯亡,下游区天然生长的胡杨林成片死亡,青土湖湿地水域多次干涸。重度沙化面积由 329.4 km^2 增至 419.4 km^2 ,中度沙化面积增大 $1\,121.5 \text{ km}^2$ 。

在艾丁湖流域,20 世纪 50 年代前人口数量不足 30 万,灌溉耕地面积不足 270 km^2 ,灌溉用水量为 $4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,当时艾丁湖湿地的水域面积尚存 150 km^2 以上。20 世纪 60 年代该流域人口数量突破 30 万,灌溉面积扩大为 600 km^2 以上,地表水引水量明显增大;在 1968—1985 年期间,该流域人口数量达 44.2 万,灌溉面积扩大至 660 km^2 以上,地表水开始无法满足灌溉用水需求,由此成井 3 400 多眼,年开采量 $1.76 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1989 年艾丁湖湿地的水域面积缩减至 11 km^2 。1994—2008 年期间正值西部大开发政策实施,艾丁湖流域人口数量增至 57 万以上,耕地面积大于 $1\,200 \text{ km}^2$,地下水开采量由 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 激增到 $9.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 以上,取水深度由 60~80 m 延深至 120~150 m,由此该流域平原全区地下水水位的年均降幅达 0.64 m。天然绿洲区潜水位埋深明显大于适宜生态水位深度,造成该流域拥有的疏叶骆驼刺生长范围由 20 世纪 80 年代的

$1\,467 \text{ km}^2$ 减至目前的 $1\,068 \text{ km}^2$,2010 年前后艾丁湖湿地频繁干涸。

综合研究表明,西北内陆流域下游区天然绿洲生态情势对地下水生态功能(水位埋深)具有强烈依赖性。根据 1970 年以来研究区天然绿洲类型和范围逐月遥感解译、2017—2021 年期间的每年 6—8 月该区生态样方调查和监测数据,建立 6—8 月期间 NDVI 值、植被覆盖度和物种数量和地下水生态功能维系天然植被能力与潜水位埋深之间的关系,见表 3 和图 1。研究表明,在潜水位埋深长期大于极限生态水位(深度)条件下,自然湿地和天然植被绿洲生态逐渐退化:①在水位埋深 5~7 m 条件下,对地下水埋深依赖性较强的多数草本、灌木和乔木生态状况处于“较差”、甚至凋萎,天然植被的物种数量少于 5 种,且生长状态不佳,陆表生态 NDVI 指数小于 0.25,植被覆盖度低于 50%;当潜水水位回升时,上述退化的天然植被生态状态能自行逐步恢复。②在水位埋深 7~10 m 条件

表 3 西北内陆干旱区地下水生态功能退变程度的识别指标体系

Table 3 Identification index of degradation degree of groundwater ecological function in the northwest China inland area

识别指标	地下水生态功能不同状态下天然绿洲生态效应				
	正常	渐变	质变	灾变	
地下水水位埋深/m	2~5	5~7	7~10	≥10	
陆表生态状况	良好	轻度恶化	中度恶化	重度恶化	
陆表生态退变指标	NDVI指数	≥0.25	0.13~0.25	0.08~0.13	<0.08
	物种数量/种	≥5	3~5	2~3	<2
	植被覆盖度/%	≥50	35~50	10~35	<10

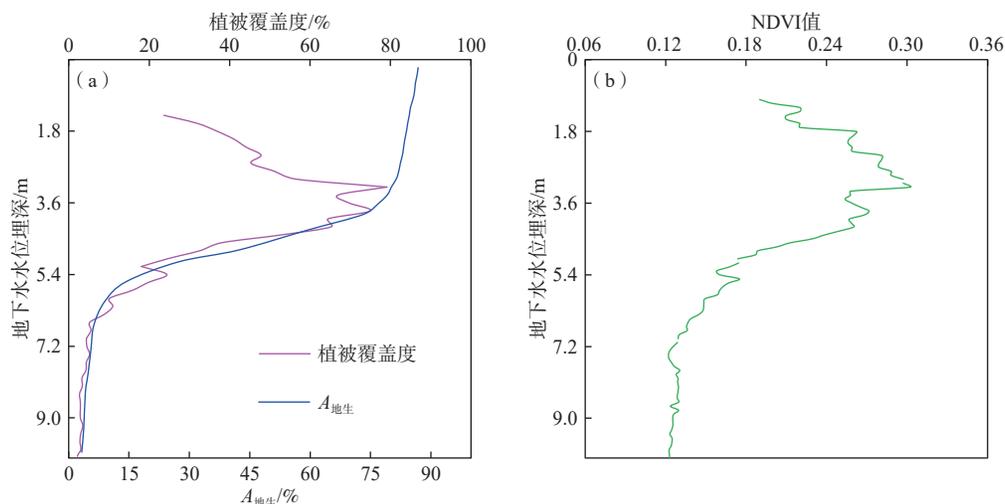


图 1 干旱区下游天然植被覆盖度、NDVI 值及地下水维系植被生态能力 ($A_{地生}$) 与潜水位埋深之间关系

Fig. 1 Relationship between natural vegetation coverage, NDVI value, groundwater transmission-supply capacity to surface soil ($A_{地生}$) and shallow groundwater level depth in the lower reaches of the arid area

