

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20195391

干旱区绿洲地下水生态水位阈值研究进展

翟家齐¹,董义阳^{1,2},祁生林³,赵勇¹,刘宽¹,朱永楠¹

(1.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;
2.清华大学 水利水电工程系,北京 100084; 3.北京市水影响评价中心,北京 100161)

摘要:地下水生态水位是干旱区绿洲水资源管理、地下水保护和生态环境保护的关键指标。从地下水生态水位的概念、确定方法、阈值区间等方面入手,综述了干旱区绿洲地下水生态水位研究的重要进展及未来发展建议:(1)干旱区绿洲地下水生态水位存在显著的多功能性和尺度特征;(2)生态调查统计与分析、模型计算分析和遥感统计分析是确定地下水生态水位的主要方法;(3)区域地下水埋深适合控制在2.0~4.0m,不同功能地下水埋深阈值差异显著,这种差异性主要受气候、下垫面植被、土壤、地质条件等因素影响;(4)建议加强多尺度、多维度的干旱区绿洲地下水生态水位阈值研究。

关键词:干旱区绿洲;地下水生态水位;阈值确定方法;植被地下水生态水位阈值;盐渍化地下水生态水位阈值;区域地下水生态水位阈值

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)01-0007-08

1 引言

在中国西北干旱区,绿洲面积虽不超过10%,但聚集了干旱区95%的人口和90%以上的经济财富,是干旱区最核心的地带^[1]。干旱区特殊的地理位置、气候条件及脆弱的生态环境,地下水成为制约绿洲经济社会发展和生态环境健康的核心资源,地下水位埋深直接影响干旱区植被的生长发育、盖度、年龄结构、种群构成与演替和生物多样性^[2],对维持绿洲健康稳定具有重要意义。当前,干旱区灌溉绿洲受人类活动影响剧烈,人工生态与天然生态交织共存,地表水-地下水相互转化频繁,绿洲地下水生态水位与绿洲陆面天然生态、人工生态和湖泊湿地密不可分,成为决定绿洲生态系统健康状态的关键因素。本文通过系统梳理地下水生态水位的概念及其影响因素,总结地下水生态水位确定方法和阈值的研究进展,以期判定维系绿洲生态

健康的科学边界,为开展干旱区绿洲地下水位调控等研究提供参考。

2 干旱区绿洲地下水生态水位的概念

地下水生态水位是诊断干旱区地下水依赖型生态系统健康的关键指标,也是揭示植被生态需水机理的重要依据^[3]。地下水生态水位一般是指既能满足乔木、灌木和草本等各类陆生植物生长发育吸收利用地下水的需求,同时又能避免土壤盐渍化或土地荒漠化的地下水位动态区间。

地下水位埋深变化会产生不同的生态效应,如埋深较浅时强烈的蒸发加剧水和盐分同步向地表运动,导致土壤盐渍化问题,而埋深过大则会影响植被对地下水的吸收利用甚至引起植被死亡及生态退化。因而从不同的生态功能需求出发,形成了对地下水生态水位的不同概念或侧重点,主要分三类:一是从保障干

收稿日期:2019-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51979284,52025093);中国水科院创新团队项目(WR0145B622017)

作者简介:翟家齐(1984-),男,河南信阳人,高级工程师,主要研究方向为平原区水循环模拟、农业节水潜力评估、区域干旱评估。E-mail: jiaqizhai@163.com

通讯作者:董义阳(1990-),男,河南信阳人,博士研究生,主要研究方向为平原区水循环模拟、生态水文模拟、水文气象统计分析。E-mail: dyy17@mails.tsinghua.edu.cn

旱区生态系统状态良好的水分需求出发而提出的地下水位或埋深,如适宜地下水埋深^[4-5]侧重维持生态较好的埋深区间,最佳潜水位埋深^[6]则突出阈值区间中的最佳埋深值,一般针对较具体的植被或植被群落系统,常见于植株尺度或植被群落尺度的地下水位研究。二是从防止干旱区土壤盐渍化或生态退化而提出的临界地下水位或埋深,如盐渍化临界地下水埋深^[7]、生态警戒地下水埋深^[8]等,侧重某一生态环境风险的防控临界。三是综合考虑多种生态功能的地下水位或埋深区间,如张惠昌提出的地下水生态平衡埋深^[9],指出不致发生植被退化、土地沙漠化和土壤盐渍化是判别干旱区地下水生态水位的关键约束;类似的还有地下水生态水位概念^[10],认为既可以是一个具体的值,也可以是对应不同生态需求的水位区间或变动带,由一系列生态环境要求的临界地下水位构成^[11],此类概念通常综合考虑了埋深过小带来的盐渍化问题和埋深过大带来的生态退化问题等多种生态功能需求,更适用于干旱区的区域性地下水位调控。目前虽然对地下水生态水位有着不同角度的阐释,但也形成了基本共识,即过高或过低的地下水位均不利于植物的生长或区域生态的稳定。

3 地下水生态水位确定方法的研究进展

干旱绿洲区地下水生态水位往往根据不同对象、不同功能和不同尺度的研究需求来确定。常见的确定方法主要包括生态调查统计与分析、模型计算分析和遥感统计分析三类(见表1)。生态调查统计与分析方法最为常见,通过样方调查等生态学方法获取植被群落盖度、频度、多度等信息,利用统计学模型定量分析植被参数与地下水位埋深间的函数关系,确定不同功能目标的地下水水位埋深^[12-16]。如程艳等^[12]、王威等^[15]采用植被样方调查获取研究区植被特征信息(多度、覆

