



引文格式: 尹立河, 王平, 王田野, 等. 西北地区地下水依赖型植被生态水文过程研究进展与展望[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 16–30. DOI: 10.12401/j.nwg.2024057

Citation: YIN Lihe, WANG Ping, WANG Tianye, et al. Review on Eco-hydrological Processes of Groundwater-dependent Vegetation in NW China: Progress and Outlook[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 16–30. DOI: 10.12401/j.nwg.2024057

西北地区地下水依赖型植被生态水文过程 研究进展与展望

尹立河^{1,2}, 王平³, 王田野⁴, 乔冈^{1,2}, 马洪云^{1,2}, 张俊^{1,2}, 董佳秋^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710119; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 郑州大学, 河南 郑州 450001)

摘要: 植被与地下水之间的关系是人与自然和谐共生的关键科学问题。西北旱区广泛分布地下水依赖型植被, 部分地区人类活动造成的水位下降已超过其生态水位阈值, 导致生态功能受损, 甚至植被大面积枯死, 严重威胁区域经济社会可持续发展。笔者基于国内外在区域地下水依赖型植被的识别、生态韧性评价、植被-地下水协同演化以及地下水生态水位确定等 4 个方面的最新研究进展, 总结了当前研究存在的主要问题和亟待解决的难题, 并指出未来研究应当关注的重点方向。综合分析表明, 西北地区流域尺度地下水依赖型植被的识别研究相对较少, 而对识别结果进行地面验证的稳定同位素方法还需改进; 生态韧性研究多注重地表生态与环境指标, 而忽略了地下水、根系布等地下指标, 缺少基于抵抗力、恢复力和适应力的生态韧性综合评价, 以定性评价为主的研究不能满足生态保护修复的需要; 植被-地下水协同演化研究受限于不能精准探测根系变化, 根系动态探测技术及刻画根系-水源协同变化的模型有待进一步发展; 生态水位主要是基于现状条件确定的静态水位, 对受降水和地下水侧向补给影响下的水位变化空间差异以及植物自身适应性考虑不足, 还需研究外界条件改变下的动态生态水位。通过梳理西北地区地下水依赖型植被生态水文过程研究进展, 指出当前研究的薄弱研究环节和面临的问题, 为进一步开展西北旱区生态水文理论与实践提供了依据。

关键词: 地下水依赖型植被; 西北地区; 生态韧性; 生态水位; 植被与地下水相互作用

中图分类号: P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0016-15

Review on Eco-hydrological Processes of Groundwater-dependent Vegetation in NW China: Progress and Outlook

YIN Lihe^{1,2}, WANG Ping³, WANG Tianye⁴, QIAO Gang^{1,2}, MA Hongyun^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}, DONG Jiaqiu^{1,2}

(1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 4. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-06-06; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 第三次新疆综合科学考察(2022xjkk0300), 国家自然科学基金面上项目(42071042), 陕西省重点研发计划(2021ZDLSF05-01), 陕西省创新能力支持计划(2019TD-040)和中国地质调查局项目(DD20190351)联合资助。

作者简介: 尹立河(1977-), 男, 博士, 研究员, 主要从事旱区水文地质调查研究。E-mail: ylihe@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: The relationship between groundwater and vegetation is crucial to achieve a harmonious balance between human and the natural environment. Groundwater-dependent vegetation (GDV) is extensively distributed in the arid and semi-arid regions of Northwest China. In certain areas, the decline in water table levels due to human activities has fallen below ecological water level thresholds, leading to the degradation of ecological functions and, in some cases, widespread vegetation die-off. Therefore, the sustainable development of the region's economy and society is under significant threat. A comprehensive review was conducted concerning GDV mapping, ecological resilience assessment, groundwater-vegetation co-evolution, and ecological water table. Through this review, the main challenges and urgent issues that need to be addressed in current research have been summarized, and future research directions were outlined. The review revealed limited research on GDV mapping at the watershed scale in Northwest China, highlighting the need for further refinement on the stable isotope method for ground validation of mapping results. Current studies on resilience focus on surface ecology and ecological indicators overlook underground indicators, such as groundwater and root distribution, and lack a comprehensive evaluation based on resistance, recovery, and adaptability. Qualitative assessments of ecological resilience prevail in current research, falling short of meeting the requirements for effective ecological conservation and restoration. Challenges in researching the co-evolution of vegetation and groundwater arise from the difficulty in accurately detecting changes in root systems. Further studies are warranted to develop root detection methods and three-dimensional models for simulating the co-evolution of roots and water sources. Concerning ecological water tables, the focus remains on static water levels determined by current conditions, with insufficient consideration of spatial variations in precipitation and lateral groundwater flow as well as plant self-adaptation. Additional research is essential to establish dynamic ecological water levels under varying external conditions. This review aims to summarize the progress and future prospects of research on eco-hydrological processes of GDV, addressing the weak research areas. By doing so, it aims to provide a robust scientific foundation for further theoretical research and practical applications on eco-hydrology in NW China.

Keywords: groundwater-dependent vegetation; NW China; ecological resilience; ecological water table; vegetation-groundwater interactions

1 前言

中国西北地区包括陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆五省区以及内蒙古自治区西部,总面积约为 340 万 km^2 , 占中国国土面积的 35.4%。西北地区拥有三江源国家公园、若尔盖国家公园和祁连山国家公园,以及黄河重点生态区(含黄土高原生态屏障)、青藏高原生态屏障区、北方防沙带等重要生态功能区,发挥着孕育大江大河、影响季风界线、阻挡沙尘东进、滋养绿洲农业、调节水汽交换、改善局地气候的重要生态作用(冯起等, 2022; 计文化等, 2022)。同时,西北地区大多处于干旱—半干旱区,降水稀少,生态环境脆弱,局部地区受人类活动的影响生态问题突出。随着该地区“三北”防护林、退耕还林(草)等生态保护修复工程的实施,生态环境总体向好,但受水资源禀赋条

件限制,生态安全形势依然严峻(李文明等, 2022; 陈亚宁, 2023; 董建红等, 2023)。

西北地区是中国重要的农业生产功能区与矿产开发基地(焦继宗等, 2019; 冯玉新, 2019), 农业开发和矿产开采对水资源的影响大。近年来为保障国家粮食安全,西北地区耕地面积总体呈现增大趋势,地下水开发强度也随之增大,显著改变了区域水平衡状态(黄海潮等, 2022; 武文豪等, 2023)。如榆林地区近 20 年沙地区的耕地增加 2 330 km^2 (武文豪等, 2023),河西走廊的石羊河流域 1998 年以来耕地面积增加 490 km^2 (冯博等, 2020)。由于该区降水无法满足作物生长,随着耕地规模增加水资源开发强度也随之增大。如榆林地区 2020 年的工农业用水量比 2010 年增加 3.6 亿 m^3 (武文豪等, 2023), 1999~2019 年间黑河流域地下水使用量增加 4.2 亿 m^3 (赵文智等, 2023)。矿产开发对局域水均衡的强烈扰动也不容忽视。以煤炭行

业为例,中国每开采 1 t 煤平均产生 1~2 t 矿井水,某些矿区每年矿井排水量可高达数亿 m^3 (柴建禄, 2022; 易学睿等, 2023), 在煤化工产业中 1 t 煤气化过程大约需要消耗 7 t 水 (郭娜, 2019; 王金华, 2020), 煤炭开发利用引起部分地区地下水位年降幅最高达 20 m (柴建禄, 2022; 易学睿等, 2023)。由于西北地区地表水与地下水水力联系密切, 因此无论是地表水开发, 还是直接利用地下水, 过量开采都会引起地下水位下降。根据最新的水利部超采区划分结果, 西北地下水超采区面积达 6.9 万 km^2 (尹立河等, 2021; 党学亚等, 2022)。

西北地区广泛发育地下水依赖型生态系统, 植被与地下水存在密切的协同变化关系, 如鄂尔多斯高原的海流兔河流域 (Zhou et al., 2013; 金晓媚等, 2013; Yin et al., 2018; 董佳秋等, 2022)、河西走廊的黑河流域 (席海洋等, 2013; 陈小丽等, 2014; 刘树宝等, 2016a; Wang et al., 2022)、石羊河流域 (杨锦, 2018) 以及塔里木河流域 (万彦博等, 2022) 等。旱区地下水依赖型植被是由地下水维系的生态系统, 它所需的水分部分或全部由地下水提供, 具有较强的干旱适应性和重要的生态价值, 可以提供生物多样性维护、生物生产、径流和气候调节、荒漠化和盐渍化防治、水质净化等服务功能 (孙自永等, 2020)。在西北地区, 由于降水相对较少, 地带性荒漠植被十分稀疏, 而在地下水的稳定补给作用下, 非地带性地下水依赖型生态植被, 往往具有较高的覆盖度和生态功能 (贾利民等, 2015)。比如, 塔里木河流域生态补后地下水水位抬升, 近 20 年来植被覆盖度、归一化植被指数以及物种多样性 Simpson 指数等均呈上升趋势 (朱成刚等, 2021; 李福杰等, 2022), 在毛乌素沙地、新疆的喀什噶尔河流域地下水埋深与植被的关系中也能得出类似的结论 (王颖等, 2022; 贺军奇等, 2023)。