注: $A_{地生}$ 为旱区潜水通过支持毛细作用供给天然植被吸用水量占样方内单位时间天然植被群落正常生长所需总水量的比值/%。

下, 大多数天然植被凋萎死亡, 梭梭及白刺等旱生植被零星分布, NDVI 指数小于 0.13, 植被覆盖度小于 35%, 物种数量小于 3; 当潜水水位恢复至“适宜生态水位”域(埋深 2~5 m)之后, 天然植被生态恢复需要人工撒种干预, 否则, 短期难以恢复天然植被生态景观。③当水位埋深大于 10 m 时, 绝大多数荒漠植被已死亡, NDVI 指数小于 0.08, 植被覆盖度不大于 10%, 物种数量小于 2, 地表多已荒漠化或沙化; 在地下水生态功能已发生“灾变”的区域, 即使人工撒种, 短时期内也难以恢复原有生态^[2, 29]。④当水位埋深小于 2 m 时, 随着潜水水位不断上升, 因土壤盐渍化程度加重, 天然植被覆盖度不断降低^[8-10]。

3.2 不同干旱区天然绿洲规模退变特征

3.2.1 石羊河流域下游区天然绿洲退变特征

近 40 a 来, 随着石羊河流域平原区灌溉耕地面积不断扩大, 流域下游区天然绿洲面积不断萎缩(图 2)。根据遥感解译结果, 相对 1970 年, 2019 年该流域耕地面积增加 1 200 km², 同期天然绿洲面积减少 1 850 km²。通过下游区天然绿洲面积与石羊河流域中游区耕地

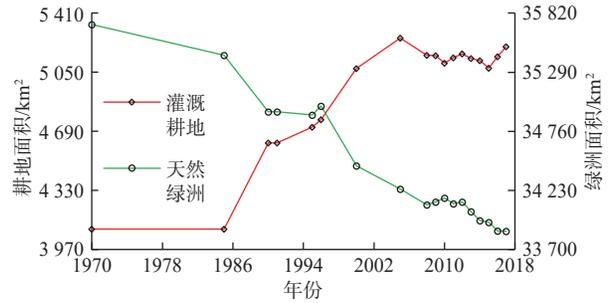


图 2 1970 年以来石羊河流域平原区耕地面积和天然绿洲面积年际变化特征

Fig. 2 Variation of the cultivated land area and natural oasis area in the plain area of the Shiyang River Basin since 1970

面积、灌溉水量和地下水开采量之间相关关系可见(图 3), 天然绿洲面积不断减小与该流域中游区耕地面积、灌溉水量和地下水开采量不断增大之间呈显著负相关。其中灌溉水量和地下水开采量不断增大的驱动力是灌溉面积不断扩大。由此表明, 灌溉耕地规模扩大是该流域下游区天然绿洲面积不断萎缩的主要驱动因素, 因为灌溉耕地面积不断扩大, 需要不断增加拦用出山地表径流量以满足灌溉用水(图 4)。

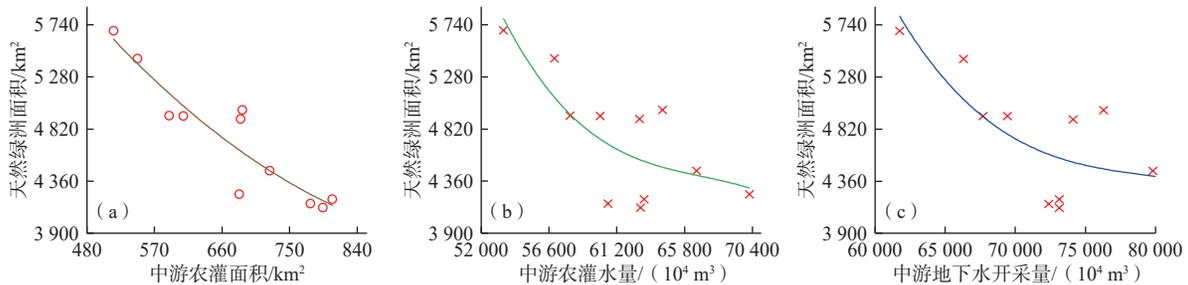


图 3 石羊河流域下游天然绿洲萎缩与中游区农灌面积、水量和地下水开采量之间相关关系

Fig. 3 Correlation between the shrinkage of the natural oasis area in the lower reaches of the Shiyang River Basin and the agricultural irrigation area, water volume and groundwater exploitation in the middle reaches