盖度等),利用高斯模型将植被特征值和地下水埋深进行统计分析,确定适宜的地下水生态埋深;或者选取对数正态分布模型^[13]分析干旱区典型植物的适宜地下水埋深及其对环境因子的忍耐力;或采用植被结构图分析法^[16]统计分析地下水开发后生态植被出现演替的临界水位;也可直接采用实地样方调查的各物种出现频率或盖度统计结果,建立与水位埋深的关系曲线^[14]。该方法简单、直观、适用范围广泛,尤其适用于植被个体、群落及斑块尺度的地下水生态水位确定,但是野外调查费时费力、成本较高且样本的代表性和可靠性直接影响结果的准确性。

其次是基于模型计算确定地下水生态水位,即利用数学模型来模拟地下水位与植被指数或依据土壤毛管水上升理论计算合适的埋深值,再通过情景对比分析、实地验证确定目标下的地下水埋深^[17-21]。如 Zhao 等^[17]采用地下水数值模型 FEFLOW 模拟灌溉和地下水开采条件下的地下水位变化,结合 GIS 技术分析植被空间变化特征,得到冲洪积平原区和边缘区的地下水临界水位;或利用地下水数值模型 MODFLOW^[19],耦合植被生长模型,建立地下水与植被生态之间的数量关系,以此分析盐渍化地下水水位、适宜地下水生态水位;或基于根系层厚度和潜水活动层厚度,采用理论公式法、经验公式法计算毛管水上升高度,确定地下水补给植被的临界埋深^[21];或直接构建生态水文模型^[20],建立植被与地下水的相互作用关系。此类方法基于水量平衡、能量平衡和物质平衡原理,理论性较强,可分析多种时空尺度的生态水文过程,定量解析不同因子的作用机理、预测未来可能的变化趋势,已成为目前研究地下水生态水位的趋势,其不足在于所需数据信息多、参数多和过程复杂,需要有充分的试验观测信息进行校核验证。

第三种是基于高精度遥感信息的统计分析方法,

表1 地下水生态水位的确定方法比较

Table1 The comparison of determination methods of ecological groundwater level

方法分类	关键参数	确定方法	应用区域	参考文献
生态调查统计与分析	植被盖度、频度地下水埋深	①高斯模型 ②对数正态分布模型 ③正偏态对数正态分布模型	玛纳斯河流域、额济纳旗、塔里木河流域、鄂尔多斯	文献[12-16]
模型计算分析	植被指数地下水埋深	①构建模型计算地下水位与植被参数 ②统计地下水位与植被生态之间的定量关系	黑河流域、额尔齐斯河流域、西辽河流域、澳大利亚半干旱区平原	文献[17-20]
	毛管水最大上升高度土壤有效孔径	①毛管水上升高度理论公式 ②当量孔径的定量计算公式	科尔沁草原	文献[21]
遥感统计分析	植被指数地下水埋深	基于遥感数据统计植被指数与地下水位之间的定量关系	银川平原、额济纳河流域、内蒙古中西部	文献[22-24]

即运用多源遥感卫星数据获取植被指数与地下水位等空间数据,结合地面定点观测,探索地下水埋深与植被状态之间的量化关系,以此确定合理的地下水埋深^[22-24]。该方法在银川平原^[22]、额济纳沿河及支流密集区^[23]、内蒙古荒漠草原区^[24]等区域得到应用,探讨了植被与地下水的空间相关关系。该方法适用于大尺度研究地下水与植被生态关系,结果受遥感数据的时空精度影响较大,但随着此类新技术方法的不断进步成熟,将是未来发展趋势之一。

4 干旱区绿洲地下水生态水位阈值研究进展

干旱区绿洲生态系统是一种典型的地下水依赖型生态系统^[25-26]。保障植被生长所需水分和防止土壤盐渍化是干旱区绿洲生态系统健康持续的基本需求,也决定了地下水生态水位下限值与上限值,即一个合理的地下水水位变动区间^[27-28]。受气候要素、地质结构、地

形地貌、土壤和植被条件等多重因素的影响^[10],不同地区、不同植物的适宜地下水埋深差异显著,为了系统总结不同研究对阈值的认识与量化成果,本文按照陆面天然植被、农田作物、土壤盐渍化和区域尺度四个方面对适宜埋深阈值的研究情况进行全面梳理,结果见表2。

4.1 陆面天然植被的适宜埋深阈值

干旱区绿洲代表性的天然植被主要为乔木、灌木和草本植被,通常分类选取不同类型的代表性植被进行试验观测和分析(见表2)。其中,乔木类植被中,胡杨、梭梭、沙枣等相关研究最为常见,统计分析不同学者的研究结果发现:胡杨适宜的地下水埋深阈值 1.0~4.7m,主要分布于新疆塔里木河流域、甘肃疏勒河流域和石羊河流域、内蒙古额济纳绿洲,其阈值上限、下限存在显著的区域性差异;梭梭的埋深阈值 1.8~7.0m,上下限差别较大,分布较为广泛,在新疆、甘肃、

表2 不同地区、不同植被的地下水生态水位阈值统计

Table2 The statistics of ecological groundwater level threshold in different regions and different vegetation