地下水位作为指示地下水储量、控制旱区土壤和潜水盐分的关键变量, 是决定植物与地下水协同演化的核心指标。地下水位下降会造成植被退化、生态功能受损 (Eamus et al., 2015; 刘鹄等, 2018; 王文科等, 2018; 王根绪等, 2021), 尤其对地下水依赖型植被的影响更为突出。20 世纪八九十年代, 由于西北内陆河流域水资源的不合理开发利用, 导致地下水位下降, 引起地下水依赖型植被退化甚至局部消亡, 严重影响了生态系统的功能和价值。例如, 位于内蒙古自治区鄂尔多斯市浩勒报吉水源地, 大规模开采地下水若干年后, 周边出现了湖泊湿地萎缩、乔木枯萎现, 对生态环

境产生了不利影响, 水源地因此被关闭 (王旭升等, 2019; 李若怡等, 2021)。西北地区类似的生态退化在 20 世纪更是比比皆是。例如, 民勤盆地地下水水位下降后, 沙枣林有 30 km^2 死亡、58 km^2 衰退 (马玉蕾等, 2013); 由于塔里木盆地水资源的开发强度增大, 最新的数据表明胡杨林的退化面积为 5416.67 km^2 , 占胡杨林面积的 48% (魏光辉等, 2023)。地下水失衡造成的生态系统退化也是全球旱区面临的普遍性问题 (Goulden et al., 2019; Callahan et al., 2022), 如美国的加州地区 (Kibler et al., 2021; Rohde et al., 2021)、西班牙东北部的 Middle Ebro 盆地 (Camarero et al., 2023) 等地区。

国内外学者在干旱—半干旱区开展了大量地下水依赖型植被的研究, 特别是在地下水对植被的耗水贡献、植被变绿对地下水补给的影响等方面取得了重要进展。近几年来, 国内学者也发表了地下水与植被关系的系列综述性文章 (刘鹄等, 2018; 李福林等, 2018; 侯金鑫等, 2019; 刘强等, 2020; 孙自永等, 2020), 综述了地下水依赖型植被的需水量、用水来源、生态水文过程模拟以及环境变化响应等方面的研究进展。由于地下水依赖型植被涉及的研究领域多, 在区域地下水依赖型植被的识别、生态韧性评价、与地下水的协同演化以及地下水生态水位确定等方面还需进一步开展综述。笔者将梳理以上 4 个方面的研究进展, 查找存在的主要问题, 提出下一步研究的建议, 以期对西北旱区生态保育与水资源管理提供科学依据。

2 研究进展

2.1 流域尺度地下水依赖型植被识别

随着计算机和大数据技术的快速发展, 遥感方法已成为识别区域尺度地下水依赖型植被的主要手段 (Castellazzi et al., 2019; Rampheri, 2023a)。根据水分胁迫程度, 地下水依赖型植被可在地下水与土壤水之间切换用水水源, 或调节用水来源比例应对气象干旱, 表现出对干旱事件的不敏感, 这种不敏感表现为“绿岛”效应。在遥感影像上, 依赖和不依赖地下水的植被在光谱特征上存在明显差异, 包含地下水依赖型植被的像元具有持续的、更高的绿度。根据空间上或时间上遥感像元波谱特征的变化, 可以区分出地下水依赖型植被的分布范围 (Eamus et al., 2015; Gou et al., 2015)。遥感方法具有快速高效、成本较低的特点, 且

覆盖范围大、一致性好。随着遥感技术的快速发展,卫星产品的空间分辨率和精度逐渐提高,遥感方法已成为识别区域地下水依赖型植被的主要手段(Castellazzi et al., 2019; Rampheri et al., 2023b)。在利用遥感方法确定依赖地下水的植被时常用的判断指标是基于卫星的植被指数,常用的卫星数据包括 Landsat 系列、MODIS 和 Sentinel 系列。这些卫星数据可以提供红外和近红外波段数据,有助于更好地研究植被的生长状况。在选择植被指数时,常用的指数包括 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 和 EVI (Enhanced Vegetation Index)。其中,NDVI 是最常用的植被指数之一,它可以很好地反映植被的生长状况;EVI 对植被的敏感性更好,可以减少大气和地表非生物因素的影响。

利用遥感方法识别区域尺度的地下水依赖型植被,首先选取与植被和水分有关的影响因素,然后构建综合评价指标体系,并据此划分依赖程度等级。传统的评价指标包括植被指数、降水、潜在蒸散发、地形等影响因素,近年来评价指标体系也逐渐纳入了岩性、河网密度、地下水埋深等因素(Liu et al., 2022; Pandey et al., 2023; Rampheri et al., 2023a)。其中,植被指数作为直接反映植被生长状况的变量,是最重要的评价指标,常用的植被指数包括归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI)。通过计算植被指数的标准差、变差等,确定干旱条件下地表植被能否持续保持一定的绿色,并据此识别植被对干旱的敏感性(Bajgain et al., 2015)。

评价指标的分级和权重是计算评价的重要组成部分,目前常用的参数分级方法有 K-means 聚类法、非监督分类法和最大似然估计法等(Pérez Hoyos et al., 2016)。对于评价指标权重的确定,可采用等权重法,也可利用专家经验法或层次分析法等(Duran-Llacer et al., 2022; Fildes et al., 2023)。最后根据各个评价指标的分级和权重,计算单一指标的贡献,累加各个评价指标获得综合评价结果,一般将评价结果分为低、较低、中等、较高和高等 5 个级别。

基于遥感方法,澳大利亚(Doody et al., 2017)、南非(Münch et al., 2007)、中亚地区(Liu et al., 2021)、欧洲的西班牙中部地区(Martinez-Santos et al., 2021)和南美洲的智利 Ligua 和 Petorca 河流域(Duran-Llacer et al., 2022),美国加利福尼亚州(Howard, 2010)、俄勒冈州(Brown et al., 2011)、德克萨斯州(Gou et al., 2015)

等国家和地区开展了基于遥感方法的地下水依赖型植被的识别,查清了地下水依赖型植被的空间分布。但是,国内区域尺度的类似研究还较少,只在渭河流域、黄土高原等少数几个地区开展过相关研究(Xu et al., 2022; Qiu et al., 2023a, 2023b)。渭河流域的识别结果表明,较高和高依赖区主要分布在山区,约占流域面积的 22.5%(Xu et al., 2022);而在黄土高原区,较高和高依赖区约占 34.6%,研究同时发现高依赖区在 2002~2014 年下降了约 13.6%(Qiu et al., 2023a, 2023b)。

遥感解译结果虽然具有多种优势,但其评价结果存在一定的不确定性,通常需要地面调查或试验等方法验证。地面验证方法精度较高,但投入的成本也相对较大,常用的方法有稳定同位素法、叶水势或土水势法、地下水昼夜波动法等(孙自永等, 2020; Hou et al., 2021; Zimmerman et al., 2023)。鉴于氢氧稳定同位素技术可以定量识别植物生长用水来源与比例,该技术被广泛应用到地下水与植被的关系研究中(Qiu et al., 2023a, 2023b)。植物根系在吸取土壤水和地下水,以及在植物体内传输运移水分时,通常不会引起水中氢氧同位素的分馏(Ehleringer et al., 1992),因此将植物木质部水分与土壤水、地下水等的同位素含量进行对比,可以判定植物水分的来源。具体的分析过程包括样品采集、样品预处理、同位素分析与数据处理,目前基于光腔衰荡光谱技术是最常用的测试方法。

目前基于氢氧同位素定量研究依赖程度的方法主要有直接比较法、二元或三元线性端元混合模型、多元线性端元混合模型(IsoSource)、贝叶斯混合模型(SIAR、MixSIR、MixSIAR)和吸水深度模型等(刘树宝等, 2016b; 张宇等, 2020)。基于这些方法发现澳大利亚昆士兰州桉树的需水中有 75%~85% 来自地下水(Canham et al., 2021),毛乌素沙地深层土壤水与地下水对沙柳的贡献率可达 60%(李荣磊, 2021),塔克拉玛沙漠腹地绿洲中胡杨的蒸腾中有约 30% 来自地下水(万彦博等, 2022)。因此,同位素示踪是一种有效的地面验证方法。

2.1.1 干旱胁迫下的植被生态韧性

生态韧性是指系统在环境变化条件下维系稳定状态的能力,强调了生态系统与环境要素间的协同变化关系(Holling, 1973; Olsson et al., 2015)。在干旱区面积扩张、极端干旱事件频发的背景下,生态系统发生突变的风险加剧,干旱胁迫下的植被生态韧性成为研究热点。随着研究的不断深入,生态韧性的内涵不