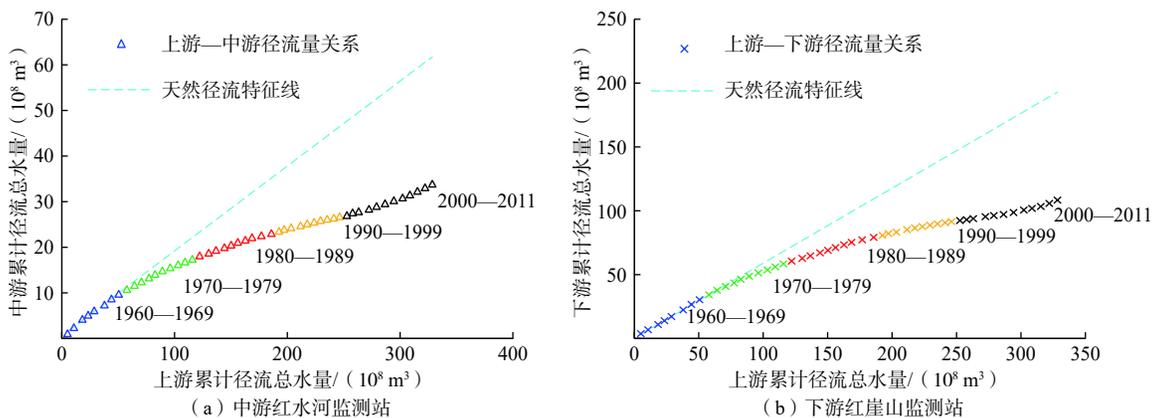


图 4 石羊河流域上游大规模拦蓄出山地表径流对中、下游区地表径流来水量影响状况

Fig. 4 Impact of large-scale storage of mountain surface runoff in the upper reaches of the Shiyang River Basin on the inflow of surface runoff in the middle and lower reaches

中游区灌溉用水主要拦引上游出山地表径流量,石羊河流域 90% 以上出山径流水量被水库拦蓄,导致自然流入中、下游平原区的地表径流量趋势性衰减,见图 4。该流域中游区灌溉用水不仅长期大量挤占下游区天然绿洲生态水量,还大幅减少了下游区地下水补给水量,致使下游区灌溉用水逐年加大地下水开采量,造成下游区地下水水位埋深不断增大,以

及地下水生态功能长期失去维系天然绿洲作用。

20 世纪 60 年代初,石羊河流域下游区潜水位埋深尚处于天然植被“适宜生态水位”(埋深<5.0 m),但至 2019 年该区绝大部分区域潜水水位已下降至“极限生态水位”(埋深 10 m)之下(图 5),地下水生态功能处于“灾变”状态(表 3),下游原天然绿洲现已退变为许多成片的荒漠化景观。

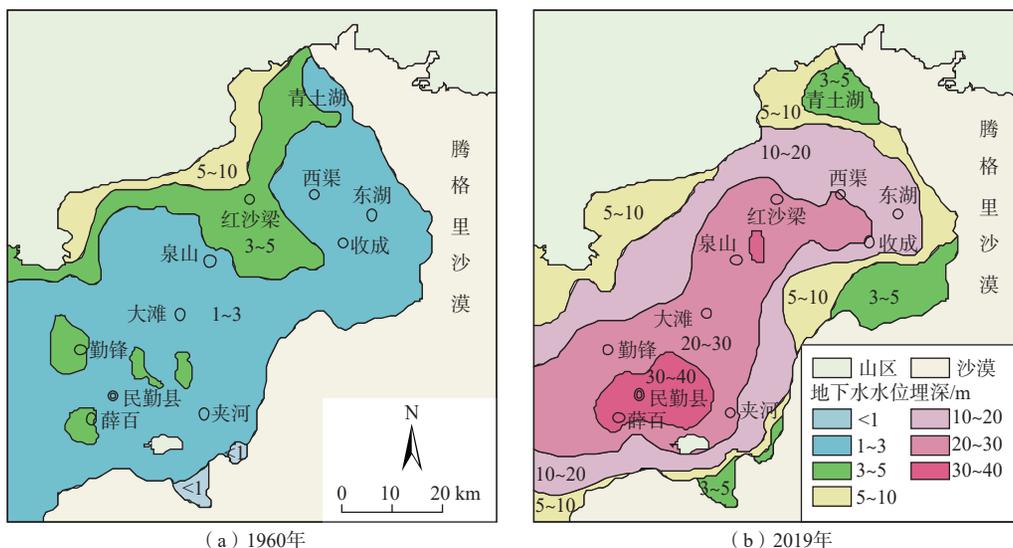


图 5 1960 年和 2019 年石羊河流域下游区地下水水位埋深分布特征

Fig. 5 Characteristics of depth of groundwater levels in the lower reaches of the Shiyang River Basin in 1960 and 2019