分项	植被类型	出现区域及适宜地下水埋深阈值
乔木	胡杨	①新疆塔里木河流域:3.0~4.7m ^[29-34] ;②甘肃疏勒河流域:1.0~4.0m ^[35] ;③石羊河流域荒漠绿洲区:2.5~3.5m ^[36] ;④内蒙古额济纳绿洲:2.5~4.0m ^[13,37] ;
	梭梭	①新疆吐鲁番盆地:2.5~7.0m ^[38,39] ;②甘肃石羊河荒漠绿洲区:2.0~4.0m ^[40] ;③青海柴达木盆地:3.0~4.0m ^[41] ;④内蒙古乌兰布和沙漠:1.8~4.0m ^[42] ;
	沙枣	①甘肃石羊河下游:2.0~3.0m ^[9] ;②甘肃疏勒河流域:1.0~3.0m ^[35] ;③内蒙古额济纳绿洲:2.0~3.0m ^[37] ;
陆面天然植被或群落	柽柳	①新疆玛纳斯河谷:1.0~5.3m ^[12] ;②新疆准噶尔盆地:2.3~5.0m ^[43] ;③新疆塔里木河下游:3.5~4.0m ^[30] ;④新疆焉耆盆地绿洲:3.0m左右 ^[4] ;⑤甘肃石羊河下游:2.0~5.0m ^[8-9,36] ;⑥甘肃疏勒河流域:1.0~6.0m ^[35] ;⑦内蒙古额济纳绿洲:<5.0m ^[37] ;⑧青海柴达木盆地:3.0~5.0m ^[41,44] ;
	白刺	①甘肃石羊河下游:<5.0m ^[9] ;②甘肃疏勒河流域:2.0~3.5m ^[35] ;③青海柴达木盆地:1.0~4.1m ^[41,44] ;④内蒙古乌兰布和沙漠:1.8~4.0m ^[42] ;
	骆驼刺	①新疆塔里木河:3.0~4.0m ^[29,31] ;②甘肃疏勒河流域:1.0~4.0m ^[35] ;③青海柴达木盆地:3.1~4.2m ^[44] ;④内蒙古额济纳旗:2.84m左右 ^[13] ;
	罗布麻	①新疆塔里木河干流区:1.5~3.0m ^[29,31] ;②甘肃疏勒河流域:1.0~4.0m ^[35] ;③内蒙古额济纳绿洲:2.51m ^[13] ;④青海柴达木盆地:1.0~3.0m ^[41] ;
	沙柳	内蒙古鄂尔多斯湖盆高原:1.5~5.0m ^[45] ;
草本	芦苇	①新疆玛纳斯河谷:0~1.6m ^[12] ;②新疆塔里木河干流区:<2.5m ^[29,31] ;③新疆阜康北沙窝:2.0m左右 ^[46] ;④新疆准噶尔盆地:2.3~4.0m ^[43] ;⑤甘肃省临泽县北部:1.5~4.0m ^[47] ;⑥青海柴达木盆地:1.5~3.1m ^[41,44] ;⑦内蒙古额济纳绿洲:1.36m左右 ^[13] ;
	芨芨草	①新疆玛纳斯河谷:0.5~1.7m ^[12] ;②黑河流域:3.0~4.0m ^[31] ;③内蒙古鄂尔多斯湖盆高原:1.0~3.0m ^[45] ;④青海柴达木盆地:0.8~3.4m ^[41,44] ;
	甘草	①新疆塔里木河干流区:1.5~3.5m ^[29,31] ;②内蒙古额济纳绿洲:2.39m左右 ^[13] ;③甘肃疏勒河流域:1.0~3.0m ^[35] ;
农田作物	小麦	内蒙古河套灌区:1.4~2.0m ^[48-49] ;
	玉米	①内蒙古河套灌区:1.5~2.5m ^[48-50] ;②宁夏青铜峡灌区:1.2~1.55m ^[51-52] ;
	葵花	内蒙古河套灌区:1.2~2.5m ^[48-50] ;
	棉花	新疆巴州灌溉试验站:1.5~3.0m ^[53] ;
盐渍化	①新疆伊犁河流域:2.06~2.24m ^[54] ;②新疆焉耆盆地绿洲:2.5~3.0m ^[4] ;③新疆天山北麓平原区:≥3m ^[55] ;④内蒙古河套灌区:≥2.0m ^[56] ;⑤青海柴达木盆地:2.5~3.0m ^[57] ;⑥乌兹别克斯坦 Amu 河流域:≥1.5m ^[58] ;⑦新疆阿克兰干地区:1.93~2.7m ^[59] ;⑧宁夏青铜峡河西灌区:2~2.5m ^[60] ;	
区域尺度	①新疆塔里木河流域:2.0~6.0m ^[34,61-62] ;②新疆吐鲁番盆地:2.5~3.5m ^[39] ;③甘肃石羊河流域:2.0~5.0m ^[9] ;④黑河流域:2.0~4.0m ^[63] ;⑤内蒙古额济纳绿洲:2.0~5.0m ^[1,13] ;⑥内蒙古鄂尔多斯高原:2.0~4.5m ^[10] ;⑦内蒙古通辽地区:2.0~2.4m ^[64] ;⑧青海柴达木盆地:1.5~4.0m ^[44,65] ;⑨宁夏银川平原:2.0~4.0m ^[66] 。	

