

沙区微区集水过程及植被效应研究进展

乔宇¹, 徐先英^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院民勤治沙综合试验站, 甘肃 民勤 733000;
2. 甘肃省治沙研究所荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:在界定沙区微区概念的基础上,分析了沙区微区集水的形成、转化以及对于干旱沙区生态水文方面的重要作用,综述了国内外对微区集水在土壤水文、土壤发育和微区植被生长等方面的研究动态以及沙区微区集水在农林业和生态修复上的应用,指出沙区微区生态水文过程今后的研究重点在于对微区水文过程做出更加准确的量化分析,提出沙区具有完整意义的水文模型,为准确定量评价沙区水分循环和生态恢复提供理论依据。

关键词:干旱沙区;微区集水;土壤水文;生态水文;土壤发育;植被效应;生态修复;综述

中图分类号:TV121⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)05-0086-09

View on process of water catchment and its vegetation effects in micro-region of sandy area//QIAO Yu¹, XU Xianying^{1,2}(1. Minqin Desert Control Comprehensive Experimental Station, Chinese Academy of Forestry, Minqin 733000, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This paper defines the concept of micro-region in sandy area, on the basis of which analyzes the formation and transformation of micro-water harvesting and its important role in arid ecological hydrology. Additionally, it presents a summary the domestic and foreign research trends on the effects of micro catchment in soil hydrology, soil development and its application in agroforestry and ecological restoration. Overall, the future research trend lies in the more accurate quantitative analysis in the process of micro zone hydrology and indicates the complete significance in sandy hydrological models in order to provide a theoretical foundation for accurate quantitative evaluation of the hydrological cycle and ecological restoration in sandy areas.

Key words: arid desert area; micro-water harvesting; soil hydrology; eco-hydrology; soil development; vegetation effects; ecological restoration; review

中国是世界上受沙漠化影响最严重的国家之一,全国沙漠、戈壁和沙漠化土地约为165.3万km²,其中由人类活动导致的沙漠化土地37.0万km²,集中分布在我国北方干旱、半干旱地区^[1]。干旱沙区降水稀少、时空分布不均、利用效率低等特点常常引发土地干旱化、盐碱化、荒漠化等一系列生态环境问题,作为与干旱生态系统多数性质和过程有直接或间接关系的生态因素,水资源对沙地土壤的发生演化和植物生长及整个系统的水热平衡起决定作用。长期以来,国内外对于用于半干旱区农业生产和人畜饮用的雨水集流进行了比较深入的研究^[2-5],然而对于干旱沙区生态水文过程的了解仍然有限^[6]。沙区水文过程研究一般以沙地水分平衡为基础,所有水分都被认为是汇集到土壤(沙丘)后消耗的^[7],水分平衡以垂向为主;降水必须渗入沙地根际层才能为植物根系吸收利用,降水对植物的有效性与降水强度、历时和沙地结构有关,沙区无效降水通常占年降水72%^[8]。对于沙区微区降水径流,或者认为沙地没有径流产生,往往在水量平衡方程中被删除或忽略不计;或者认为径流增大了土壤无效蒸发在沙地水分平衡中所占的比例,使人工植被可利用的水量减少;而对地下水补给和利用等,认为沙丘深厚,地下水埋藏深,植物根系不能吸收利用。由于微区集水从时间和空间上充分接收和贮存有限的降雨,可减少无效蒸发,提高自然降水的利用效率,因此,开展对微区集水过程的研究对于降雨稀少、蒸发强烈的广大沙区具有重要的现实意义。本文对沙区微区集水区径流的形成、转化,沙区微区径流的集水特点