3.2.2 艾丁湖流域平原区天然绿洲退变特征

1976 年,艾丁湖流域平原区天然植被绿洲面积 2 110 km², 2010 年减少至 1 058 km²,原因是上游的人工绿洲区地下水超采程度不断加剧,平原区地下水水位不断下降,同时,流入天然绿洲区的地表径流量不断减少。自 2010 年开始治理以来,至 2019 年艾丁湖流域平原区天然植被绿洲面积由 1 058 km² 恢复至 1 428 km²。

天然绿洲面积与人工绿洲面积之比值(A_{nr})能表征天然绿洲面积随人工绿洲(农田)规模增减而呈现的趋势性变化特征。当 A_{nr} 值由小变大时,天然绿洲面积处于不断修复过程;当 A_{nr} 值由大变小时,天然绿洲面积处于不断萎缩和退化过程。

1976—1990 年期间,艾丁湖流域人工绿洲面积大幅扩大, A_{nr} 值由 1976 年的 4.74 减小至 1990 年的 1.78,同期的地下水开采量显著增大,随之天然绿洲面积大幅萎缩;1990—2010 年期间,该流域人工绿洲面积小幅增加, A_{nr} 值由 1990 年的 1.78 减小至 2010 年的 1.36,同期地下水开采量由不足 3×10^8 m³/a 增大至 9×10^8 m³/a 以上,天然绿洲面积进一步萎缩。2010—2015

年期间,艾丁湖流域人工绿洲面积小幅减少, A_{nr} 值则由 2010 年的 1.36 增大至 2015 年的 1.49,同期地下水开采量明显减少,天然绿洲面积增大;2015—2019 年期间,该流域人工绿洲面积显著减少, A_{nr} 值则由 2015 年的 1.49 增大至 2019 年的 2.23(图 6),同期地下水开采量呈趋势性减少(图 7),天然绿洲面积明显增大。

相对 1976 年,至 2019 年艾丁湖流域人工绿洲面积增加 196 km²,天然绿洲面积减少 682 km²,呈现每增

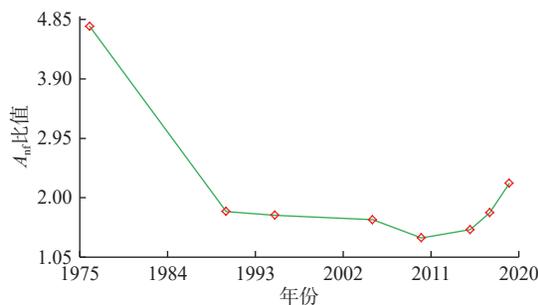


图 6 近 40 a 来艾丁湖流域天然绿洲与人工绿洲面积比值 (A_{nr}) 变化过程

Fig. 6 Change process of the area ratio (A_{nr}) between the natural oasis and artificial oasis in the Aiding Lake Basin in recent 40 years

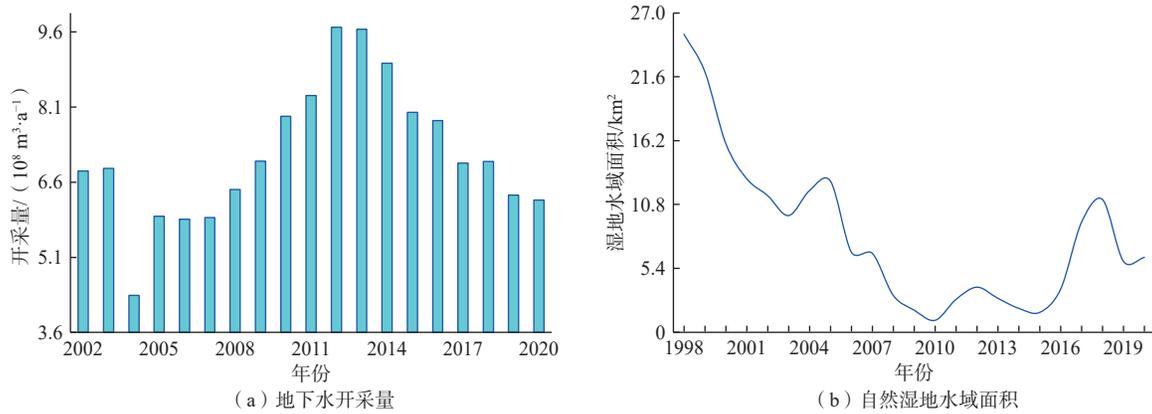


图7 艾丁湖流域自然湿地水域面积与地下水开采量演变特征

Fig. 7 Evolution characteristics of water area of the natural wetland and groundwater exploitation in the Aiding Lake Basin