青海、内蒙古均有研究;沙枣的埋深阈值 1.0~3.0m, 相关研究主要集中在甘肃的绿洲区, 其适宜的阈值下限为 3.0m。灌木类植被中, 怪柳、白刺、骆驼刺、罗布麻、沙柳研究较多, 其中怪柳广泛分布于新疆、甘肃、内蒙古、青海等干旱区域, 其适宜的地下水埋深阈值 1.0~6.0m; 其他几种灌木植被的埋深上限值为 1.0m、下限值在 4.0~5.0m。草本类则以芦苇、芨芨草和甘草的研究最多, 其中芦苇广泛分布于西北地区, 种类也较多, 埋深 4.0m 范围内都能较好生长, 芨芨草的适宜埋深在 0.5~4.0m 之间, 甘草 1.0~3.5m。对比不同类型植被在不同区域的埋深阈值可看出(见表 2), 即便是同一种植被, 其适宜的地下水埋深阈值存在显著差异, 如怪柳的埋深阈值上下限之差达到 5.0m 之多, 气候、土壤、植被属性及年龄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。

4.2 农田作物的适宜埋深阈值

围绕作物的适宜地下水埋深研究多集中在地下水埋深较浅、蒸发强烈的地区, 如宁夏引黄灌区、内蒙古河套灌区以及新疆灌溉绿洲, 该区域的特点是灌溉引水量大、灌区平均地下水埋深一般在 2.5m 以内, 地下水是作物生长的水分重要来源之一, 合理的地下水位能够增加玉米、小麦、葵花、棉花等地下水利用量、减少灌溉水量, 其中小麦适宜埋深 1.4~2.0m、玉米 1.2~2.5m、葵花 1.2~2.5m、棉花 1.5~3.0m(见表 2)。由于灌溉水源的存在, 在灌溉有保证的条件下作物的用水需求基本能够满足, 即便没有地下水补充也能够正常生长, 但地下水位的高低能够显著影响灌溉水量, 研究显示, 地下水对作物耗水具有一定的补偿作用, 地下水埋深越大, 则所需的灌溉定额越大, 埋深从 1.5m 增至 3.0m, 相应的灌溉定额增加 67%^[53], 当地下水埋深大于 3m 时, 地下水对表层 1m 土体已基本没有补给^[67]。总的来看, 农田作物用水主要来自灌溉和降水, 地下水只起到补充作用, 地下水埋深对农作物的影响有限, 但从灌溉效率角度看, 维持适宜的埋深能够有效降低灌水定额、保障作物生长用水需求。

4.3 土壤盐渍化的适宜埋深阈值

蒸发强烈、地下水埋深小的区域普遍会面临盐渍化的问题, 如新疆、内蒙古、甘肃、青海、宁夏等地。土壤盐渍化与地下水埋深关系密切, 主要通过潜水蒸发作用将溶解在潜水中的盐分带到土壤表层并聚集, 而潜水蒸发量随着埋深的增大而减少, 国内基于调查试验

与遥感反演的相关研究认为防止土壤盐渍化的埋深应当控制在 2.0~3.0m 以上, 基于潜水影响层厚度的理论分析结果认为, 黑河中下游平原区绿洲灌区内部分次生盐碱化地下水临界埋深为 1.29m; 也有学者在乌兹别克斯坦的研究认为埋深大于 1.5m 即可有效控制盐渍化问题(见表 2)。土壤盐渍化问题的时空差异性主要与土壤质地、地下水埋深、地下水矿化度、植被状况及灌溉水质有关^[54, 56-57]。

4.4 区域尺度地下水生态水位阈值

地下水埋深受自然因素(气候变化、地形地貌以及土壤等)^[10, 68]和人为因素(下垫面条件改变、灌溉和地下水开采等)^[69-70]的多重影响, 不同地区适宜的地下水生态水位埋深差异显著。因此, 区域尺度的地下水埋深阈值通常综合考虑区域水文地质特点、植被生态、土壤盐渍化和农业生产等多方面因素^[27-28, 48, 61, 66], 确定相对合理的地下水生态水位阈值区间, 如新疆地区普遍认为埋深上限应大于 2.0m, 而下限则在 3.5~6.0m 区间浮动; 甘肃、内蒙古、宁夏和青海等地的灌溉绿洲总体应当控制在 2.0~4.0m 较为适宜, 局部上限可以扩至 0.5m, 下限达到 5.0m。

5 展望

综上, 地下水生态水位是干旱区绿洲水资源与生态调控的关键性要素, 目前已经在地下水生态水位的定义、确定方法和阈值区间等方面取得了丰富的研究成果, 也为干旱区地下水依赖性生态系统的深入研究奠定了很好的基础。但也必须看到, 地下水生态水位涉及多领域交叉研究, 目前各领域的交叉融合仍然是短板, 在实践应用中还面临如何结合区域自然地理、水文气象和植被生态条件等选取合理调控阈值等诸多难题, 亟待加强多尺度、多维度交叉的干旱绿洲地下水生态水位阈值研究, 充分利用现代水文、气象、生态信息监测技术, 在横向尺度上将植被个体、群落尺度的研究认知进一步延伸至斑块尺度和绿洲尺度, 在纵向类别上构建天然植被、河湖湿地、农田作物、人工林草、城市景观等多维度地下水生态水位阈值空间, 为区域水资源管理、农业生产、生态保护等提供科学判别依据。

参考文献:

- [1] 赵文智, 常学礼. 河西走廊水文过程变化对荒漠绿洲过渡带 NDVI 的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7):1561-1571. (ZHAO Wenzhi, CHANG Xueli. Effect of hydrologic process changes on NDVI in desert-oasis ecotone of Hexi corridor [J]. Science China:

- Earth Sciences, 2014,44(7):1561–1571. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] Kopeć D, Michalska–Hejduk D, Krogulec E. The relationship between vegetation and groundwater levels as an indicator of spontaneous wetland restoration [J]. Ecological Engineering, 2013,57: 242–251.
- [4] 王水献, 吴彬, 杨鹏年, 等. 焉耆盆地绿洲灌区生态安全下的地下水埋深合理界定[J]. 资源科学, 2011,33(3):422–430. (WANG Shuixian, WU Bin, YANG Pengnian, et al. Determination of the ecological groundwater depth considering ecological integrity over oasis irrigation areas in the Yanqi Basin [J]. Resources Science, 2011,33(3):422–430. (in Chinese))
- [5] Rossatto D R, Silva L D C R, Villalobos–Vega R, et al. Depth of water uptake in woody plants relates to groundwater level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012,77(2): 259–266.
- [6] 高长远. 干旱区潜水位最佳埋深值的确定[J]. 地下水, 2000,(3): 105–106. (GAO Changyuan. Determination of the best buried depth value in the arid zone [J]. Groundwater, 2000,(3):105–106. (in Chinese))
- [7] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012,32(4):1202–1210. (GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al. Spatio–temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(4):1202–1210. (in Chinese))
- [8] 樊自立, 陈亚宁, 李和平, 等. 中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度的确定[J]. 干旱区资源与环境, 2008,22(2):1–5. (FAN Zhili, CHEN Yaning, LI Heping, et al. Determination of suitable ecological groundwater depth in arid areas in North west part of China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008,22(2):1–5. (in Chinese))
- [9] 张惠昌. 干旱区地下水生态平衡埋深[J]. 勘察科学技术, 1992,(6): 9–13. (ZHANG Huichang. The groundwater deep of ecological balance in arid areas [J]. Site Investigation Science and Technology, 1992,(6):9–13. (in Chinese))
- [10] 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 Yinhui, et al. Research advances in ecological groundwater level in arid areas [J]. Ecological Science, 2015,34(2):187–193. (in Chinese))
- [11] Xin P, Kong J, Li L, et al. Modelling of groundwater–vegetation interactions in a tidal marsh [J]. Advances in Water Resources, 2013,57(2):52–68.
- [12] 程艳, 陈丽, 阴俊齐, 等. 玛纳斯河谷水源植被生态水位区间研究[J]. 环境科学与技术, 2018,41(2): 26–33. (CHENG Yan, CHEN Li, YIN Junqi, et al. Depth interval study of vegetation ecological groundwater in the water source area at Manaz River valley [J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(2):26–33. (in Chinese))
- [13] 张丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究[J]. 中国沙漠, 2004,24(1):110–114. (ZHANG Li, DONG Zengchuan, HUANG Xiaoling. Modeling on relation between major plants growth and groundwater depth in arid area [J]. Journal of Desert Research, 2004,24(1):110–114. (in Chinese))
- [14] Chen Y N, Zilliacus H, Li W H, et al. Ground–water level affects plant species diversity along the lower reaches of the Tarim river, Western China [J]. Journal of Arid Environments, 2006,66(2):231–266.
- [15] 王威, 苏小四, 王小元. 地下水开采下的植被生态风险评估—以鄂尔多斯乌兰淖地区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010,40(6):1344–1352. (WANG Wei, SU Xiaosi, WANG Xiaoyuan. Vegetation ecological risk assessment research under the impact of groundwater withdraw: A case study of Wulannaο Area, Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010,40(6):1344–1352. (in Chinese))
- [16] 张二勇, 陶正平, 王晓勇, 等. 基于植被结构分析法的生态植被与地下水关系研究[J]. 中国地质, 2012,39(3):811–817. (ZHANG Eryong, TAO Zhengping, WANG Xiaoyong, et al. A study of vegetation response to groundwater on regional scale in northern Ordos Basin based on structure chart method [J]. Geology in China, 2012,39(3):811–817. (in Chinese))
- [17] Zhao C Y, Wang Y C, Chen X, et al. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software [J]. Ecological Modelling, 2005,187(2–3):341–351.
- [18] Li X, Zheng Y, Sun Z, et al. An integrated ecohydrological modeling approach to exploring the dynamic interaction between groundwater and phreatophytes [J]. Ecological Modelling, 2017,356(24):127–140.
- [19] Doble R, Simmons C, Jolly I, et al. Spatial relationships between vegetation cover and irrigation–induced groundwater discharge on a semi–arid floodplain, Australia [J]. Journal of Hydrology, 2006,329(1–2).
- [20] Chui T F M, Low S Y, Liang S Y. An ecohydrological model for studying groundwater–vegetation interactions in wetlands [J]. Journal of Hydrology, 2011,409(1–2):291–304.
- [21] 陈敏建, 张秋霞, 汪勇, 等. 西辽河平原地下水补给植被的临界埋深[J]. 水科学进展, 2019,30(1):24–33. (CHEN Minjian, ZHANG Qiuxia, WANG Yong, et al. Critical depth of recharge of the vegetation by groundwater in the West Liaohe Plain [J]. Advances in Water Science, 2019,30(1):24–33. (in Chinese))
- [22] 孙宪春, 金晓媚, 万力. 地下水对银川平原植被生长的影响[J]. 现代地质, 2008,22(2):321–324. (SUN Xianchun, JIN Xiaomei, WAN Li. Effect of groundwater on vegetation growth in Yinchuan Plain [J]. Geoscience, 2008,22(2):321–324. (in Chinese))