及其对沙区微区土壤水文循环、植被生长、土壤发育的影响,利用沙区微区径流恢复植被的潜在能力等方面的研究进展进行综合分析评价,以期对干旱地区生态恢复提供参考。

1 微区的概念及沙区微区集水的形成

1.1 微区的概念

微区主要指由于各种自然和人为因素的影响,不同自然地貌的坡面连续性被打破,形成地表起伏、大小不同、形状各异的微地形。一定范围内的微地形上土壤发育程度、植被分布状况、地质条件、气候等条件近似相同,形成了区别周围环境的微区。目前国内外对于微区还没有明确的定义,但相关的概念已有人提出。Boers 等^[9]在研究世界集雨系统分类中指出,微型集水区指集水面积在 0.5 ~ 1 000 m² 之间的区域,其上的地表径流经过不大于 100 m 的距离,渗入临近入渗区的根系土壤中,供植物吸收利用。马天恩等^[10]在研究黄土高原半干旱区集水高效利用技术体系时提出微生态环境理论,即在黄土高原农业生态环境条件下,作物经济产量的高低取决于作物生长区的土壤、气候环境。邝高明等^[11]在研究黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分和生物量的影响中提出,黄土丘陵沟壑区微地形主要是指浅沟、切沟、塌陷、缓台、陡坎等五类大小不等形状各异的局部地形;而不同的微地形对应大小不同的集水区,但面积一般不大于 1 000 m²。沙区集水微区按成因不同,可分为自然微区和人为因素形成的微区,自然微区包括内陆河流域水系地区冲击物、坡积物、洪积物上形成的含致密黏土层的龟裂地;沙丘固定后微生物结皮形成的小的区域;固定沙丘的丘间低地;沙丘迎风坡风沙流破坏钙积层形成的风蚀坑;戈壁滩上的微地貌等。人为因素形成的微区包括黏土沙障设置后形成的风蚀洼地;整地工程中鱼鳞坑、反坡梯田设置后形成的小区域;田间微型沟壑系统等。

1.2 沙区微区集水的形成与转化

沙区微区集水的相关研究最早可以追溯到干旱荒漠地区径流产生的研究。前苏联水文专家对荒漠地区龟裂地径流和山前径流的形成和利用、沙漠蓄积淡水的主要形态——浮游透镜体的形成和利用(包括潜水的化学成分及其变化)作了详细的调查分析和研究^[12]。由欧盟支持的 1999—2002 年度中亚沙漠集水潜能评价项目的研究表明,龟裂地结皮的状况是径流形成的主要决定因素^[13]。我国于 20 世纪 80 年代在准噶尔盆地莫索湾对龟裂地径流进行了研究^[14],也研究了以水分为主体的龟裂地植丛发生的演替^[15-16],认为当降雨量超过 5 mm,龟裂地

地表就会产生一定的地表径流。在植被固沙区,地表因有大量土壤微生物结皮^[17-18]而截留降水,使降水分配格局发生改变,降水入渗浅层化,使其与无结皮地区在水分利用方式和利用效率方面存在显著差异^[19]。

沙漠地区地表微地形通常起伏不平,水分易在低洼地区的土壤表面留存,增加了水分入渗时间,从而使降水后土壤水分的时空变异性增大。对于人工植被固沙区来说,地表土壤微生物结皮的形成使得下渗率降低,径流系数逐渐提高^[20],能形成沙漠微区径流。在河西走廊沙区,广泛存在人工固沙区形成的黏土沙障以及黏土沙障建立后经土壤风蚀形成的风蚀凹面,具备了地表径流的条件,降雨后,由于降雨强度超过了土壤入渗能力或者土壤水分达到了饱和状态,在有坡度的风蚀凹面会形成地表径流,坡面汇集的径流集中在风蚀洼地的最低处,形成集水面,一部分水分入渗补给土壤水分或地下水,一部分被蒸发。在风蚀凹面的集水区,由于土壤水分条件的改善,一年生或多年生植物开始入侵生长。对胀缩性黏土来说,无论其表面有无土壤生物结皮存在,它的入渗速率相对较低,因此在粉砂和黏粒含量很高的沙丘间龟裂地、黏土平地也会形成积水。可见形成微区径流的下垫面条件并非只有土壤生物结皮,但有生物结皮的土壤条件是形成微区径流最常见的形式。