断丰富。早期的研究以定性分析植被对水分胁迫的抵抗力为主,抵抗力(resistance)特征决定了系统保持固有状态,从而避免超出系统边界的能力。但研究表明,从抵抗力的视角不能全面反映干旱胁迫下的生态韧性,在有些地区,植物对干旱胁迫表现为抵抗力,生长受限(Schwalm et al., 2017; Zhang et al., 2017);而在另外一些地区,一定程度的气象干旱反而会促进植物生长,提高植被生产力(Xu et al., 2019)。因此,无法仅用抵抗力指标来描述植被的生态韧性。

近期研究表明,在干旱扰动下植被通常经历生产力下降和回升两个过程,生态韧性在两个过程中的表现不同,有学者提出除了抵抗力之外,恢复力也是反映植被生态韧性的重要指标(王田野等, 2023)(图1)。恢复力决定着植被经历干旱之后的恢复状态,同时也影响植被对再次干旱的抵抗能力。干旱胁迫恢复时间是植被恢复力评价的重要指标,恢复期越长,其恢复力越弱,反之则越强。除了生态系统自身特性之外,气象、土壤、水文等外部因素也会影响恢复力的强弱。

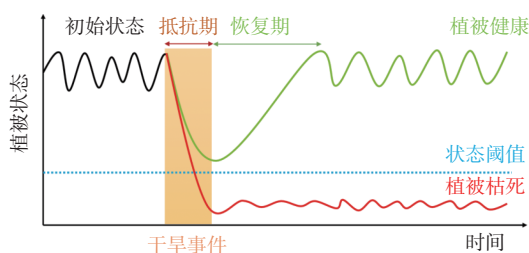


图1 植被对干旱胁迫响应的韧性特征示意图
(据王田野等, 2023)

Fig. 1 Schematic diagram of resilience characteristics of vegetation in response to drought stress

由于生态属性和所处环境的差异,植被对干旱的应对策略不尽相同,表现出抵抗力与恢复力之间的权衡关系。尽管抵抗力较强的生态系统往往具有更强的稳定性(Isbell et al., 2015),但也可能表现对环境变化的迟钝反映,当环境变化超过其耐受阈值时,系统将发生突变,难以恢复。研究表明,成熟林比幼龄林对干旱的抵抗力更强,更难从干旱中恢复过来,表现为较弱的恢复力(Bennett et al., 2015; Au et al., 2022)。因此,一般来说抵抗力越强,则恢复力越弱。

从定性的角度来说,地下水依赖型植被通常具有较强的生态韧性,表现为灵活的水分适应策略和较强的干旱抵抗力。地下水依赖型植被具有较强的生态韧性的原因有三方面:①可变的植被耗水来源,随着

水分胁迫程度的变化,其水分来源可在土壤水与地下水之间转换,甚至可以通过根系水力再分配影响土壤水分含量,提高水资源利用效率,促进植物群落发育(Wang et al., 2023)。比如侧柏的用水来源表现为深层土壤水大于浅层土壤水,但雨后浅层土壤水贡献率会升高。同时,深层土壤的侧柏用水贡献率枯水年(~58%)显著大于平水年(~54%)和偏丰年(~55%)(刘子赫等, 2022)。②地下水依赖植被可以通过生理生化指标的自我调节应对干旱胁迫。当受到水分胁迫时,叶片含水量和水势降低,气孔关闭,光合作用降低,以此来减少蒸腾造成的水分亏缺(拉本等, 2022)。③通过根系的生长应对干旱胁迫,因为地下水依赖型植被具有根系深、生长速率快的特点,详细论述见“旱区植被与水分协同变化”与“旱区地下水生态水位阈值”章节的相关论述。

2.1.2 旱区植被与水分协同变化

相比于降水和地表水而言,地下水是更为稳定的水源,其埋藏深度决定了地下水依赖型植被分布格局(Glanville et al., 2023)。尤其是在干旱情况下,地下水成为维系生态系统功能的主要、甚至唯一水源。而根系作为植物获取水分最主要的通道,其发育深度与地下水埋深密切相关。以往研究表明,地下水过深或过浅均不利于根系发育,普遍认为地下水位埋深在2~4 m是旱区植被适宜生存区间,极限生态水位约为4~7 m(张阳阳等, 2020)。地下水位埋深过大或者过小,都不利于植被生长。若地下水位埋深过大,根系无法吸收足够多的水,植被生长受到抑制;当地下水位埋深过小时,蒸发强烈,地下水中的盐分随毛管上升到土壤表面,使土壤发生盐渍化,进而抑制植被生长。

地下水位的缓慢下降,可以增加根区土壤氧气含量,促进根系向下生长。地下水依赖型植物通常具有较高的根系生长速率,当生长速率大于地下水位下降速率时,植物能持续获取地下水,维持生态健康。一旦根系生长速率小于地下水位下降速率时,植物将无法获取地下水,遭受水分胁迫(Sperry et al., 2002; Miller et al., 2010)。有研究显示,当地下水位以20 mm/d下降时,胡杨幼苗可以正常生长;当下降速率为40 mm/d时,生长放缓;当水位下降速率超过40 mm/d时,导致植物枯死(Naumburg et al., 2005; Wang et al., 2022; Liu et al., 2023)。近期国内学者的研究也表明,科尔沁沙地白草的根系生物量随着水位由0.5 m下降至2.0 m而增长(马雄德等, 2019)。

由于植物根系能够在垂向上动态协同跟进地下水位变化,使得有些地下水依赖型植物可在水位埋深大于 10 m 的条件下生存(图 2)。因此,根系垂向上动态响应水位变化的过程,是旱区植物与水分协同变化

的核心(Fan et al., 2017),但由于根系隐藏于地面之下,且形态复杂,根系探测难度大。挖掘法、钻掘法、微根管观测法等常规探测方法难以做到全面而完整的原位无损监测。

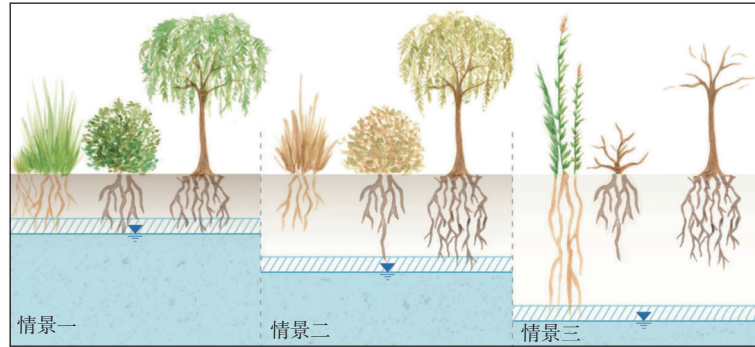


图2 植物根系与不同地下水位埋深关系示意图(Rohde et al., 2017)

Fig. 2 Schematic diagram of the relationship between plant root system and different depths of groundwater

随着干旱区植物根系动态观测技术的发展,以及植物与水分条件协同变化研究的深入(Naumburg et al., 2005; Fan et al., 2017),生态水文模型也在不断发展完善(Orellana et al., 2012; Yang et al., 2016)。早期的植被根系吸水模型建立在静态根系的基础上,随后提出基于植物自优化理论的动态根系模型(Maan et al., 2023),其中以 VOM-ROOT 为代表性模型(Schymanski et al., 2008)。近期也有学者以该模型为基础,通过考虑根系动态响应地下水变化,对地下水依赖型植物根系吸水模型进行了改进,实现了根系直接吸收地下水的模拟(Wang et al., 2018)。

2.1.3 旱区地下水生态水位阈值

在西北旱区,地下水水位和盐分均会影响植物生长,其中水位是最为重要的影响因素。这是因为旱区地下水型植物适应了高矿化度的地下水,如地下水的盐浓度 0.9% 时刚毛怪柳的生长速率比在淡水中快近 1 倍(王红宝等, 2022)。同时,植物可通过组织结构适应、信号通路和转运蛋白基因调控等拒盐途径应对盐分胁迫(李霞等, 2023),所以胡杨在地下水盐浓度 5% 时仍可存活(于茜茜等, 2012)。在西北旱区,地下水水位是植物生长最为重要的影响因素,研究地下水埋深与植被之间的关系一直是生态水文学的热点问题。自 1988 年以来发表的有关地下水与植被相关关系的论文中,超过 53% 的研究涉及水位与植被的相互关系(Hernandez, 2022)。地下水生态水位是既能满足植物生长利用地下水的需求,又避免土壤盐渍化或土地荒

漠化的地下水位动态区间,是诊断干旱区地下水依赖型植被健康的关键指标(张阳阳等, 2020; 翟家齐等, 2021)。

20 世纪 80 年代以来,确定适宜植物生长的生态水位引起广泛关注(张天曾, 1981)。地下水生态水位确定方法包括野外调查与统计法、生态水文模型法、遥感统计分析法和同位素示踪法等(贾利民等, 2015; 张阳阳等, 2020; 翟家齐等, 2021),各种方法的关键参数和计算模型见表 1。其中,统计学和生态学相结合的方法是计算地下水生态水位最常用的方法,这种方法通常以流域为研究对象,通过建立植被指数(NDVI 或是 EVI)与所对应的地下水埋深的统计关系,确定植被的地下水生态水位(党学亚等, 2019; 张高强等, 2022)。

