

# 地下水与植被关系的研究进展

马玉蕾<sup>1,2</sup>, 王德<sup>1</sup>, 刘俊民<sup>2</sup>, 温小虎<sup>3</sup>, 高猛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海岸带研究所, 山东烟台 264003; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 地下水与植被之间有着复杂的关系, 它涉及地下水、土壤、植被等相互之间的动态平衡。地下水的变化会引起土壤盐变化而直接影响植被的生长、分布和演替。本文系统地总结了地下水与土壤含水量、土壤含盐量、天然植被、地表荒漠化关系等诸多方面的影响研究进展, 并探讨了生态地下水埋深对植被的重要作用。认为针对地下水变化引起的生态负效应, 开展地下水与植被的关系研究, 认识和理解植被退化的过程和机制, 是应对气候变化和人类活动影响下地下水管理和生态保护的重要工具, 最后指出地下水生态效应仍是今后亟需加强的研究方向。

**关键词:** 地下水; 植被; 土壤含盐量; 土壤含水量; 生态地下水埋深

中图分类号: S273.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)05-0036-05

## Research progress on relation between groundwater and vegetation

MA Yulei<sup>1,2</sup>, WANG De<sup>1</sup>, LIU Junmin<sup>2</sup>, WEN Xiaohu<sup>3</sup>, GAO Meng<sup>1</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** There is a complex relation between groundwater and vegetation, which involves dynamic balance between groundwater, soil and vegetation. The change of groundwater can cause the transport of water-salt in soil, this outcome influences the growth, distribution and succession of vegetation. This paper firstly summarized the current progress of study on relation between groundwater and soil moisture, soil salinity, vegetation, surface desertification etc. Secondly, it studied the important role of rational groundwater depth on vegetation. The study on relationship between groundwater and vegetation and understanding of vegetation degradation process and mechanism aimed at ecological negative effects caused by groundwater are an important tool important of groundwater management and ecosystem protection so as to cope with future climate change and human activity. Finally, it indicated that eco-effects caused by groundwater is still the future research direction.

**Key words:** groundwater; vegetation; soil salinity; soil moisture content; ecological groundwater depth

目前,由地下水动态变化引起的生态环境问题,如土壤盐渍化、土地沙化都直接导致生物多样性的丧失和生态服务功能下降,影响到人类环境的质量和经济社会的发展,如何防止以及改善地下水变化引起的生态负效应(如湿地盐渍化、干旱半干旱地区土地沙化),保障生态系统-经济社会系统的协调可持续发展,是当前国际社会亟需解决的关键问题和面临的紧迫任务。

地下水是制约干旱半干旱区、绿洲、滨海及部分三角洲湿地植被建设的关键自然因素。地下水主要影响植被分布、生长、种群演替以及物种多样性,而

植被是决定地下水补给以及动态变化的主要因素之一。因此,针对地下水变化引起的生态效应,开展地下水与植被的关系研究,认识和理解植被退化的过程和机制,为植被恢复提供科学依据与决策支持,保证生态系统良性循环和功能效益正常发挥,已成为当前国际学术界研究的热点问题之一。

## 1 地下水与土壤含水量、含盐量的关系

土壤是植物根系生长发育和分布的场所,也是为植物生长繁育提供水分和养分的重要基地。而土壤含水量、含盐量的多少直接影响和危害植物

收稿日期:2013-05-14; 修回日期:2013-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41001360);国家自然科学基金青年基金项目(Y1Y13N1201)

作者简介:马玉蕾(1988-),女,宁夏中卫人,硕士研究生,研究方向为地下水数值模拟以及地下水的生态效应。

通讯作者:王德(1977-),男,山东荣成人,博士,副研究员,研究方向为海岸带景观生态学与恢复生态学。

的生长发育,甚至会造成植被死亡。在干旱半干旱区、滨海、绿洲以及部分三角洲湿地,地下水与生态环境状况关系密切,土壤水盐和地下水埋深、地下水矿化度是影响这些地区稳定性的重要影响因素。分析地下水与土壤含水量、土壤含盐量的关系,有助于探讨土壤水盐动态变化形成的条件,揭示植被在空间上梯度变化的原因,为进一步研究地下水生态环境效应问题提供依据。