2 沙区微区集水对土壤水文的影响

在干旱沙漠地区,土壤蒸发与降水入渗是沙地水分循环的两个基本过程。沙地的土壤含水量是由影响水分蒸散与入渗的多因素如地形坡度、径流运动、土层渗透性、太阳辐射强度、气流与风力风速制约的结果^[21]。

2.1 对蒸发的影响

土面蒸发是干旱沙漠土壤水分损失的主要形式。在干旱地区,蒸发量很大,只有将有限的水分补给与覆盖措施结合起来,通过覆盖形成一个隔离层,将土壤中气体与大气的交换通道阻断,才能减少土壤水分的蒸发损失,将水分保蓄在土壤中。Johansen^[22]认为,微生物结皮的产生有利于蒸发,是因为微生物结皮的颜色较深从而容易吸收太阳辐射;陈荷生^[23]研究认为,由于生物结皮具有较大的持水能力,能够较长时间地把水分维持在地表上,从而使水分不易被维管束植物利用,这就提高了水分被蒸发的可能性;但王新平等^[24]认为生物结皮封闭了土壤表面而降低水分蒸发。周丽芳^[25]在研究微生物结皮对地表蒸发的影响中发现,结皮对地表蒸

发的影响呈阶段性变化,对蒸发的抑制和促进在不同的蒸发阶段表现不同;此外,还和降雨条件有关,较大降雨条件下,结皮主要表现为对蒸发的抑制作用,较小降雨条件下,因土壤基质的差异表现不同。可见生物结皮对于土壤水分蒸发的影响是复杂多变的。由于沙区土壤中沙粒含量高,许多沙区微区在产生径流时,常常携带大量沙粒,这些沙粒堆积在微区汇流区,水分在蒸发过程中容易在汇流区形成一个干沙层,干沙层的形成可阻止土壤水分的进一步蒸发,有利于土壤水分的储存。

2.2 对入渗的影响

在干旱沙区存在大量的微区地表径流通过集水网补充土壤水,而沙丘间龟裂地、黏土平地、人工植被固沙区易形成沙漠微区径流,在沙区局部形成集水区。Evans 等^[26]指出沙漠中水分向下湿润的深度一般较浅,通常在降雨后土壤表面立即开始蒸发,湿润层的水分由于蒸发而向下再分配逐渐减少。民勤治沙综合试验站的观测数据显示:在民勤沙区,4 d 内断续降雨 25 mm 的情况下,降水入渗深度黏土沙障(入渗深度 28.2 ~ 35.6 cm)比其他沙障和流沙(入渗深度 20.7 cm)都深,这表明黏土沙障形成的微区积水在一定程度上增加了入渗时间和入渗总量。对于有结皮的丘间地,结皮对降水入渗的影响是有争议的,一些学者认为生物土壤结皮的存在有利于水分入渗^[27-28],而另一些学者则认为其存在降低了水分入渗^[29-30]。另外,George 等^[18]采用室内栽培与野外试验相结合的方法,研究了生物土壤结皮对土壤水分损失的影响,认为生物土壤结皮可以通过增加表层土壤水流阻力来提高土壤水分的有效性。

土壤质地对水文循环的影响甚至会超过生物土壤结皮。Abu-Awwad^[20]在约旦河谷地 AI-Muwaqqar 流域用填充沙土柱的方法研究了降水对提高土壤入渗能力与增加土壤贮存水量的作用,与易形成结皮的土壤比较,沙土有助于增加土壤深层(>60 cm)贮水量。因此生物结皮对于水分入渗的作用要结合其下伏土壤成分进行分析。比较而言,如果沙丘沙基质上发育生物土壤结皮,这种土壤结构所形成的剖面层次将会减少入渗水量;若砂黏土表层有生物土壤结皮发育,则有助于提高降水入渗量^[31],这与 Hillel 等^[32]的研究结果“细粒土壤层基质势将阻止土壤水分入渗到相对大孔隙的粗粒土壤层”相一致,因此,只有当细粒土壤剖面达到饱和后,土壤水分才可能渗入深部粗粒土壤剖面层^[33]。