对于地下水生态水位阈值,前人作了大量研究。近期几位学者对西北地区的生态水位进行了综合分析评价。例如,张阳阳等(2020)利用元数据分析的方法,从西北干旱区的乔木、灌木和草本中选择 13 种代表植物(图 3),确定了适宜和极限生态地下水位埋深;翟家齐等(2021)总结确定了西北地区 21 个流域的乔木、灌木、草本等 15 个常见植被的地下水生态水位阈值;王金哲等(2021)提出了西北干旱区地下水生态功能的评价指标体系,定量确定了植被生态功能正常、渐变、质变与灾变对应的地下水位埋深。对于地下水生态水位的影响因素,前人认为取决于植物内在生理结构(如根系深度),以及外在影响要素(如土壤质地、

表 1 地下水生态水位确定方法一览表

Tab. 1 Methods for determining groundwater ecological water level

方法	关键指标	计算方法或模型
野外调查与统计法	植被特征参数(覆盖度、多样性)、 地下水埋深	非线性二次曲线模型(如高斯模型、对数正态模型等)
生态水文模型法	植被指数、地下水埋深、土壤含水量 毛细上升高度、根系长度	通过饱和和非饱和模拟建立地下水位与植被耗水量的关系 毛细上升高度与根系长度之和
遥感统计分析法	地下水埋深、植被指数(NDVI或是EVI)	分析植被指数与地下水埋深的统计关系
同位素分析法	植物水、土壤水和地下水氢氧同位素	直接比较法或是模型计算(线性端元混合模型、 贝叶斯混合模型)

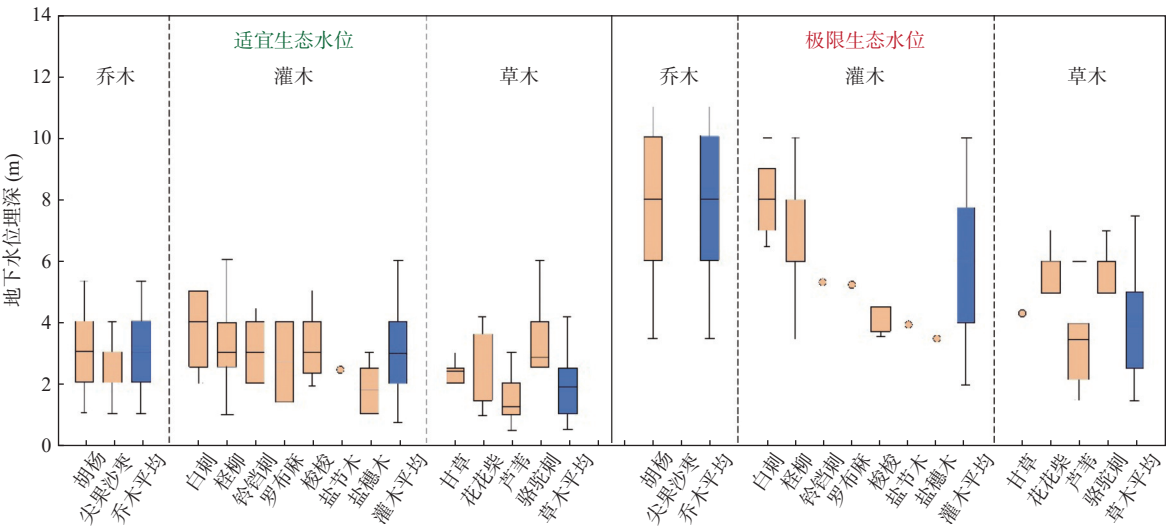


图3 典型地下水依赖型植被的适生与极限水位(据张阳阳等, 2020)

Fig. 3 Suitable and critical water levels for typical groundwater-dependent vegetation

地下水位埋深等), 其中土壤质地决定地下水面上毛管管水上升高度(张阳阳等, 2020)。

3 研究展望

3.1 流域尺度地下水依赖型植被识别

已有研究侧重于识别地下水依赖型植被的空间分布, 通常忽略空间分布的动态演化。考虑不断增大的人类活动强度和频发的干旱事件, 地下水依赖型植被的空间分布也呈现出明显的动态变化特征。胡杨是西北地区典型的依赖地下水的乔木, 由于生态输水的修复作用, 2016~2021 年塔里木胡杨自然保护区平均植被覆盖度由 18.9% 增长至 19.6%(王振等, 2023)。西北地区湖泊周边也是地下水依赖型植被较为发育的地区, 石羊河流域的尾间青土湖自生态输水以来, 植被覆盖呈增加趋势(杨丽娟等, 2020)。因此, 在加强流域尺度地下水依赖型植被的基础上, 还应充分利

用长序列的遥感数据, 研究地下水依赖型植被时空演变, 并从气象、水文、人类活动等方面分析其时空演变的驱动机制。

流域尺度地下水依赖型植被识别的地面验证主要利用同位素端元混合模型, 但其只能半定量地计算地下水对植被蒸腾的贡献, 计算结果的不确定性大、时空分辨率低, 不同方法给出的结果差异较大。比如, 利用 3 种贝叶斯同位素混合模型对桦树的用水水源进行分析, SIAR 计算出表层土壤水的贡献为 50%, 而 MixSIR 的计算结果为 99%, 两者相差高达 49%(Bar-beta et al., 2019)。利用同位素模型对中国西北喀斯特地区次生林、西北地区天山北坡灌木水分来源分析也表明, 不同的模型计算结果差异明显(曾祥明等, 2020; 李红梅等, 2023)。并且同位素模型基于统计学原理而非基于物理学原理, 无法克服水分吸收过程中的同位素分馏等问题(于静洁等, 2018; 孙自永等, 2020)。同位素观测与根系吸水模型的耦合研究, 为定量评估

植物对地下水的依赖性提供了新思路。这种耦合模型基于生态水文学原理,能够刻画同位素体的迁移、混合和分馏过程,计算结果具有更高的时空分辨率、更低的不确定性。目前已有不少模型能够模拟同位素在地下水、土壤和植物中的迁移,如 SiSPAT-Iso-tope 模型、Soil-Litter-Iso 模型等(孙自永等, 2020)。

3.2 生态韧性

目前对生态韧性的评价,降水减小导致的气象干旱考虑的多,地下水考虑不足。地下水依赖型植被水源多样,用水策略灵活,随着水分胁迫程度的变化,其用水来源可以在降水、土壤水、地下水等之间进行转换和再分配(Canham et al., 2021; 李荣磊, 2021)。未来研究地下水依赖型植被生态韧性时,首先,要厘清各水源动态变化,识别出基于水源属性的干旱事件及其变化特征;其次,分析植被对气象干旱响应过程,识别植被对干旱的抵抗和恢复能力,计算生态韧性,得到生态韧性空间分布;然后,基于生态干旱对气象和地下水干旱的归因分析,解析降水和地下水约束下的生态韧性格局演变规律;最后,采用主成分分析和结构方程模型等方法,识别影响地下水依赖型植被韧性的主要因素及其作用路径,

对于韧性特征的影响因素及其机理,国内外学者已从环境因子、植被指数、蒸散发等宏观角度和植物气孔行为、木质部水理性状等微观角度进行了研究,但植物根系对韧性的影响研究较少(王田野等, 2023)。根系塑性及其动态是旱区植物适应水分胁迫的重要策略,根系作为植物吸收水分、养分最直接的器官,也是植物感知土壤水分状况、分泌干旱胁迫信号最重要的器官(Giehl et al., 2018; Gupta et al., 2020),影响着植被生态韧性强弱(Wang et al., 2021, 2022),但其在干旱应对策略中的作用却往往被忽略。考虑到根系是揭示旱区地下水依赖型植被生态韧性格局的关键所在,下一步应加大根系调控下的植物-地下水相互作用机制研究。

抵抗性、恢复性与适应性是衡量生态韧性最重要的指标,目前大部分研究只考虑了抵抗力或恢复力等短期性指标,从系统演化的角度研究系统对变化的应对与适应比较少。已有的研究表明,依赖地下水的植被在地下水长期开采的条件下会发生演替。如经过近 20 年的地下水开采,美国加利福尼亚州欧文斯河谷区的地下水依赖型植被从地下水依赖型转为降水依赖型(Pritchett et al., 2012)。

通过以上的分析表明,现有的韧性研究多注重地表指标而忽略了地下指标,缺少基于抵抗力、恢复力和适应力三方面的综合评价。同时,目前的研究以定性评价为主,定量评价仍然是当前的难点问题。这几方面的不足,导致对植被生态韧性演变规律和机制的认识不清(Matos et al., 2020; Liang et al., 2021)。对于地下水依赖型生态系统,亟待从抵抗力与恢复力、地上与地下协同的视角,定量研究生态韧性的特征及其形成模式。