### 1.1 地下水与土壤含水量的关系

土壤水是指由地面至地下潜水面以上土壤层中的水分,亦称土壤中的非饱和带水分<sup>[1]</sup>。土壤含水量除了受降水的影响外,还受到地下水、植被状况等的影响,如Chen等在土壤水文模型中加入除降水外的地下水对土壤水分的影响,发现在加入地下水影响因子之后,土壤水明显增加并更接近于实际观测值,而且土壤水的空间变异性受地下水埋深影响<sup>[2]</sup>。但在干旱半干旱区、滨海、绿洲以及部分三角洲湿地,主要受地下水影响<sup>[3-5]</sup>。在这些地区地下水可通过毛管的上升补给土壤,使土壤沿剖面具有不同类型的水分,是植物生长重要的水分来源,因此研究它们之间的关系,有利于植被生长发育、提高农作物产量、防止土地沙化。陈亚宁等人在塔里木河下游通过对5个组分的不同地下水埋深与土壤含水量变化测试表明,当地下水位在5~6 m时,组内平均含水量为11.5%,而当地下水位在10~11 m时,组内平均含水量为1.69%,即土壤含水量的递减率随地下水埋深逐渐增加而呈逐渐减小趋势<sup>[6]</sup>。陶常生等在太湖流域阳澄淀泖地区稻田的试验以及相关分析,表明土壤体积含水量( $W_a$ )与地下水埋深( $H$ )呈指数下降系: $W_a = 0.444e^{-0.005H}$  ( $r = 0.9441$ )<sup>[7]</sup>。巴比江等的研究表明,在季节变化上,地下水埋深影响表层和主要根系层的土壤水分变化规律,越浅对玉米根系层的影响较大,在垂直变化上,越深同层土壤含水率差异越大<sup>[8]</sup>。综上所述,当地下水埋深较浅时,毛细作用明显,土壤含水量较大,供给植被的水分充分;埋深较深时,则相反。

### 1.2 地下水与土壤含盐量的关系

土壤含盐量对植被生长有较大影响,研究地下水与土壤含盐量的关系有利于防止土壤盐渍化和增加农作物产量。地下水与土壤水之间的水力联系,直接影响土壤毛细管水的存在形态(分支持水、悬着水和接触水),影响土壤水分液态运动的连续性和土壤水分的汽化与蒸发强度,从而影响土壤的积盐状况<sup>[9-10]</sup>。由于地下水动态变化引起的干旱半干

旱区、滨海、绿洲以及部分三角洲湿地的盐渍化程度加重、面积增多。尤其是地下水埋深、地下水矿化度控制着土壤盐分的含量和分布:Ibrakhimov等研究地下水埋深和地下水矿化度的动态变化对土壤盐渍化的影响,表明土壤盐分与地下水埋深、地下水矿化度关系密切,随着地下水埋深的变浅,土壤盐渍化加重,平均每年每公顷增加3.5~14 t的盐<sup>[11]</sup>;刘广明等利用粉砂壤土土柱进行模拟试验,对不同地下水埋深及其矿化度作用条件下0~40 cm深度土壤的盐分运动规律进行了深入研究,结果表明,河口地区局部土壤盐化是地下水埋深、地下水矿化度共同作用的结果,而且地下水对土壤积盐的影响有三个阶段:前期土壤盐分累积缓慢阶段、中期土壤快速积盐阶段和末期缓慢积盐阶段,不同时期土壤含盐量与地下水埋深、地下水矿化度的关系不同<sup>[12]</sup>;Ma等研究塔克拉玛阿干沙漠南缘地区地下水与土壤环境的关系,表明土壤含盐量与潜水位埋深成反比,与潜水矿化度成正比<sup>[13]</sup>;管孝艳等运用经典统计学和地质统计学方法,结合GIS技术,分析河套灌区沙壕渠灌域地下水埋深对土壤盐分的影响,表明土壤盐分随浅层地下水埋深的增大而减小,二者之间满足指数关系,而且地下水埋深状况制约着土壤含盐量<sup>[14]</sup>。除了上述干旱半干旱区、绿洲土壤盐分动态变化受地下水动态影响外,部分三角洲湿地生态系统由于同时受到海洋、陆地、河流三大生态系统的共同作用,因此受湿地水分因子和土壤盐分因子的双重影响<sup>[15-16]</sup>,但近年来受到地下水动态变化湿地盐渍化越来越严重<sup>[17-18]</sup>。Nielsen等研究澳大利亚淡水湿地生态系统发现,由于地下水水位上升造成湿地盐渍化,导致湿地生态系统的结构和功能发生变化<sup>[19]</sup>;姚荣江等从空间上分析了黄河三角洲地下水位与土壤盐分的关系,表明地下水埋深与土壤盐分的指示半方差均表现为中等的空间自相关性,并且地下水埋深与土壤盐分的概率分布存在空间上的规律性与相似性<sup>[20]</sup>。