- [23] 王义, 王胜利, 冯学武, 等. 额济纳河干流及下游支流密集区地下水水位控制深度[J]. 农业工程学报, 2011,27(7):101-106. (WANG Yi, WANG Shengli, FENG Xuewu, et al. Controlling depth of groundwater tables along mainstream and in downstream tributary-intensive areas of Ejina River [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(7):101-106. (in Chinese))
- [24] Song Y F, Guo Z X, Lu Y J. Pixel-level spatiotemporal analyses of vegetation fractional coverage variation and its influential factors in a desert steppe: A case study in Inner Mongolia, China [J]. Water, 2017,9(7):478.
- [25] Bertrand G, Goldscheider N, Gobat J M, et al. Review: From multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems [J]. Hydrogeology Journal, 2012,20(1):5-25.
- [26] 刘鹤, 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. (in Chinese))
- [27] Runyan C W, D'odorico P. Ecohydrological feedbacks between salt accumulation and vegetation dynamics: Role of vegetation groundwater interactions [J]. Water Resources Research, 2010,46(11):W11561.1-W11561.11.
- [28] Wang P, Zhang Y, Yu J, et al. Vegetation dynamics induced by groundwater fluctuations in the lower Heihe River Basin, Northwestern China [J]. Journal of Plant Ecology, 2011,4(1/2):77-90.
- [29] 王芳, 梁瑞驹, 杨小柳, 等. 中国西北地区生态需水研究(1)—干旱半干旱地区生态需水理论分析[J]. 自然资源学报, 2002,(1):1-8. (WANG Fang, LIANG Ruiju, YANG Xiaoliu, et al. A study of ecological water requirements in northwest China I: theoretical analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2002, (1):1-8. (in Chinese))
- [30] 陈亚宁, 王强, 李卫红, 等. 植被生理生态学数据表征的合理地下水水位研究—以塔里木河下游生态恢复过程为例[J]. 科学通报, 2006,(S1):7-13. (CHEN Yaning, WANG Qiang, LI Weihong, et al. Research on rational groundwater level represented by vegetation physiological and ecological data—a case study of ecological restoration process in the lower reaches of Tarim River [J]. Chinese Science Bulletin, 2006,(S1):7-13. (in Chinese))
- [31] 郭占荣, 刘花台. 西北内陆盆地天然植被的地下水生态埋深[J]. 干旱区资源与环境, 2005,(3):157-161. (GUO Zhanrong, LIU Huatai. Eco-depth of groundwater table for natural vegetation in Inland Basin, Northwestern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005,(3):157-161. (in Chinese))
- [32] 叶茂, 徐海量, 龚君君, 等. 不同胸径胡杨径向生长的合理生态水位研究[J]. 地理科学, 2011,31(2):172-177. (YE Mao, XU Hailiang, GONG Junjun, et al. Rational ecological groundwater level of populus euphratica with different diameter in lower reaches of Tarim River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(2):172-177. (in Chinese))
- [33] 徐梦辰, 陈永金, 刘加珍, 等. 塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态[J]. 生态学报, 2016,36(9):2646-2655. (XU Mengchen, CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, et al. The distribution pattern dynamics of Populus euphratica are influenced by hydrology in the middle reaches of Tarim River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(9):2646-2655. (in Chinese))
- [34] 韩路, 王海珍, 牛建龙, 等. 荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水水位梯度的响应[J]. 生态学报, 2017,37(20):6836-6846. (HAN Lu, WANG Haizhen, NIU Jianlong, et al. Response of Populus euphratica communities in a desert riparian forest to the groundwater level gradient in the Tarim Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(20):6836-6846. (in Chinese))
- [35] 马兴华, 王桑. 甘肃疏勒河流域植被退化与地下水水位及矿化度的关系[J]. 甘肃林业科技, 2005,(2):53-54. (MA Xinghua, WANG Sang. Relationship between vegetation degradation and groundwater level and salinity in Shule River Basin, Gansu Province [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2005,(2):53-54. (in Chinese))
- [36] 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. (YANG Jin. Study on the relationship between vegetation and groundwater depth in the Desert oasis area of Shiyang River Basin [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2018,54(12):1-4. (in Chinese))
- [37] 孙雅琦. 黑河下游生态需水及生态调度研究[D]. 西安:西北大学, 2017. (SUN Yaqi. The Study on the Ecological Water Requirement and Ecological Operation in the Lower Reaches of Heihe River for Ecological Conservation and Restoration [D]. Xi'an: Northwest University, 2017. (in Chinese))
- [38] 赵顺阳, 王文科. 艾比湖流域典型植物生长的水文地质条件研究[J]. 新疆环境保护, 2005,(1):13-17. (ZHAO Shunyang, WANG Wenke. Research on hydrogeological condition of Aibi lake valley typical plant growth [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2005,(1):13-17. (in Chinese))
- [39] 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. (in Chinese))
- [40] 徐先英. 石羊河下游绿洲—荒漠过渡带典型固沙植被生态水文效应研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008. (XU Xianying. Eco-hydrological Responses on Dominated Sand-fixing Vegetations in the Transitional Zone From Oasis to Desert in the Lower Reaches of Shiyang River [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese))
- [41] 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. (in Chinese))