2.3 对土壤含水量的影响

黏土沙障由于障埂间成凹形洼地,具有积聚降水、改善沙层水分条件的功效。民勤治沙综合试验

站早期的观测数据显示:0 ~ 50 cm 土层内,黏土沙障的储水量高达 16.65 mm,高立式柴草沙障和低立式柴草沙障等均小于 10 mm,无沙障的为 13.35 mm,均小于黏土沙障。就干沙层厚度来说,黏土沙障(8 ~ 10 cm)比柴、草沙障(18 ~ 20 cm)薄。关于半干旱区微集水种植技术的研究也有同样的效果:黄伟^[34]用微集水技术种植谷子的研究结果表明,7—9 月雨季蓄墒期不同微集水带型的土壤蓄墒效率为 40.4% ~ 62.9%,较露地平播提高 51% 以上;Suleman 等^[35]在巴基斯坦干旱区牧场针对微集水种植技术对土壤水分的调控效果进行了研究,结果显示土壤含水率显著提高,从表层到 45 cm 的土壤含水率提高了 59% ~ 80%,这对于牧场植物的生长发育具有重要促进作用;Ojasvi 等^[36]在半径为 1 m、面积为 3.14 m² 的浅圆锥形微集水区域种植枣树,集水区用大理石覆盖,结果显示该技术可以使土壤含水率提高 3 倍;Singh 等^[37]对印度西部退化的 Aravalli 山上的草场采用微集水种植,显著改善了土壤状况,提高了土壤养分含量和含水量,植物多样性和生物量也显著提高。在干旱沙区,由于不同类型的微区存在,降雨产生的地表径流在微区底部汇集入渗,使从底部到坡面不同部位土壤入渗深度产生差异,也使不同层次的土壤含水量产生时空差异。

2.4 对地下水的影响

在塔克拉玛干沙漠径流试验场的观测发现,历时较短、雨强较大的沙漠降雨,在流动沙丘干沙层较薄的部位产生对地下水的补给,形成淡水透镜体;同时,在沙漠丘间低地的黏土平地形成的地表径流在自然条件下,通常有发育不太完全的自然集水网穿破地表表层进入下伏沙层或渗入周围沙丘,形成淡水透镜体。Fleskens 等^[38]提出了卡拉库姆沙漠中利用龟裂地收集地表径流的创新方法,即在龟裂地表附近挖一个深度可以达到下伏沙层的坑,收集到坑里的水入渗到盐湖地下水位的透镜体上,淡水再通过水井被利用。Gontia 等^[39]通过遥感评估了印度半干旱区的降水和微区径流对地下水的补给,指出微区集水占研究区地下水总补给量的 38.53%,可见微区集水对于增加地下水补给有着非常重要的作用。此外,沙丘及丘间地存在大量的裂缝、虫洞、根孔以及层状结构土壤大孔隙,降水径流在入渗时产生优先渗流通道,部分径流越过土壤结皮层下渗而进入土壤深层补给地下水^[40-43]。

3 沙区微区集水对植被的影响

国内外对沙漠生态系统中土壤种子库在植被恢复与重建中的作用、植物生物量分配与养分分配的

“肥岛”现象进行了大量的研究^[44-46],但着重于植被组成、结构和土壤养分分布格局,以及对生态系统的结构和功能改变的研究,对于沙区微区径流的补给对植被恢复以及生物多样性的影响和评价需要进一步研究。

3.1 沙区微区径流对植被生长和分布的影响

已有研究表明,土壤水分是将气候、土壤和植被对水分循环过程的影响作用与水分循环对植被格局的动态影响综合起来的关键因子,它通过调节气候-土壤-植被系统的复杂动态来控制植被的时空分布格局^[47-48],而降水入渗是补充荒漠人工植被区土壤有效水分的主要水源^[49]。