加 1.0 km^2 人工绿洲面积,天然绿洲面积减少 $1.57 \sim 3.83 \text{ km}^2$ 的相关特征。2010年为转折点,呈现出人工绿洲面积开始减少、天然绿洲面积呈恢复性扩大的特征。

艾丁湖流域下游区自然湿地的水域面积呈现出类似 A_{nr} 值演变特征,见图7(b),其中2005—2010年期间该湿地的水域面积进一步萎缩,年均水域面积仅 4.2 km^2 ;2010年以来艾丁湖流域实施了退地和高效节水灌溉等治理措施,灌溉用水总量逐年减少,湿地的水域面积呈现波动恢复过程,由2011—2015年的年均 2.8 km^2 恢复至2016—2018年的年均 8.4 km^2 ,期间的地下水开采量也呈现逐年减少趋势,见图7(a)。

3.3 旱区天然绿洲退变机制与主导因素

研究区天然绿洲退化与灌溉耕地规模过大、水资源长期大规模超用和地下水严重超采等人类活动密切相关。由于西北内陆独特的地理环境和气候条件,决定了“没有灌溉,就没有农业”。随着灌溉耕地面积不断扩大,西北内陆流域上游出山地表径流量被上游区水库大规模拦蓄和供给中游区灌溉,有限的天然地表水资源难以满足不断扩大的灌区需水量,唯有不断加大地下水开采,缓解灌溉水源不足的问题。与此同时,由于出山地表径流量被大规模拦蓄和直接引入中游灌区,加之农田灌溉利用系数不断提高,致使中、下游平原区地下水补给水量不断减少,诸多因素叠加影响下,中、下游平原区地下水水位不断大幅下降,造成潜水位埋深长期大于天然绿洲的“适宜生态水位”,甚至大于“极限生态水位”深度(10 m),进而引发下游区地下水生态功能严重退变,导致自然湿地干涸、天然植被消亡和土地荒漠化加剧。因此,灌溉耕地面积不断扩大是西北内陆流域下游区天然绿洲

退变的主要驱动因素,见图8。

西北内陆流域气候干旱、天然水资源匮乏是根本原因。在有限天然水资源背景下,西北内陆各流域人口数量不断增长,必然促使粮蔬生产所必需的农田规模不断扩大,由此超过当地水资源承载力的人口所必需的用水量只能挤占原属下游区生态水(图8)。李相虎^[29]研究认为,石羊河流域多年平均水资源量的适宜承载人口数为30万人,但凡超过30万人的历史时期该流域下游区天然绿洲规模都出现不同程度萎缩。目前,该流域人口数量已超过200万人。

天然水资源匮乏限制着西北内陆各流域人口数量和灌溉耕地规模不宜过大,否则,不仅灌溉用水大规模挤占下游区天然绿洲生态水量,导致天然绿洲面积大幅萎缩,而且,还会出现枯水年灌溉用水没有足够出山地表水供给保障,唯有大规模抽取平原区地下水储存资源,加剧地下水水位下降,致使地下水生态功能较长时期处于灾变状态,以及天然绿洲生态退化进一步加剧。

在西北内陆流域,上游水资源形成区降水丰-平-枯的年际变化直接影响出山地表径流量的多寡,对灌溉耕地面积扩大挤占下游生态水量的程度具有直接影响。该背景下天然绿洲面积(S_{oa})与灌溉耕地面积(S_{is})及人口数量(N_p)和上游区年均降水量(P)的关系为:

$$S_{oa} = S_n - \omega_{PR} S_{is} (N_p, P) \quad (1)$$

式中: S_n ——没有灌溉耕地背景下研究区天然绿洲面积/ km^2 ;