3.3 植被与水分协同变化

当前,全球旱区水资源供需矛盾突出(Wang et al., 2018),局部地区地下水开采不合理,导致地下水位快速下降(Jasechko et al., 2024; Kuang et al., 2024),但旱区地下水依赖型植物根系水分适应机制不明确,限制了植物与地下水协同关系的研究。通过创新植物根系动态监测技术,研发根系-水源协同变化三维模型,探究根系对地下水位变化的响应,是揭示植被与水分协同变化机制的关键。

随着物探技术的发展,高分辨率探地雷达为根系无损探测提供了一种可能。早在 20 世纪 80 年代,探地雷达就应用于土壤剖面根系监测(Doolittle et al., 1991),但识别精度不高。经过近几十年的发展,探地雷达在根系形态探测、追踪反演,根系生物量估算等方面取得了长足的进步(Fan et al., 2022)。目前的研究包括多个方面,包括根系形态图的绘制、根系尺寸大小估计,根系生物量估算等。无论是在定性决断方面,还是在定量评价方面,都取得了不小的进展,但对于根系直径小于 2 mm 吸收根的精细探测依然存在较大困难。通过改进基于偏移技术和电磁波逆散射理论的探地雷达成像算法,可以提升植被细根探测精度,获取根系的动态变化。

但是,目前的动态根系模型局限于点尺度的垂向一维水分运移模拟,根系-水源协同变化三维模型有待进一步研究(Condon et al., 2019)。未来可以将 Hydrus 模型(Simunek et al., 2006)与地下水模型 Modflow(Harbaugh et al., 2000)进行耦合,定量模拟观测样地土壤水、地下水与植被蒸散之间的水分交换。耦合模型不仅要考虑植被对土壤水分的影响,还要量化地下水与土壤水之间的动态关系。在耦合模拟过程中,可将 Hydrus 子程序包嵌入到 Modflow 主程序,以潜水面作为交界面,进行两个模型的耦合。当前的 VOM-ROOT 模块假定植物根长(Z_R)恒定不变,但地下水依

赖型植物根长随地下水位变化而变化。未来在植物根系对土壤水动态响应的基础上,增加植物根长对地下水位变化的响应函数。可将改进之后的 VOM-ROOT 模块通过交换状态和通量变量耦合到 Hydrus-Model 模型, Hydrus-Model 模型为 VOM-ROOT 模块提供蒸散、土壤基质势、非饱和导水率等参数, VOM-ROOT 模块为 Hydrus-Model 模型提供植物动态根系分布。

3.4 地下水生态水位

已有研究表明,地下水生态水位阈值确定主要有两方面的不足:一是假定生态水位阈值是静态的;二是对降水的空间差异考虑不足。一般认为,地下水生态水位阈值是静态的,但目前研究表明,地下水位缓慢下降会促进根系生长,改变生态水位的阈值。地下水生态水位具备动态特征的另一种可能原因是地下水依赖型植被具有较强的韧性,生态系统应对与适应地下水位变化的行为(王田野等, 2023)。已有的调查表明,即使在同一流域相同物种的生态水位变异也较大,如生态水位阈值的变幅对鄂尔多斯高原的芨芨草是 2 m(李瑛, 2009),对甘肃石羊河流域的怪柳是 3 m(杨锦, 2018),对新疆吐鲁番盆地的梭梭则高达 5.5 m(张晓等, 2016)。全球植物与地下水关系研究发现,植物可以通过根系生长吸收埋深更大的地下水(Fan et al., 2017),而在确定地下水生态水位阈值时却忽略了植物-地下水协同变化以及韧性调节能力(王田野等, 2023)。气候、土壤、植被属性及年龄可能是导致这种差异性的重要因素,在具体区域应用时需要综合考虑其实际情况确定最适宜的埋深阈值区间(翟家齐等, 2021)。

前人研究表明,降水是地下水的重要补给来源,是影响生态水位的重要因素(贾利民等, 2015; 翟家齐等, 2021),因为降水转化而来的土壤水也是地下水依赖型植被的重要水源之一。但在区域尺度建立地下水埋深与植被指数的关系时,没有考虑流域内降水的差异,假定同一研究区的降水变化不大,尚不足以构成对植被分布的独立影响。西北地区受多重季风与地形高差大的影响,降水具有显著的局地性(傅朝等, 2022)。例如,乌审旗境内的 3 个气象站的多年平均降水量差别高达 150 mm 以上(刘瑞芳, 2018)。因此,不能忽略降水的空间非均质性对生态水位确定的影响。生态水位除了受降水空间变化的影响外,未来不同的气候变化情景也会影响生态水位,地下水依赖型生态系统一般发育较为发达的浅部根系,以便于吸收

降水入渗形成的土壤水,当气候变的干旱或湿润时,深部根系会生长或是退化。如在干旱缺水条件下胡杨主根向下生长可达 7.0 m(张阳阳等, 2020)。

综上,前人重点解决了静态生态水位、现状气候条件下生态水位的确定问题。以上的分析表明,地下水动态变化和气候变化会改变生态水位,目前动态生态水位的研究还比较薄弱。同时,长期以来时空尺度问题是研究地下水生态水位的难点,不同的研究尺度表达的内涵和结果也有所不同。如在个体水平,根系特性是植物适应水分变化的主要表现;而在群落水平尺度,优势种的盖度、频度是地下水位、地下水含盐量的直观响应(贾利民等, 2015)。从水资源管理的角度出发,如何确定大尺度的地下水生态水位也是未来需要重点的研究方向。

4 结论

(1)随着气候变化和人类活动的加剧,西北旱区植被能否适应愈加严峻的水资源短缺形势,或者有限的水资源能否维系脆弱的生态系统,这是西北旱区生态安全和区域可持续发展面临的关键问题,也是破解西北地区生态环境可持续发展困境的关键。

(2)识别流域尺度地下水依赖型植被的主流方法是遥感方法,可用稳定同位素方法验证遥感技术的识别结果。但对流域尺度地下水依赖型植被的演变研究不足,验证方法的精度还需要进一步提高。

(3)生态韧性评价的核心要素包括抵抗力、恢复力与适应力。在生态韧性的评价中,地下水考虑不足,往往忽略根系对韧性评价结果的影响,缺少基于抵抗力、恢复力和适应力的综合评价。

(4)植被与地下水具有协同演化的特征,植物根系能够动态协同跟进地下水位变化。但目前缺少根系的精细探测技术与根系-水源协同变化三维模拟模型,限制了地下水-植被协同演化的深入研究。

(5)前人已确定了西北地区常见的地下水依赖植被的生态水位。但一般认为地下水生态水位是静态的,对于水位变化、气候变化等变条件下的生态水位研究较少。

参考文献(References):