## 2 地下水与天然植被的关系

地表植被的组成、分布及长势与地下水以及与地下水有关的土壤水盐有着密切的关系,尤其是浅层地下水<sup>[21-23]</sup>。Chimner等指出地下水下降将导致植物的吸水困难,植物将充分利用浅根系吸取表层土壤水分,以满足植物蒸腾的需求<sup>[24]</sup>。Snyder等采用同位素混合比例法查明了所有树木都利用地下水、土壤水,但不同树种利用土壤水与地下水的比例

不同<sup>[25]</sup>。张丽等以生态适宜性理论为基础,根据塔里木河干流流域典型植物的随机抽样调查资料,建立了干旱区几种典型植物生长与地下水埋深关系的对数正态分布模型,根据建立的模型得出干旱区典型植物的最适地下水埋深、适宜地下水埋深区间及其对环境因子的忍耐度<sup>[26]</sup>。马兴旺等用 GIS 与专业计算地下水运动的 FEFLOW 软件结合模拟研究民勤绿洲现状及其影响下的地下水埋深的时空变化,表明地下水埋深小于 2 m 时,则由于强烈的毛细管蒸发作用,而将大量的盐分带到地表,造成地表土壤积盐过重的局面,土壤含盐量增加又会对植物的生长发育起抑制作用<sup>[27]</sup>。上述的研究成果都是干旱地区地下水与植被的关系,湿地地下水与植被的关系也很密切:Milzow 等人调查了非洲 Okavango 三角洲湿地植被类型分布与水文状况的关系,发现地下水埋深与植被分布有很好的相关性,运用基于 Modflow2000 平台开发的水文模型预测未来气候变化和水管理方案下水位动态,并转化成相应的湿地植被分布图,为湿地植被多样性保护提供适宜的水文条件<sup>[28]</sup>。Watt 等人研究了位于地中海湿地关键环境变量水位和盐度对植物种群的影响,利用国际通用植被数量分析软件 CANOCO 4.0 中典范对应分析(CCA)和去趋势对应分析(DCA)综合分析了不同年、夏季和秋季平均水位和土壤盐度与湿地植被分布的关系<sup>[29]</sup>。范晓梅在黄河三角洲湿地针对植被在地下水补给区、过渡区、排泄区不同的生态特征及其面临的问题,指出造成黄河三角洲生态退化的主要原因是补给区缺乏淡水资源补充、过渡区的土壤盐渍化和排泄区的海水入侵,提出了基于保护黄河三角洲生态环境的地下水管理方案<sup>[30]</sup>。安乐生等采用数理统计、地统计和同位素方法及 3S 技术,对黄河三角洲湿地“地下水-陆生植被”系统中关键水盐因子及其植被效应进行了深入研究,结果表明,潜水  $c(\text{Cl}^-)$  是地下水这一生态环境敏感要素中的关键因子,植被与潜水  $c(\text{Cl}^-)$  间具有极密切的作用与反作用关系,在此基础上对维护滨海湿地健康提出建议与措施<sup>[31]</sup>。

### 3 地下水与地表荒漠化关系

荒漠化是在干旱、半干旱或干旱的半湿润地区,由于人类不合理活动引起的土地退化<sup>[32]</sup>,主要表现为沙漠化和盐渍化。地下水运动过程中各种物理量(水位、埋深、矿化度、补给量、排泄量和蒸发量)和化学成分的变化,会极大地影响土壤性质,导致植被