ω_{PR} ——研究区年均降水量与人口数量耦合对灌溉耕地面积扩大导致天然绿洲面积减少的影响系数。

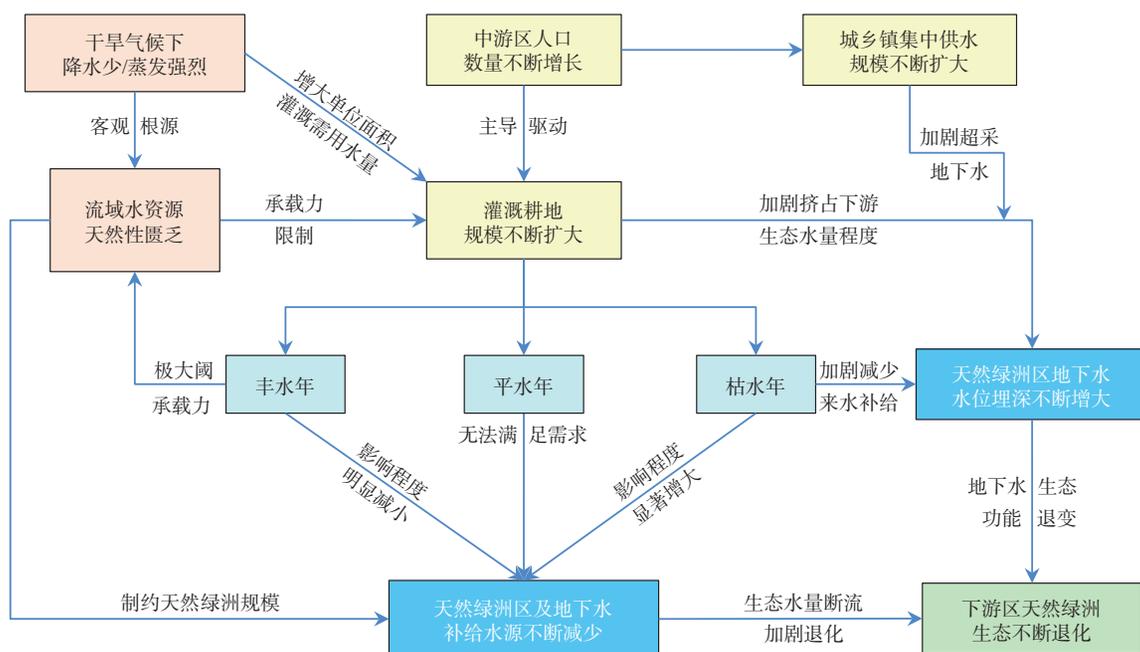


图 8 西北内陆流域下游区天然绿洲退变形成与演变机制

Fig. 8 Evolution mechanism of the natural oasis degeneration in the lower reaches of northwest inland basins

由式(1)可见,西北内陆流域平原区灌溉耕地面积不断扩大,主导下游区天然绿洲退化的程度,与气候干旱程度和人口数量多少相关:上游区年降水量越小、流域人均天然水资源量越少, ω_{PR} 值越大,即每增加 1.0 km^2 的灌溉耕地面积导致天然绿洲减少面积越大,见表 4 和图 9(a)。在流域年降水量较大的石羊河流域平原区,每增加 1.0 km^2 灌溉耕地,天然绿洲面积减少 $1.35 \sim 2.07 \text{ km}^2$,其中降水偏丰水期的 ω_{PR} 趋于 1.35、偏枯水期的 ω_{PR} 值趋于 2.07,见图 9(b);在年降水量不足 30 mm 的艾丁湖流域平原区,每增加 1.0 km^2 灌溉耕地,天然绿洲面积减少 $1.57 \sim 3.83 \text{ km}^2$,其中上游区降水偏丰水期的 ω_{PR} 值趋于 1.57、偏枯水期的 ω_{PR} 值趋于 3.83。因为气候越干旱、上游年降水量越小,

出山地表径流量越少,由此增加单位面积灌溉耕地用水挤占生态水量的比率越高。年降水量较大的石羊河流域耕地的年灌溉水量为 $64.5 \times 10^4 \sim 77.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,

表 4 不同干旱程度下西北内陆典型流域平原区天然绿洲随灌溉耕地面积增减的变化幅度

Table 4 Variation range of the natural oases in the plain areas of the typical inland basins in northwest China with the increase or decrease of the irrigated farmland under different drought degrees

研究区	年降水量/mm	不同水文年下增减单位面积耕地引发的天然绿洲增减幅度/ km^2			灌溉水量/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$
		丰水年	多年平均	枯水年	
艾丁湖流域	<30	1.57	2.83	3.83	102.0 ~ 118.2
石羊河流域	220	1.35	1.54	2.07	64.5 ~ 77.4

注:表中数据是基于图9等相关分析得到。

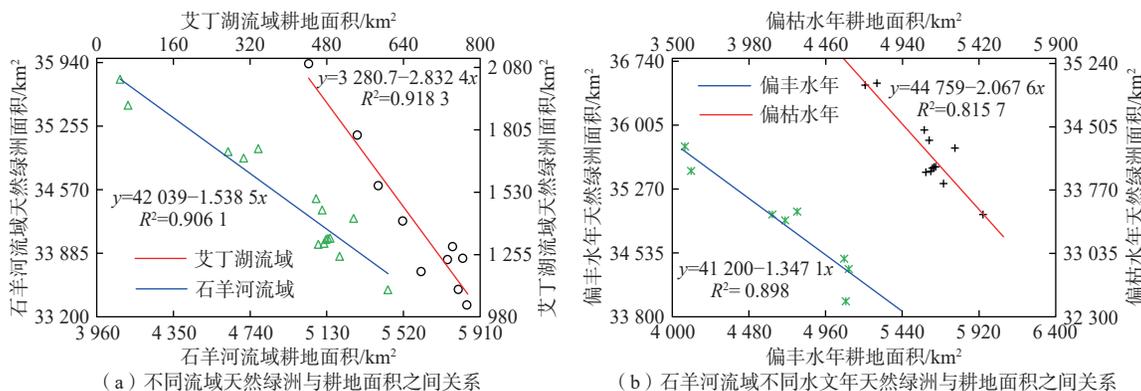


图 9 西北内陆典型流域平原区天然绿洲面积与耕地面积之间相关性特征

Fig. 9 Relationship between the natural oasis area and cultivated land area in the typical inland plain areas of northwest China