柴建禄. 采煤对浅层地下水环境的影响及矿井水生态利用分析

- [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 138–144.
- CHAI Jianlu. Influence of coal mining on shallow groundwater environment response to coal mining and mine water ecological utilization analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 138–144.
- 陈小丽, 陈亚宁, 陈亚鹏. 黑河下游荒漠河岸林植物水分利用关系研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 972–979.
- CHEN Xiaoli, CHEN Yaning, CHEN Yapeng. Relationship among water use of different plants in Heihe River riparian forests[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 972–979.
- 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385–393.
- CHEN Yaning, LI Zhongqin, XU Jianhua, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of Northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385–393.
- 党学亚, 卢娜, 顾小凡, 等. 柴达木盆地生态植被的地下水阈值[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 1–8.
- DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 1–8.
- 党学亚, 张俊, 常亮, 等. 西北地区水文地质调查与水资源安全[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 81–95.
- DANG Xueya, ZHANG Jun, CHANG Liang, et al. Hydrogeological Survey and Water Resources Security in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 81–95.
- 董佳秋, 张俊, 顾小凡, 等. 半干旱区流域尺度植被依赖地下水程度评价: 以鄂尔多斯高原海流兔河流域为例 [J/OL]. 中国地质, 2022, 1–19.
- DONG Jiaqiu, ZHANG Jun, GU Xiaofan, et al. Groundwater dependent ecosystems assessment at catchment scale in semi-arid regions: a case study in the Hailiutu catchment of the Ordos Plateau[J/OL]. Geology in China, 2022, 1–19.
- 董建红, 张志斌, 刘奔腾, 等. “三生”空间视角下西北地区生态环境质量分异机制的地理探测[J]. 干旱区地理, 2023, 46(4): 515–526.
- DONG Jianhong, ZHANG Zhibin, LIU Benteng, et al. Geographical exploration of the spatial differentiation mechanism of ecoenvironmental quality in northwest China from the perspective of “production-living-ecological” space[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(4): 515–526.
- 冯博, 聂振龙, 王金哲, 等. 石羊河流域绿洲长时间系列遥感动态监测[J]. 地理空间信息, 2020, 18(12): 10–13.
- FENG Bo, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, et al. Long-time Series Remote Sensing Dynamic Monitoring of the Oasis in Shiyang River Basin[J]. Geospatial Information, 2020, 18(12): 10–13.
- 冯起, 白光祖, 李宗省, 等. 加快构建西北地区生态保护新格局[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(10): 1457–1470.
- FENG Qi, BAI Guangzu, LI Zongxing, et al. Accelerate Construction of New Pattern of Ecological Protection in Northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(10): 1457–1470.
- 冯玉新. 历史地理视域下的西北农牧交错带刍议[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 83–89.
- FENG Yuxin. Northwestern farming-pastoral zones in the perspective of historical geography[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(12): 83–89.
- 傅朝, 刘维成, 宋兴宇, 等. 西北干旱区一次极端暴雨局地性增强的对流环境特征[J]. 干旱气象, 2022, 40(6): 909–921.
- FU Zhao, LIU Weicheng, SONG Xingyu, et al. Local enhanced convective environment characteristics of an extreme rainstorm event in arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 909–921.
- 郭娜. 关于煤化工行业高耗水问题剖析及优化措施探讨[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(22): 75–75.
- 贺军奇, 赵同强, 陈云飞, 等. 毛乌素沙区地下水对植被盖度空间格局影响分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 90–99.
- HE Junqi, ZHAO Tongqiang, CHEN Yunfei, et al. Effect of Subsurface Water on Spatial Pattern of Vegetation Coverage in Mu Us Sandy Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 90–99.
- 侯金鑫, 曹万云, 王德, 等. 地下水埋深对土壤水盐、植被影响研究进展[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 150–156.
- HOU Jinxin, CAO Wanyun, WANG De, et al. Research progress on the influence of groundwater depth of soil water, salinity and vegetation[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2019, 35(2): 150–156.
- 黄海潮, 雷鸣, 孔祥斌, 等. 中国耕地空间格局变化及其生态系统服务价值响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 339–348.
- HUANG Haichao, LEI Ming, KONG Xiangbin, et al. Spatial Pattern Change of Cultivated Land and Response of Ecosystem Service Value in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 339–348.
- 计文化, 王永和, 杨博, 等. 西北地区地质、资源、环境与社会经济概貌[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 15–27.
- JI Wenhua, WANG Yonghe, YANG Bo, et al. Overview of Geology, Resources, Environment and Social Economy in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 15–27.
- 贾利民, 郭中小, 龙胤慧, 等. 干旱区地下水生态水位研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 187–193.
- JIA Limin, GUO Zhongxiao, LONG Yinghui, et al. Research advances in ecological groundwater level in arid areas[J]. Ecological Science, 2015, 34(2): 187–193.
- 焦继宗, 杨露, 杜婷. 基于 GIS 的西北农牧交错带土地利用/覆被时空变化分析[J]. 甘肃科技, 2019, 35(7): 139–143.
- 金晓媚, 张强, 杨春杰. 海流兔河流域植被分布与地形地貌及地下水位关系研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 227–233.
- JIN Xiaomei, ZHANG Qiang, YANG Chunjie. Research on vegetation distribution and its relationship with topography and

- groundwater depth in the Hailiutu River Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 227–233.
- 拉本, 胡娟, 张旭萍. 干旱胁迫对植物生理的影响以及分子机制的响应研究进展[J]. *青海草业*, 2022, 31(4): 31–35.
- 李福杰, 韩风, 马斌, 等. 塔里木河下游近 20 年植被演化特征对生态输水的响应[J]. *草业科学*, 2022, 39(12): 2578–2588.
- 李福林, 陈华伟, 王开然, 等. 地下水支撑生态系统研究综述. *水科学进展*, 2018, 29(5): 750–758.
- LI Fulin, CHEN Huawei, WANG Kairan et al. Comprehensive review of groundwater-dependent ecosystems[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 750–758.
- 李红梅, 巴贺贾依娜尔·铁木尔别克, 常顺利, 等. MixSIAR 和 IsoSource 模型对比分析天山北坡不同灌木的夏季水分来源[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(3): 445–455.
- LI Hongmei, Bahejiayinaer TIEMUERBIEKE, CHANG Shunli, et al. Comparative analysis of summer water sources of different shrubs on the northern slope of Tianshan Mountains by MixSIAR and IsoSource models[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(3): 445–455.
- 李荣磊, 黄来明, 裴艳武, 等. 毛乌素沙地圪台沟小流域沙柳水分利用来源研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 122–130.
- LI Ronglei, HUANG Laiming, PEI Yanwu, et al. Water Use Source of *Salix psammophila* in Gechougou Small Watershed of Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 122–130.
- 李若怡, 王旭升, 尹立河, 等. 基于生态约束模拟评价浩勒报吉水源地的地下水可开采量[J]. *工程勘察*, 2021, 49(3): 36–42.
- LI Ruoyi, WANG Xusheng, Yin Lihe, et al. Simulation and assessment on allowable groundwater exploitation in the Haolebaoji well field based on ecological constraint[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021, 49(3): 36–42.
- 李文明, 李健强, 徐永, 等. 西北生态地质调查研究进展与展望[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 108–119.
- LI Wenming, LI Jianqiang, XU Yong, et al. Progress and Prospects of Ecological Geological Survey in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 108–119.
- 李霞, 刘传鑫, 徐彬, 等. 植物拒盐机制的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(27): 86–94.
- LI Xia, LIU Chuanxin, XU Bin, et al. Plant Salt-exclusion Mechanism: A Review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(27): 86–94.
- 李瑛. 鄂尔多斯湖盆高原地下水与植被生态关系研究——以苏贝淖流域流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2009: 3–61.
- 刘鹄, 赵文智, 李中恺. 地下水依赖型生态系统生态水文研究进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 741–750.
- LIU Hu, ZHAO Wenzhi, LI Zhongkai. Ecohydrology of Groundwater Dependent Ecosystems: A Review[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 741–750.
- 刘强, 梁丽乔. 依赖地下水生态系统的生态水文研究评述[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(5): 693–699.
- LIU Qiang, LIANG Liqiao. Eco-hydrology groundwater-dependent of ecosystem[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(5): 693–699.
- 刘瑞芳. 2017 年乌审旗气候特征及其对农牧业的影响[J]. *现代农业科技*, 2018(14): 212–213.
- 刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 黑河下游荒漠河岸林不同林龄胡杨对脉冲式降雨的响应[J]. *干旱区研究*, 2016a, 33(1): 172–178.
- LIU Shubao, CHEN Yaning, CHEN Yapeng, et al. Response of *Populus euphratica* at Different Ages to Rainfall Pulses in the Desert Riparian Forest of the Lower Reaches of the Heihe River[J]. *Arid Zone Research*, 2016a, 33(1): 172–178.
- 刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究[J]. *生态学报*, 2016b, 36(3): 729–739.
- LIU Shubao, CHEN Yaning, CHEN Yapeng, et al. Study on the depth of water uptake by *Populus euphratica* trees of different ages in the lower reaches of the Heihe River, based on the stable isotope techniques[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016b, 36(3): 729–739.
- 刘子赫, 贾国栋, 刘自强, 等. 北京山区侧柏用水来源随水分条件变化的多时间尺度[J]. *林业科学*, 2022, 58(3): 40–47.
- LIU Zihe, JIA Guodong, LIU Ziqiang, et al. Water Source Change of *Platycladus orientalis* under Different Water Regimes in Beijing Mountainous Area: a Multi-timescale Study[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(3): 40–47.
- 马雄德, 黄金廷, 李吉祥, 等. 面向生态的矿区地下水位阈限研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 675–680.
- MA Xiongde, HUANG Jinting, LI Jixiang, et al. Groundwater level threshold under the constrain of ecology security in mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 675–680.
- 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 地下水与植被关系的研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(5): 36–40.
- MA Yulei, WANG De, LIU Junmin, et al. Research progress on relation between groundwater and vegetation[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(5): 36–40.
- 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.
- 万彦博, 师庆东, 戴岳, 等. 沙漠腹地天然绿洲不同林龄胡杨水分利用来源[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 353–359.
- WAN Yanbo, SHI Qingdong, DAI Yue, et al. Water sources of *Populus euphratica* with different tree ages in the oasis of desert hinterland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 353–359.
- 王根绪, 夏军, 李小雁, 等. 陆地植被生态水文过程前沿进展: 从