生长条件的变化,而沙漠化和盐渍化就是该过程的具体表现。

在干旱半干旱地区地下水位和土壤水的变化是造成该地区沙漠化程度不断加重的两个重要驱动因子。干旱区植被在维持荒漠环境稳定性方面具有不可替代的作用,只要有植被覆盖的地方,风沙危害程度就相对减轻,在无植被的环境中,风沙作用则十分强烈。地下水位的变化引起土壤含水率的改变,而土壤水分含量的高低直接影响植被的生长和地表土壤抗风蚀、沙化的能力,当这一变化超过一定限度后,植被衰败乃至死亡。很多研究都已证实地下水在沙漠化过程中起着极其重要的作用:周兴佳、刘建军、李香云等研究塔里木河下游沙漠化问题,结果表明由于人类不合理的开发活动引起地下水位下降、土壤含水量下降从而导致地表植被生态系统退化、多样性丧失,使地表出现沙漠化<sup>[33-35]</sup>;根据民勤观测井,南部地区地下水位 20 世纪 70 年代比 50 年代下降 3~5 m,北部地区下降 1~3 m,矿化度自 1977 年 11 月的 1.305 g/L 增加到 1980 年 9 月的 2.092 g/L,正是由于地下水位下降、地下水矿化度升高,使民勤绿洲一带人工营造的防风固沙林-沙枣林有 0.3 万  $\text{hm}^2$  死亡,0.58 万  $\text{hm}^2$  生长衰退,使原来已固化的沙漠化土地,又开始了沙漠的移动<sup>[36]</sup>;王琪等通过石羊河流域历年实测资料和模拟发现,近 40 年地下水位持续下降,地下水水质恶化、矿化度升高,是造成植被退化和土地沙漠化的主导因子<sup>[37]</sup>。综上,可见地下水位下降和地下水矿化度升高,使植被衰退、沙漠化面积逐年增加、沙漠化程度不断增强。

荒漠化的另一个表现就是土壤盐渍化,在干旱半干旱区、滨海、绿洲和部分三角洲区,其发生程度与地下水文条件密切相关,而地下水埋深和矿化度是决定地下水中的盐分能否转变为土壤盐分及造成土壤积盐的重要因素。杨泽元等研究陕北风沙滩地地下水埋深与盐渍化关系,表明由滩地边缘至中心随着地下水位埋深逐渐变浅,土壤由非盐碱地渐变为轻盐碱化、中盐碱化和重盐碱化<sup>[38]</sup>。关元秀等基于 GIS 并结合地下水长期观测资料,建立黄河三角洲盐碱地改良分区模型,并表明地下水埋深和地下水矿化度是决定盐碱地改良难易程度的决定性因子<sup>[39]</sup>。付球萍等研究了塔里木盆地土壤含盐量与地下水埋深、地下水矿化度的函数关系,结果表明土壤含盐量( $S$ )与地下水矿化度( $m$ )和埋深( $h$ )呈现良好的指数关系:0~30 cm 时,  $S = 1.3115$

$e^{0.3156 \text{ m/h}}$  ( $R^2 = 0.995$ );  $0 \sim 60 \text{ cm}$  时,  $S = 1.1292$   
 $e^{0.2997 \text{ m/h}}$  ( $R^2 = 0.958$ );  $0 \sim 100 \text{ cm}$  时,  $S = 1.3943$   
 $e^{0.2541 \text{ m/h}}$   
 ( $R^2 = 0.904$ ), 并根据上述关系以及地下水矿化度、植物耐盐度确定地下水临界深度<sup>[40]</sup>。

## 4 生态地下水埋深研究

地下水埋深的变化会直接引起生态环境效应,如植被退化、土地沙化、土壤盐渍化等。当地下水埋深过浅,在蒸发的作用下,地下水中的可溶性盐会沿毛管上升聚集于地表,使土壤发生盐渍化,植被因受到盐分胁迫而衰败、退化与死亡;土地沙漠化是由于地下水埋深变大引起的,当地下水埋深过大,地下水不能随着毛管上升到植物根系层,使植物生长收到水分胁迫而导致衰败、退化甚至死亡。因此,确定既不会使土壤发生强烈的盐渍化又不会发生土地沙化的地下水埋深是十分重要的,合理的地下水埋深对保持土壤良好的水盐状况和植被生长发育具有重要的作用。国内外学者对地下水埋深与植被关系进行了大量的研究,最终提出了生态地下水埋深。