极度干旱的艾丁湖流域平原区年灌溉水量为 $102.0 \times 10^4 \sim 118.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 是石羊河流域单位面积灌溉用水定额的 1.55 倍。因此, 艾丁湖流域的 ω_{PR} 值明显大于石羊河流域的 ω_{PR} 值, 见表 4 和图 9(a)。

4 结论

(1) 灌溉耕地面积不断扩大是西北内陆流域下游区天然绿洲萎缩的主要驱动因素, 通过大规模拦用上游出山地表径流量, 挤占下游区天然绿洲生态水量和地下水补给水量, 加剧下游区地下水生态功能退变和天然绿洲退化情势。

(2) 近 50 a 来不断增加的人口数量和干旱的气候是驱动西北内陆流域灌溉耕地影响下游区天然绿洲萎缩的不可忽视因素。灌溉耕地增加, 上游区年降水量和出山地表径流量越少, 天然绿洲减少的面积越大。每增加 1.0 km^2 灌溉耕地, 丰水年石羊河流域下游、艾丁湖流域平原区的天然绿洲减少面积分别为 $1.35, 1.57 \text{ km}^2$; 枯水年 2 个流域天然绿洲减少面积分别为 $2.07, 3.83 \text{ km}^2$ 。

(3) 西北内陆流域下游区天然绿洲退化可控、但具有有限性。在水资源匮乏和现状人口数量背景下, 继续大幅调减粮蔬生产所必需的用水规模具有较大难控性, 只能分阶段、有序促进经济社会用水规模与天然绿洲修复供水规模之间和谐度并使其逐渐提高, 且天然绿洲修复规模应以必需、极小需水量为规划基点, 逐步实现生态文明与安全优先的建设目标。

参考文献 (References) :

- [1] 王浩, 秦大庸, 王研, 等. 西北内陆干旱区生态环境及其演变趋势 [J]. 水利学报, 2004, 35(8): 8 - 14. [WANG Hao, QIN Dayong, WANG Yan, et al. Ecological status and its evolution trend in arid region of northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(8): 8 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张光辉, 聂振龙, 崔浩浩, 等. 西北内陆干旱区地下水合理开发及生态功能保护理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2022. [ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, CUI Haohao, et al. Theory and practice of groundwater rational development and ecological function protection in inland arid area of Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)]
- [3] 郑跃军, 邢丽霞, 魏玉涛. 西北内陆城镇化对下游水生态环境的影响研究: 以石羊河流域为例 [J]. 人民长江, 2014, 45(9): 81 - 84. [ZHENG Yuejun, XING Lixia, WEI Yutao. Influences of urbanization of inland river basins in northwest China on downstream water resources and ecological environment: A case of Shiyang River Basin [J]. Yangtze River, 2014, 45(9): 81 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应 [J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108 - 1118. [LI Lili, WANG Dawei, HAN Tao. Spatial-temporal dynamics of vegetation coverage and responding to climate change in Shiyang River Basin during 2000—2015 [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 1108 - 1118. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王玉宝, 刘显, 史利洁, 等. 西北地区水资源与食物安全可持续发展研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 38 - 44. [WANG Yubao, LIU Xian, SHI Lijie, et al. Sustainable development of water resources and food security in northwest China [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 38 - 44. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ANTUNES C, CHOZAS S, WEST J, et al. Groundwater drawdown drives ecophysiological adjustments of woody vegetation in a semi-arid coastal ecosystem [J]. Global Change Biology, 2018, 24(10): 4894 - 4908.
- [7] 刘金鹏, 费良军, 南忠仁, 等. 基于生态安全的干旱区绿洲生态需水研究 [J]. 水利学报, 2010, 41(2): 226 - 232. [LIU Jinpeng, FEI Liangjun, NAN Zhongren, et al. Study on ecological water requirement of the arid area oasis based on the theory of ecological security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 226 - 232. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 25 - 33. [CAO Le, NIE Zhenlong, LIU Min, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin oasis in the Shiyang River Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 25 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 金晓媚. 黑河下游额济纳绿洲荒漠植被与地下水埋深的定量关系 [J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 181 - 186. [JIN Xiaomei. Quantitative relationship between the desert vegetation and groundwater depth in Ejina Oasis, the Heihe River Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 181 - 186. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王金哲, 张光辉, 王茜, 等. 西北干旱区地下水生态功能评价指标体系构建与应用 [J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1573 - 1581. [WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui,