- 植物叶片到流域[J]. 科学通报, 2021, 66(Z2): 3667–3683.
- WANG Genxu, XIA Jun, LI Xiaoyan, et al. Critical advances in understanding ecohydrological processes of terrestrial vegetation: From leaf to watershed scale[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(Z2): 3667–3683.
- 王红宝, 郑伶俐, 丁丁, 等. 7种怪柳属植物对NaCl胁迫的生长生理响应与耐盐性差异[J]. 山东农业科学, 2022, 54(11): 31–38.
- WANG Hongbao, ZHENG Lingjie, DING Ding, et al. Growth and Physiological Response to NaCl Stress and Salt Tolerance Differences of Seven Tamarix Linn. Species[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(11): 31–38.
- 王金华. 煤化工行业高水耗问题分析与改进措施[J]. 化工管理, 2020(34): 102–103.
- WANG Jinhua. Analysis and Improvement Measures of High Water Consumption in Coal Chemical Industry[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(34): 102–103.
- 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.
- 王田野, 王平, 吴泽宁, 等. 干旱胁迫下植被生态韧性研究进展[J]. 地球科学进展, 2023, 38(8): 790–801.
- WANG Tianye, WANG Ping, WU Zening, et al. Progress in the study of ecological resilience of vegetation under drought stress[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(8): 790–801.
- 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 702–718.
- WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research Status and Prospect of the Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Regions[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(7): 702–718.
- 王旭升, 尹立河, 方坤, 等. 鄂尔多斯浩勒报吉水源地开采地下水的环境影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 5–12.
- WANG Xusheng, YIN Lihe, FANG Kun, et al. Inspection and assessment of the environmental impacts of groundwater exploitation at the Haolebaoji wellfield in Inner Mongolia[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 5–12.
- 王颖, 崔文洁, 吴新越, 等. 新疆喀什噶尔河岸植被对地下水埋深的退化响应[J]. 环境生态学, 2022, 4(4): 65–71.
- WANG Ying, CUI Wenjie, WU Xinyue, et al. Degradation response of riverbank vegetation in Kashgar, Xinjiang to groundwater burial depth[J]. Environmental Ecology, 2022, 4(4): 65–71.
- 王振, 李均力, 张久丹, 等. 输水漫溢对塔里木河中游胡杨林恢复的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 94–102.
- WANG Zhen, LI Junli, ZHANG Jiudan, et al. Influences of ecological water conveyance on Populus euphratica forest restoration in the middle reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 94–102.
- 魏光辉, 周海鹰, 徐继红. 塔里木河流域生态廊道治理与修复对策[J]. 中国水利, 2023(6): 19–23.
- WEI Guanghui, ZHOU Haiying, XU Jihong. Management and measures for restoration of ecological corridor in the Tarim River Basin[J]. China Water Resources, 2023(6): 19–23.
- 武文豪, 杨琰琰, 马田田, 等. 农牧交错区农业资源利用与优化模式——以榆林市为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(5): 1231–1244.
- WU Wenhao, YANG Yanying, MA Tiantian, et al. Utilization characteristics and optimization modes of agricultural resources in agro-pastoral ecotones of China: a case study of Yulin City[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(5): 1231–1244.
- 席海洋, 冯起, 司建华, 等. 黑河下游绿洲 NDVI 对地下水位变化的响应研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 574–582.
- XI Haiyang, FENG Qi, SI Jianhua, et al. Response of NDVI to Groundwater Level Change in the Lower Reaches of the Heihe River, China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 574–582.
- 杨锦. 石羊河流域荒漠绿洲区植被与地下水埋深的关系研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(12): 1–4.
- 杨丽娟, 黄峰, 潘若云, 等. 青土湖绿洲植被指数适用性及优选研究[J]. 安徽农业科学, 2020(19): 65–68.
- YANG Lijuan, HUANG Feng, PAN Ruoyun, et al. Study on the Applicability and Optimization of Vegetation Index in Qingtu Oasis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020(19): 65–68.
- 易学睿, 王强, 田华, 等. 我国煤化工产业水资源短缺问题分析与建议[J]. 现代化工, 2023, 43(11): 10–14.
- YI Xuerui, WANG Qiang, TIAN Hua, et al. Analysis and suggestion of water shortage in China's coal chemical industry[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(11): 10–14.
- 尹立河, 张俊, 王哲, 等. 西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1094–1111.
- YIN Lihe, ZHANG Jun, WANG Zhe, et al. Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in northwestern China[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1094–1111.
- 于静洁, 李亚飞. 稳定氢氧同位素定量植物水分来源的不确定性解析[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 7942–7949.
- YU Jingjie, LI Yafei. Uncertainties in the usage of stable hydrogen and oxygen isotopes for the quantification of plant water sources[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 7942–7949.
- 于茜茜, 宋新英, 杨敏生, 等. 胡杨耐盐分子机制研究进展[J]. 林业与生态科学, 2012, 27(4): 402–404.
- YU Xixi, SONG Xinying, YANG Minsheng, et al. Research on molecular mechanisms of salt tolerance in Populus euphratica[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2012, 27(4): 402–404.

- 张高强, 聂洪峰, 肖春蕾, 等. 浑善达克沙地东南缘地下水埋深对植被盖度的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 147–153.
- ZHANG Gaoqiang, NIE Hongfeng, XIAO Chunlei, et al. Effect of groundwater depth on vegetation coverage in southeastern margin of Otindag Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 147–153.
- 张天曾. 中国干旱区水资源利用与生态环境[J]. 资源科学, 1981(1): 62–70.
- 张晓, 魏青军, 刘亮. 吐鲁番盆地地下水与植被的关系研究[J]. 山东国土资源, 2016, 32(7): 42–48.
- ZHANG Xiao, WEI Qingjun, LIU Liang. Research on Relation between Groundwater and Vegetation in Turpan Basin[J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(7): 42–48.
- 张阳阳, 陈喜, 高满, 等. 基于元数据分析的西北干旱区生态地下水埋深及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(5): 57–65.
- ZHANG Yangyang, CHEN Xi, GAO Man, et al. Meta-analysis of ecological depth to groundwater table and its influencing factors in arid region of northwest China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 57–65.
- 张宇, 张明军, 王圣杰, 等. 基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1356–1368.
- ZHANG Yu, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Comparison of different methods for determining plant water sources based on stable oxygen isotope[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1356–1368.
- 翟家齐, 董义阳, 祁生林, 等. 干旱区绿洲地下水生态水位阈值研究进展[J]. 水文, 2021, 41(1): 7–14.
- ZHAI Jiaqi, DONG Yiyang, QI Shenglin, et al. Advances in Ecological Groundwater Level Threshold in Arid Oasis Regions[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(1): 7–14.
- 赵文智, 任珩, 杜军, 等. 河西走廊绿洲生态建设和农业发展的若干思考与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 424–434.
- ZHAO Wenzhi, REN Hang, DU Jin, et al. Thoughts and suggestions on oasis ecological construction and agricultural development in Hexi Corridor[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 424–434.
- 曾祥明, 徐宪立, 钟飞霞, 等. MixSIAR 和 IsoSource 模型解析植物水分来源的比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5611–5619.
- ZENG Xiangming, XU Xianli, ZHONG Feixia, et al. Comparative study of MixSIAR and IsoSource models in the analysis of plant water sources[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5611–5619.
- 朱成刚, 艾克热木·阿布拉, 李卫红, 等. 塔里木河下游生态输水条件下胡杨林生态系统恢复研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 629–636.
- ZHU Chenggang, AIKEREMU Abula, LI Weihong, et al. Ecosystem restoration of Populus euphratica forest under the ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geograph, 2021, 44(3): 629–636.
- Au T F, Maxwell J T, Robeson S M, et al. Younger trees in the upper canopy are more sensitive but also more resilient to drought[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(12): 1168–1174.
- Bajgain R, Xiao X, Wagle P, et al. Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 108: 151–160.
- Barbeta A, Jones S P, Clave L, et al. Unexplained hydrogen isotope offsets complicate the identification and quantification of tree water sources in a riparian forest[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(4): 2129–2146.
- Bennett A C, McDowell N G, Allen C D, et al. Larger trees suffer most during drought in forests worldwide[J]. Nature Plants, 2015, 1(10): 1–5.
- Brown J, Bach L, Aldous A, et al. Groundwater-dependent ecosystems in Oregon: An assessment of their distribution and associated threats[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(2): 97–102.
- Callahan R P, Riebe C S, Sklar L S, et al. Forest vulnerability to drought controlled by bedrock composition[J]. Nature Geosciences, 2022, 15: 714–719.
- Camarero J J, Colangelo M, Rodríguez-González P M. Tree growth, wood anatomy and carbon and oxygen isotopes responses to drought in Mediterranean riparian forests[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 529: 120710.
- Canham C A, Duvert C, Beesley L S, et al. The use of regional and alluvial groundwater by riparian trees in the wet-dry tropics of northern Australia[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(5): e14180.
- Castellazzi P, Doody T, Peeters L. Towards monitoring groundwater-dependent ecosystems using synthetic aperture radar imagery [J]. Hydrological processes, 2019, 33(25): 3239–3250.
- Condon L E, Maxwell R M. Simulating the sensitivity of evapotranspiration and streamflow to large-scale groundwater depletion [J]. Science Advances, 2019, 5(6): eaav4574.
- Doody T M, Barron O V, Dowsley K, et al. Continental mapping of groundwater dependent ecosystems: A methodological framework to integrate diverse data and expert opinion[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 10: 61–81.
- Doolittle J A, Miller W F. Use of ground-penetrating radar techniques in archaeological investigations[J]. NASA. Stennis Space Center, Applications of Space-Age Technology in Anthropology, 1991.
- Duran-Llaser I, Arumí J L, Arriagada L, et al. A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: A case study in Chile[J]. Science of The Total Environment, 2022, 816: 151528.