Horton Jonathan 等人针对植物在不同地下水埋深的生理反应进行了研究,提出了植物进行光合等生理作用的地下水埋深阈值<sup>[41]</sup>。Rossatto 等在巴基斯坦的高地研究了植被结构、土壤水分与地下水位埋深之间的响应的关系<sup>[42]</sup>; Derek 等研究了只依靠地下水来维持植被健康的地下水生态系统,分析地下水与植被的关系,总结出优势植物的适生水位<sup>[43]</sup>。研究成果表明,地下水位存在一个临界深度,若地下水埋深大于该深度,会导致植被吸水困难,使植被受水分胁迫而衰败。国内许多学者从 20 世纪 90 年代中后期也开始进行该方面的研究,樊自立等将潜水强烈蒸发深度作为地下水埋深适宜深度的上限,潜水蒸发极限深度作为限<sup>[44]</sup>;张长春等研究表明,华北平原地下水合理生态水位的上限为防止土壤盐碱化的水位,一般为 2.0 ~ 2.5 m,下限为地下水获得最大补给的理想水位,在山东平原为 10 m 左右,中东部平原为 3 ~ 5 m<sup>[45]</sup>;王水献等通过对焉耆盆地的地下水埋深与土壤盐碱化、植被生长与潜水蒸发的相互关系的研究,确定了绿洲灌区适宜生态埋深为 3.0 ~ 4.0 m<sup>[46]</sup>。这些研究表明当地下水埋深处于最佳生态地下水埋深时,植被生长较好,其它生态因子的变化,对植物生长产生的影响不大,即不起限制因子的作用。综合研究成果,将生态地下水埋深的定义为:把维持地带性自然植被生长所

需水分的浅层地下水埋深称作生态地下水埋深(简称生态地下水埋深)。总之,对生态地下水埋深的研究有利于植被恢复研究、探索植被群落演替规律、预测土壤盐渍化、沙漠化程度,对保持土壤良好的土壤环境和植被生长环境具有重要的意义。

## 5 结论与展望

虽然在地下水变化以及与地下水有关土壤水盐变化作用下对植被的影响过程与机制进行了大量研究,并取得大量的研究成果。但仍存在着很多问题:目前的研究多集中于天然条件下地下水与植被生态的关系探讨,缺乏人类活动(地下水开采,人工回灌等)影响地下水时植被的生态响应;侧重于地下水埋深、土壤含盐量等单一环境变量对植被影响的研究,缺乏地下水变化以及土壤水盐变化综合作用下对植被影响的研究;缺乏生态水文模型(如:地下水-土壤-植被)的构建与应用。

基于国内外在地下水与植被关系研究的总结,认为以下几个方面是今后研究的重点:

(1) 深入系统开展地下水变化与土壤水盐变化交互作用下的植被生理生态响应试验,确定植被在不同的生长发育阶段适宜的生态地下水埋深与盐碱生态阈值,为生态需水量计算和植被生态恢复提供理论依据。

(2) 新兴交叉学科和地学信息技术以及水文生态模型的耦合是未来发展的趋势。定量模拟生态模式和水文机制之间的关系,是当前生态学、水文学的热点研究领域。

(3) 亟需加强对地下水生态环境问题的研究,治理地下水开采以及咸水入侵引起的环境问题提供科学依据,为政府决策提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 雷志栋,胡和平,杨诗秀. 土壤水分研究进展与评述[J]. 水科学进展,1999,10(3):311-318.
- [2] Chen Xi, Hu Qi. Groundwater influences on soil moisture and surface evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2004, 297(1-4): 285-300.
- [3] 金晓媚,胡光成,史晓杰. 银川平原土壤盐渍化与植被发育和地下水埋深关系[J]. 现代地质,2009,23(1):23-27.
- [4] 王庆峰. 于田绿洲土壤含水量与地下水埋深的耦合关系[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2010.
- [5] 许秀丽,张奇,李相虎,等. 鄱阳湖典型湿地土壤含水量与地下水位变化分析[C]//. 首届中国湖泊论坛论文集,南京:东南大学出版社,2011.