- [42] 马媛. 西北沙漠湖盆区毛细水上升特性及其植物生态学意义—以乌兰布和沙漠吉兰泰湖盆区为例[D]. 西安:长安大学, 2012. (MA Yuan. The Characteristics of the Capillary Water Rise and Its Plant Ecological Significance in Northwest Desert Lake-basin region—Take the Jilantai Lake-basin of Ulan Buh Desert for Example [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese))
- [43] 吴明辉, 宁虎森, 王让会, 等. 克拉玛依地区减排林地下水动态变化及合理生态水位分析[J]. 水土保持通报, 2010,30(4):129-133. (WU Minghui, NING Husen, WANG Ranghui, et al. Dynamic Change of groundwater and reasonable ecological groundwater level in karamay artificial carbon-dioxide-capture forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010,30(4):129-133. (in Chinese))
- [44] 古兵华. 格尔木地区生态服务功能价值评估及其对地下水资源管理的意义[D]. 北京:中国地质大学, 2018. (GU Binghua. Valuation of Ecosystem Services in Golmud Area and Its Significance to Groundwater Resources Management [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))
- [45] 李瑛. 鄂尔多斯湖盆高原地下水与植被生态关系研究[D]. 西安:长安大学, 2009. (LI Ying. Study on Relations between Groundwater and Vegetation Ecology in the Erdos Lake and Basin Plateau [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese))
- [46] 玛丽娅·奴尔兰, 刘卫国, 霍肇颂, 等. 旱生芦苇对地下水水位变化的生态响应及适应机制 [J]. 生态学报, 2018,38 (20):7488-7498. (Maria ·Nurlan, LIU Weiguang, HUO Jusong, et al. Ecological response and adaptation mechanism of Phragmites australis to changes in groundwater level [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38 (20):7488-7498. (in Chinese))
- [47] 赵文智, 常学礼, 李启森, 等. 荒漠绿洲区芦苇种群构件生物量与地下水埋深关系[J]. 生态学报, 2003,(6):1138-1146. (ZHAO Wenzhi, CHANG Xueli, LI Qisen, et al. Relationship between structural component biomass of reed population and ground water depth in desert oasis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,(6):1138-1146. (in Chinese))
- [48] 张义强, 白巧燕, 王会永. 河套灌区地下水适宜埋深、节水阈值、水盐平衡探讨[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(S2):83-86. (ZHANG Yiqiang, BAI Qiaoyan, WANG Huiyong. Discussion on suitable depth of groundwater level, water-saving threshold and water-salt balance in Hetao irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(S2):83-86. (in Chinese))
- [49] 常春龙. 河套灌区农田生态地下水埋深及不同种植模式作物最适灌水量研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015. (CHANG Chunlong. Research on Ecological Groundwater Depth and the Optimum Irrigation Amount for Different Crop Planting Patterns in Hetao Irrigation District [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese))
- [50] 孔繁瑞, 屈忠义, 刘雅君, 等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009,(5):44-48. (KONG Fanrui, QU Zhongyi, LIU Yajun, et al. Experimental research on the effect of different kinds of groundwater buried depth on soil water, salinity and crop growth [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009,(5):44-48. (in Chinese))
- [51] 程献国, 张霞, 姜丙洲. 宁夏青铜峡灌区适宜节水阈值研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010,21(5):83-86. (CHENG Xianguo, ZHANG Xia, JIANG Bingzhou. Research on appropriate water saving threshold in Qingtongxia irrigation district of Ningxia autonomous region [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010,21(5):83-86. (in Chinese))
- [52] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报, 2014,30(20):128-136. (HAO Yuanyuan, XU Xu, HUANG Quanzhong, et al. Modeling soil water-salt dynamics and maize yield responses to groundwater depths and irrigations [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(20):128-136. (in Chinese))
- [53] 杨鹏年, 吴彬, 王水献, 等. 干旱区不同地下水埋深膜下滴灌灌溉制度模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014,32(3):76-82. (YANG Pengnian, WU Bin, WANG Shuixian, et al. Research on irrigation schedule of cotton drip irrigation under plastic film based on the different ground water table in arid areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014,32(3):76-82. (in Chinese))
- [54] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 等. 伊犁河流域土壤盐渍化对地下水特征的响应[J]. 水文, 2012,32(6):14-20. (Mamattursun EZIZ, Hamid YIMIT, Zulpiya MAMAT, et al. The response of soil salinization to characters of groundwater in Ili river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(6):14-20. (in Chinese))
- [55] 荆晶. 天山北麓平原区地下水及包气带与表生生态环境关系研究[D]. 西安:长安大学, 2007. (JING Jing. Study on Relationship between Groundwater and Vadose Zone and Supergene Eco-environment in the Plain Area of North Part of Tianshan Mountain [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))
- [56] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018,34(1):102-109. (HUANG Quanzhong, XU Xu, LV Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District [J]. Transactions of the CSAE, 2018,34 (1):102-109. (in Chinese))
- [57] 王秀红, 胡双熙. 柴达木盆地农田土壤盐渍化特征及其防治对策研究[J]. 干旱区资源与环境, 1998,(4):75-85. (WANG Xiuhong, HU Shuangxi. Characteristics and amelioration of farm land salinized soils in the Qaidam Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998,(4):75-85. (in Chinese))
- [58] Ibrakhimov M, Khamzina A, Forkutsa I, et al. Groundwater table and salinity: Spatial and temporal distribution and influence on soil salinization in Khorezm region (Uzbekistan, Aral Sea Basin) [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2007,21(3):219-236.
- [59] 李明, 宁立波, 卢天梅. 土壤盐渍化地区地下水临界深度确定及其水位调控[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(5):46-50. (LI Ming, NING Libo, LU Tianmei. Determination and the control of critical groundwater table in soil salinization area [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015,34(5):46-50. (in Chinese))