- WANG Qian, et al. Construction and application of evaluation index system of groundwater ecological function in northwest arid area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1573 – 1581. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王金哲, 张光辉, 严明疆, 等. 干旱区地下水功能评价与区划体系指标权重解析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 133 – 143. [WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, YAN Mingjiang, et al. Index weight analysis of groundwater function evaluation and zoning system in arid areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(22): 133 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(3): 377 – 387. [LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on eco-hydrological threshold regulation in inland arid region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(3): 377 – 387. (in Chinese with English abstract)]
- [13] HUANG F, CHUNYU X Z, ZHANG D R, et al. A framework to assess the impact of ecological water conveyance on groundwater-dependent terrestrial ecosystems in arid inland river basins[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136155.
- [14] CUI H H, ZHANG G H, WANG J Z, et al. Influence of multi-layered structure of vadose zone on ecological effect of groundwater in arid area: A case study of Shiyang River Basin, northwest China[J]. *Water*, 2021, 14(1): 59.
- [15] 高超, 赵军, 王玉纯, 等. 石羊河流域自然植被对生态系统服务的约束效应[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 2851 – 2862. [GAO Chao, ZHAO Jun, WANG Yuchun, et al. Study on the constraint effect of natural vegetation on ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2851 – 2862. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LIU M, NIE Z L, CAO L, et al. Comprehensive evaluation on the ecological function of groundwater in the Shiyang River watershed[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(4): 326 – 340.
- [17] LIU J T, SUN J C, ZHU L, et al. Analysis of groundwater environmental conditions and influencing factors in typical city in northwest China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2013, 1(2): 60 – 73.
- [18] ZHANG C C, LI X Q, GAO M, et al. Exploitation of groundwater resources and protection of wetland in the Yuqia Basin[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2017, 5(3): 222 – 234.
- [19] HUANG F, OCHOA C G, CHEN X, et al. Modeling oasis dynamics driven by ecological water diversion and implications for oasis restoration in arid endorheic basins[J]. *Journal Hydrogeology*, 2021, 593: 125774.
- [20] 刘深思, 徐贵青, 李彦, 等. 五种沙地灌木对地下水埋深变化的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 615 – 625. [LIU Shensi, XU Guiqing, LI Yan, et al. Difference and consistency of responses of five sandy shrubs to changes in groundwater level in the Hailiutu River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 615 – 625.]
- [21] FAN Y, MIGUEZ-MACHO G, JOBBÁGY E G, et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(40): 10572 – 10577.
- [22] 林玉英, 胡喜生, 邱荣祖, 等. 基于Landsat影像的NDVI对植被与影响因子交互耦合的响应[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 212 – 219. [LIN Yuying, HU Xisheng, QIU Rongzu, et al. Responses of landsat-based NDVI to interaction of vegetation and influencing factors[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 212 – 219. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 孙自永, 王俊友, 葛孟琰, 等. 基于水稳定同位素的地下水型陆地植被识别: 研究进展、面临挑战及未来研究展望[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 11 – 20. [SUN Ziyong, WANG Junyou, GE Mengyan, et al. Isotopic approaches to identify groundwater dependent terrestrial vegetation: Progress, challenges, and prospects for future research[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1): 11 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 齐子萱, 周金龙, 季彦桢, 等. 西北内陆盆地降水入渗补给季节性变化——以新疆昌吉地下水均衡试验场为例[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 12 – 20. [QI Zixuan, ZHOU Jinlong, JI Yanzhen, et al. Seasonal variation in recharge of infiltration from precipitation for the inland basins of northwestern China: Taking the Changji groundwater balance test station in Xinjiang as an example[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 12 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 等. 西北旱区潜在蒸散发的

- 气候敏感性及其干旱特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 20 – 30. [YIN Xiaowei, WU Yiping, ZHAO Wenzhi, et al. Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 20 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [26] BOYER A, HATAT-FRAILE M, PASSEPORT E. Biogeochemical controls on strontium fate at the sediment-water interface of two groundwater-fed wetlands with contrasting hydrologic regimes[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(15): 8365 – 8372.
- [27] HOSE G C, BAILEY J, STUMPP C, et al. Groundwater depth and topography correlate with vegetation structure of an upland peat swamp, Budderoo Plateau, NSW, Australia[J]. Ecohydrology, 2015, 7(5): 1392 – 1402.
- [28] SEN C, OZTURK O. The relationship between soil moisture and temperature vegetation on Kirklareli city Luleburgaz district a natural pasture vegetation[J]. International Journal of Environmental and Agriculture Research, 2017, 3(3): 21 – 29.
- [29] 李相虎. 石羊河流域2 ka来水资源演变及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 1 – 52. [LI Xianghu. Water resource evolution and its influencing factor during last 2000 years in the Shiyang River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006: 1 – 52. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