- [6] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响[J]. 地理学报,2003,58(4):542-549.
- [7] 陶长生,王菊,徐方,等. 地下水埋深与土壤含水率对应关系和最优灌溉模式的试验研究[J]. 灌溉排水,2000,19(4):68-71.
- [8] 巴比江,郑大玮,卡热玛·哈木提. 地下水埋深对春玉米田土壤水分及产量的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(3):57-60.
- [9] 中国地理学会自然地理专业委员会. 化学地理的基本理论与方法[M]. 北京:科学出版社,1963.
- [10] 姜溥礼. 土壤积盐与地下水关系的分析[J]. 水利学报,1964(3):1-12.
- [11] Ibrakhimov M, Khamzina A, Forkutsa G, 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(3/4):219-236.
- [12] 刘广明,杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究[J]. 土壤学报,2003,40(1):65-69.
- [13] Ma J Z, Qian J, Gao Q Z. The groundwater evolution and its influence on the fragile ecology in the south edge of Traim Basin [J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(2):145-149.
- [14] 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.
- [15] Antonellini M, Mollema P N. Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(9):1201-1211.
- [16] 贺强,崔保山,赵欣胜,等. 水、盐梯度下黄河三角洲湿地植物物种的生态位[J]. 应用生态学报,2008,19(5):969-975.
- [17] Jolly L D, McEwan K L, Holland K L. A review of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology [J]. Ecohydrology, 2008,1(1):43-58.
- [18] Drexler J Z, Ewel K C. Effect of the 1997-1998 ENSO-related drought on hydrology and salinity in a micronesia wetland complex [J]. Estuaries, 2001, 24(3):347-356.
- [19] Nielsen D L, Brock M A, Rees G N, et al. Effects of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia [J]. Australia Journal and Botany, 2003, 51(6):655-665.
- [20] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲典型地区地下水位与土壤盐分空间分布的指示克立格评价[J]. 农业环境科学学报,2007,26(6):2118-2124.
- [21] Ahmad M U D, Bastiaanssen W G M, Feddes R A. Sustainable use of groundwater for irrigation: a numerical analysis of the subsoil water fluxes [J]. Irrigation and Drainage, 2002, 51(3):227-241.
- [22] Yang Jianfeng, Wan Shugin, Deng Wei, et al. Water fluxes at a fluctuating water table and groundwater contributions to wheat water use in the lower Yellow River flood plain, China [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(6):717-724.
- [23] 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.
- [24] Chimmer R A, Cooper D J. Using stable oxygen isotopes to quantify the water source used for transpiration by native shrubs in the San Luis valley, Colorado U. S. A. [J]. Plant and Soil, 2004, 260():225-236.
- [25] Snyder K A, Williams D G. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000,105(1/3):227-240.
- [26] 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):110-113.
- [27] 马兴旺,李保国,吴春荣,等. 民勤绿洲现状土地利用模式影响下地下水位时空变化的预测[J]. 水科学进展,2003,14(1):85-90.
- [28] Milzow C, Burg V, Kinzelbach W. Estimating future ecoregion distributions within the Okavango Delta Wetlands based on hydrological simulations and future climate and development scenarios [J]. Journal of Hydrology, 2010,381(1-2):89-100.
- [29] Watt S C L, García-Berthou E, Vilar L. The influence of water level and salinity on plant assemblages of a seasonally flooded Mediterranean wetland [J]. Plant Ecology, 2007,189(1):71-85.
- [30] 范晓梅. 黄河三角洲地下水动态及其生态效应[D]. 南京:河海大学,2007.
- [31] 安乐生,赵全升,叶思源,等. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应[J]. 水科学进展,2011,22(5):689-695.
- [32] 徐海量,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游环境因子与沙漠化关系多元回归分析[J]. 干旱区研究,2003,20(1):39-43.
- [33] 周兴佳,李崇舜. 塔里木河下游绿色走廊的沙漠化及其防治[J]. 中国沙漠,1983,3(1):31-43.
- [34] 刘建军,潘峰. 塔里木河下游土地覆盖动态变化分析[J]. 干旱环境监测,2001,15(3):142-146.
- [35] 李香云,张蓬涛,章予舒. 塔里木河下游绿色走廊特点及衰败成因分析[J]. 干旱区研究,2001,18(4):26-31.
- [36] 朱震达,刘恕,邸醒民. 中国的沙漠化及其治理[M]. 北京:科学出版社,1989:27-42.