- [60] 高正夏, 李景波, 刘震, 等. 宁夏青铜峡河西灌区地下水调控标准研究(一)[J]. 水资源保护, 2002,(4):15-17+35-66. (GAO Zhengxia, LI Jingbo, LIU Zhen, et al. Study on groundwater Regulation standards in Hexi Irrigated Area, Qingtongxia, Ningxia (I) [J]. Water Resources Protection, 2002,(4):15-17+35-66. (in Chinese))
- [61] 樊自立, 马英杰, 张宏, 等. 塔里木河流域生态地下水水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理, 2004,(1):8-13. (FAN Zili, MA Yingjie, ZHANG Hong, et al. Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River drainage basin [J]. Arid Land Geography, 2004,(1):8-13. (in Chinese))
- [62] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 塔里木河下游优势草本植物与地下水埋深的关系[J]. 中国沙漠, 2016,36(1):216-224. (WANG Xiyi, XU Hailiang, PAN Cunde, et al. Relation of dominant herbaceous plant species to groundwater depth in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2016,36(1):216-224. (in Chinese))
- [63] 席海洋, 冯起, 司建华, 等. 黑河下游绿洲 NDVI 对地下水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. (in Chinese))
- [64] 孟婧莹, 康博, 杨浩北, 等. 基于 GIS 平台的地下水埋深与植被盖度响应关系研究[J]. 节水灌溉, 2012,(6):30-34. (MENG Jingying, KANG Bo, YANG Haobei, et al. Response relations between groundwater level depths and vegetation coverage based on GIS [J]. Water Saving Irrigation, 2012,(6):30-34. (in Chinese))
- [65] 管子隆, 吕爱锋, 贾绍凤, 等. 格尔木河中游地区植被覆盖与地下水埋深关系研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018,16(3):86-93. (GUAN Zilong, LV Aifeng, JIA Shaofeng, et al. Study on the relationship between vegetation cover and groundwater depth in the middle reaches of Golmud River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018,16(3):86-93. (in Chinese))
- [66] 金晓媚, 薛忠歧, 余秋生, 等. 银川平原地下水资源开发与植被变化[J]. 水文地质工程地质, 2007,(3). (JIN Xiaomei, XUE Zhongqi, YU Qiusheng, et al. Groundwater resources development and variation in vegetation and in the Yinchuan Plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007,(3). (in Chinese))
- [67] 左强, 李保国, 杨小路. 蒸发条件下地下水对 1m 土体水分补给的数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 1999,4(1):37-42. (ZUO Qiang, LI Baoguo, YANG Xiaolu. Recharge of ground water to soil 1m below the surface—Numerical simulation and analysis of soil water flux [J]. Journal of China Agricultural University, 1999,4(1):37-42. (in Chinese))
- [68] Klove B, Ala-aho P, Bertrand G, et al. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems [J]. Journal of Hydrology, 2014,518:250-266.
- [69] Zurek A J, Witczak S, Dulinski M, et al. Quantification of anthropogenic impact on groundwater -dependent terrestrial ecosystem using geochemical and isotope tools combined with 3-D flow and transport modeling [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015,19(2):1015-1033.
- [70] 李福林, 陈华伟, 王开然, 等. 地下水支撑生态系统研究综述[J]. 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. (in Chinese))

Advances in Ecological Groundwater Level Threshold in Arid Oasis Regions

ZHAI Jiaqi¹, DONG Yiyang^{1, 2}, QI Shenglin³, ZHAO Yong¹, LIU Kuan¹, ZHU Yongnan¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Water Impact Assessment Center, Beijing 100161, China)

Abstract: The ecological groundwater level is the key index of water resource management, groundwater and ecological environment protection in arid oasis regions. Starting from the concept, determination method, threshold interval, regulation mechanism and method of ecological groundwater level, this paper summarized the important progress and future development suggestions of groundwater ecological level and its regulation method in arid oasis regions. The results show that, (1) ecological groundwater level in arid oasis regions has significant multi-functional and scale characteristics; (2) ecological survey statistics and analysis, hydrological simulation analysis and remote sensing statistical analysis are the primary methods to determine ecological groundwater level; (3) the groundwater depth in the area is suitable to be controlled between 2.0 and 4.0m. there are significant differences in the threshold values of groundwater depth for vegetation with different functions, which is affected by many factors such as climate, vegetation, soil and geological conditions on the underlying surface; (4) it is suggested to strengthen the research on multi-scale and multi-dimensional threshold of ecological groundwater level in arid oasis regions.

Key words: arid oasis regions; ecological groundwater level; the threshold-deciding method; threshold of vegetation ecological groundwater level; threshold of salinization ecological groundwater level; threshold of regional ecological groundwater level