- Eamus D, Zolfaghar S, Villalobos-Vega R, et al. Groundwater-dependent ecosystems: Recent insights from satellite and field-based studies[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(10): 4229–4256.
- Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition[J]. *Plant, cell & environment*, 1992, 15(9): 1073–1082.
- Fan G, Liang H, Zhao Y, et al. Automatic reconstruction of three-dimensional root system architecture based on ground penetrating radar[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 197: 106969.
- 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.
- Fildes S G, Doody T M, Bruce D, et al. Mapping groundwater dependent ecosystem potential in a semi-arid environment using a remote sensing-based multiple-lines-of-evidence approach[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2023, 16(1): 375–406.
- Giehl R F H, von Wirén N. Hydropatterning-how roots test the waters[J]. *Science*, 2018, 362(6421): 1358–1359.
- Glanville K, Sheldon F, Butler D, et al. Effects and significance of groundwater for vegetation: A systematic review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 875: 162577.
- Gou S, Gonzales S, Miller G R. Mapping potential groundwater-dependent ecosystems for sustainable management[J]. *Groundwater*, 2015, 53(1): 99–110.
- Goulden M L, Bales R C. California forest die-off linked to multi-year deep soil drying in 2012–2015 drought[J]. *Nature Geosciences*, 2019, 12: 632–637.
- Gupta A, Rico-Medina A, Caño-Delgado A I. The physiology of plant responses to drought[J]. *Science*, 2020, 368(6488): 266–269.
- Harbaugh A W, Banta E R, Hill M C, et al. MODFLOW-2000, the US Geological Survey Modular Groundwater Model—User Guide to Modularization Concepts and the Ground-water Flow Process[J]. Open-File Report 00-92, Reston, Virginia, 2000.
- Hernandez J O. Ecophysiological effects of groundwater drawdown on phreatophytes: research trends during the last three decades[J]. *Land*, 2022, 11(11): 2061.
- Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual review of ecology and systematics*, 1973, 4(1): 1–23.
- Hou C, Tian D, Xu B, et al. Use of the stable oxygen isotope method to evaluate the difference in water consumption and utilization strategy between alfalfa and maize fields in an arid shallow groundwater area[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107065.
- Howard J, Merrifield M. Mapping groundwater dependent ecosystems in California[J]. *Plos One*, 2010, 5(6): e11249.
- Isbell F, Craven D, Connolly J, et al. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes[J]. *Nature*, 2015, 526(7574): 574–577.
- Jasechko S, Seybold H, Perrone D, et al. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally[J]. *Nature*, 2024, 625(7996): 715–721.
- Kibler C L, Schmidt E C, Roberts D A, et al. A brown wave of riparian woodland mortality following groundwater declines during the 2012–2019 California drought[J]. *Environmental research letters*, 2021, 16(8): 084030.
- Kuang X, Liu J, Scanlon B R, et al. The changing nature of groundwater in the global water cycle[J]. *Science*, 2024, 383(6686): eadf0630.
- Liang M, Cao R, Di K, et al. Vegetation resistance and resilience to a decade-long dry period in the temperate grasslands in China[J]. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(15): 10582–10589.
- Liu C, Liu H, Yu Y, et al. Mapping groundwater-dependent ecosystems in arid Central Asia: Implications for controlling regional land degradation[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 797: 149027.
- Liu D, Wang T, Peñuelas J, et al. Drought resistance enhanced by tree species diversity in global forests[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(10): 800–804.
- Liu S, Xu G, Chen T, et al. Quantifying the effects of precipitation exclusion and groundwater drawdown on functional traits of *Haloxylon ammodendron*—How does this xeric shrub survive the drought?[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 904: 166945.
- Maan C, ten Veldhuis M C, van de Wiel B J H. Dynamic root growth in response to depth-varying soil moisture availability: a rhizobox study[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(12): 2341–2355.
- Martinez-Santos P, Díaz-Alcaide S, De la Hera-Portillo A, et al. Mapping groundwater-dependent ecosystems by means of multi-layer supervised classification[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126873.
- Matos I S, Menor I O, Rifai S W, et al. Deciphering the stability of grassland productivity in response to rainfall manipulation experiments[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(3): 558–572.
- Miller G R, Chen X, Rubin Y, et al. Groundwater uptake by woody vegetation in a semiarid oak savanna[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(10).
- Münch Z, Conrad J. Remote sensing and GIS based determination of groundwater dependent ecosystems in the Western Cape, South Africa[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15: 19–28.
- Naumburg E, Mata-Gonzalez R, Hunter R G, et al. Phreatophytic vegetation and groundwater fluctuations: a review of current research and application of ecosystem response modeling with an emphasis on Great Basin vegetation[J]. *Environmental Management*, 2005, 35(6): 726–740.
- Olsson L, Jerneck A, Thoren H, et al. Why resilience is unappealing to social science: Theoretical and empirical investigations of the

- scientific use of resilience[J]. *Science advances*, 2015, 1(4): e1400217.
- Orellana F, P Verma, S P Loheide II, et al. Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater-dependent ecosystems[J]. *Rev. Geophys.*, 2012, 50: RG3003.
- Pandey H K, Singh V K, Singh S K, et al. Map** and validation of groundwater dependent ecosystems (GDEs) in a drought-affected part of Bundelkhand region, India[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, 23: 100979.
- Pérez Hoyos I C, Krakauer N Y, Khanbilvardi R, et al. A review of advances in the identification and characterization of groundwater dependent ecosystems using geospatial technologies[J]. *Geosciences*, 2016, 6(2): 17.
- Pritchett D, Manning S J. Response of an intermountain groundwater-dependent ecosystem to water table drawdown[J]. *Western North American Naturalist*, 2012, 72(1): 48–59.
- Qiu D, Zhu G, Bhat M A, et al. Water use strategy of nitraria tangutorum shrubs in ecological water delivery area of the lower inland river: Based on stable isotope data[J]. *Journal of Hydrology*, 2023a, 624: 129918.
- Qiu Y, Wang D, Yu X, et al. Effects of Groundwater Table Decline on Vegetation in Groundwater-Dependent Ecosystems[J]. *Forests*, 2023b, 14(12): 2326.
- Rampheri M B, Dube T, Dondofema F, et al. Identification and delineation of groundwater-dependent ecosystems (GDEs) in the Khakea–Bray transboundary aquifer region using geospatial techniques[J]. *Geocarto International*, 2023a, 38(1): 2172217.
- Rampheri M B, Dube T, Dondofema F, et al. Progress in the remote sensing of groundwater-dependent ecosystems in semi-arid environments[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2023b, 130: 103359.
- Rohde M M, Biswas T, Housman I W, et al. A machine learning approach to predict groundwater levels in California reveals ecosystems at risk[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 784499.
- Rohde M M, Froend R, Howard J. A global synthesis of managing groundwater dependent ecosystems under sustainable groundwater policy[J]. *Groundwater*, 2017, 55(3): 293–301.
- Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, et al. Global patterns of drought recovery[J]. *Nature*, 2017, 548(7666): 202–205.
- Schymanski S J, Sivapalan M, Roderick M L, et al. An optimality-based model of the coupled soil moisture and root dynamics[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(3): 913–932.
- Simunek J I R K A, M Th Van Genuchten, M Sejna. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[J]. Technical manual, version 1 (2006): 241.
- Sperry J S, Hacke U G, Oren R, et al. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(2): 251–263.
- Wang J, Song C, Reager J T, et al. Recent global decline in endorheic basin water storages[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 926–932.
- Wang T Y, Wang P, Wang Z L, et al. Drought adaptability of phreatophytes: insight from vertical root distribution in drylands of China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2021, 14(6): 1128–1142.
- Wang T, Wang P, Wu Z, et al. Modeling revealed the effect of root dynamics on the water adaptability of phreatophytes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108959.
- Wang T, Wu Z, Wang P, et al. Plant-groundwater interactions in drylands: A review of current research and future perspectives[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 341: 109636.
- Xu C, McDowell N G, Fisher R A, et al. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 948–953.
- Xu W, Kong F, Mao R, et al. Identifying and mapping potential groundwater-dependent ecosystems for a semi-arid and semi-humid area in the Weihe River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127789.
- Yang J, He Z, Du J, et al. Uncertainty in ecohydrological modeling in an arid region determined with Bayesian methods[J]. *Plos One*, 2016, 11(3): e0151283.
- Yin L, Zhou Y, Xu D, et al. Response of phreatophytes to short-term groundwater pumping in a semiarid region: Field experiments and numerical simulations[J]. *Ecohydrology*, 2018, 11: e1948.
- Zhang Q, Kong D, Singh V P, et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 152: 1–11.
- Zhou Y, Wenninger J, Yang Z, et al. Groundwater–surface water interactions, vegetation dependencies and implications for water resources management in the semi-arid Hailu River catchment, China – a synthesis[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2013, 17(7): 2435–2447.
- Zimmerman O R, Pearce D W, Woodman S G, et al. Increasing contribution of alluvial groundwater to riparian cottonwood forest water use through warm and dry summers[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 329: 109292.