## 5 结 语

(1) 裂隙粗糙度对裂隙的渗流有较大的影响,作用在不同粗糙度裂隙两端的压力恒定时,随着节理粗糙度的增加裂隙内流体的流量逐渐减小;流入不同粗糙度裂隙单位体积流量恒定时,随着粗糙度的增加,作用在裂隙两端的压差逐渐增大。

(2) 裂隙机械宽度与流量之间的关系曲线表现出明显的非线性特征,模拟结果与实验得出的趋势线相吻合,均符合对数关系。

### 参考文献:

- [1] Lomize G M. Flow in fracture rock [M]. Moscow: Gesenergoizdat, 1951.
- [2] Romm E S. Flow Characteristics of fractured rocks [M]. Moscow: Nedra, 1966.
- [3] Louis C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses[R]. London: Imperial College, 1969.
- [4] Patir N, Cheng H S. An average flow model for determining effects of three - dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication [J]. Journal of Lubrication Technology, 1978,100(1):12 - 17.
- [5] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joint S in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977,10(1 - 2):1 - 54.
- [6] Jiang Yujing, Li Bo, Tanabashi Y. Estimation the relation between surface roughness and mechanical properties rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and

- Mining Sciences, 2006, 43(6):837 - 846.
- [7] Hosseinian A. Analytical and numerical analysis of fluid flow through rough natural fracture profiles[C]//. 2010, SPE. ARMA218.
- [8] 贺玉龙,陶玉敬,杨立中. 不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(z1):3235 - 3241.
- [9] 王媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1):83 - 87.
- [10] 蒋宇静,李博,王刚,等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12):2377 - 2386.
- [11] 蔡金龙,周志芳. 粗糙裂隙渗流研究综述[J]. 勘察科学技术, 2009, (4):18 - 23.
- [12] 熊祥斌,张楚汉,王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9):1839 - 1847.
- [13] Barton N. Review of a new shear strength criterion for rock joints [J]. Engineering Geology, 1973, 7(4):287 - 332.
- [14] Barton N. Modeling rock joint behavior from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design[R]. Columbus, OH:Office of Nuclear Waste Isolation, 1982.
- [15] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in the organic practice [J]. Rock Mechanics, 1997, 10(1/2):1 - 54.
- [16] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. New York: W. H. Freeman, 1983.
- [17] 王媛,连宝玉. 单裂隙面渗流特性及等效水力隙宽[J]. 水科学进展, 2002, 13(1):61 - 68.
- [18] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.

(上接第 40 页)

- [37] 王琪,史基安,张中宁,等. 石羊河流域环境现状及其演化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1):46 - 52.
- [38] 杨泽元,王文科,黄金廷,等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8):67 - 74.
- [39] 关元秀,刘高焕,王劲峰. 基于 GIS 的黄河三角洲盐碱地改良分区[J]. 地理学报, 2001, 56(2):198 - 205.
- [40] 付秋萍,张江辉,王全九,等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(8):1091 - 1097.
- [41] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation [J]. Ecological Applications, 2001, 11(4):1046 - 1059.
- [42] Rossatto D R, Silva L C R, Villalobos - Vega R, et al. Depth of water uptake in woody plants relates to groundwa-

- ter level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 77:259 - 266.
- [43] Derek E, Ray F, Robyn L, et al. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater - dependent vegetation [J]. Australian Journal of Botany, 2006, 54(2):97 - 114.
- [44] 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.
- [45] 张长春,邵景力,李慈君,等. 华北平原地下水生态环境水位研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003(3):323 - 326 + 330.
- [46] 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.