不同植物对水分的竞争性利用不同,草本盖度与土壤表层水分显著相关,灌木盖度分布和土壤深层次含水量相关^[50],因此微区集水对土壤水分的调节将影响植被生长与物种多样性。降雨后,结皮的存在使集水区浅层土壤水分的有效性提高,有利于浅根系灌木、草本植物的生长。肖洪浪等^[51]在对土壤-植被系统的研究中发现,腾格里沙漠防风固沙体系经过30a的演替,固沙区的优势物种由花棒、柠条等灌木演变为以画眉草、油蒿为主的草本植物,同时,低等植物也开始与草本植物和灌木竞争,深根性的灌木逐渐退出防护体系。这与微区导致水分的表聚作用加剧了生物系统浅层化的结果是一致的。集水微区对于植被分布的影响表现在沙区植被的斑块分布格局上,它加剧了沙区水分和养分分布的不均匀,增加了区域土壤水分,为种子萌发提供了适宜的微环境,导致点状植被斑块的形成,符合斑块状植物的裸地起源学说^[52]。这种分布格局存在不均匀性和不稳定性,取决于降雨量的大小、空间分布及其波动情况^[53],但在某一个时间段增加沙区植被盖度能够降低土壤风蚀。

3.2 植被对沙区微区环境的反馈作用

土壤水分成为影响植被结构和组成的最重要的资源,同时植被对土壤水分动态产生重要的反馈作用。当荒漠地区土壤-植被系统形成以后,土壤-植被系统对土壤水分运动产生尤为明显的制约作用,致使土壤水分运动持续短暂甚至时有时无,从而加剧深层土壤干化^[54-55]。植被特征与动态直接影响着植物冠层截留、蒸散发与入渗过程,固沙区降水入渗的连续观测研究表明,原来淋溶性的格状沙丘在植被的影响下趋于变成非淋溶性沙地,并且流沙固定后沙面变得更加紧实,将越来越不适宜原生植物(流动沙丘指示种)的生长^[56]。在油蒿与柠条固沙植被区,终年未监测到有土壤水分深层渗漏发生,表明荒漠灌丛植物根系活动吸收利用有效降水补充的

土壤水分,阻止了降水条件下土壤深层渗漏的发生。蒸腾作用强的物种如滨草可明显降低地下水位^[57]。腾格里沙漠东南缘的植被斑块能拦截地表径流和侵蚀产物,从而控制坡面大面积侵蚀的发生^[58]。查轩等^[59]的研究表明,植被恢复后,土壤有机质、水稳性团聚体及渗透性等抗侵蚀特性分别提高了60、25和45倍,土壤抗冲性提高了20多倍。

4 沙区微区集水对土壤发育的影响

对腾格里沙漠东南缘人工植被区的土壤水分监测表明,流沙固定后干旱砂质新成土趋向于一种区域性的土壤类型——简育正常干旱土,在结皮层深厚的背风坡已见碳酸钙的白色沉积^[51]。随着土壤-植被系统的演替,微生物、土壤养分在不断的发展和积累,微生物参与微弱的有机质积累过程;同时我国沙区丰富的风蚀沉积物为结皮的形成提供了物质基础,以粉砂或者粉砂和细沙的互层组成的结皮层逐渐出现,表土机械组成随固沙时间的增加而明显变细,土体构型发生了明显的改变。一些研究已经证明土壤微生物能够增强土壤团聚的稳定性,Greene等^[60]提供了微形态学证据,土壤微生物把非结晶黏胶状的有机物密切地黏结在一起,而有机物又将矿物细粒进一步黏结,形成球状表面团聚。这样既借助于菌丝体将土壤细粒紧实地黏结,又通过微生物分泌物的黏结,促使土表的稳定性增强而避免风蚀和水蚀。

5 沙区微区集水的应用

5.1 在林业上的应用

微集水区是一个数百平方米的单株树木集水的区域,它由分布区和树木生长的入渗区组成,其径流汇入入渗区后储蓄起来,再供树木消耗。虽然微集水区是干旱区树木利用有限水资源的一种有前景的技术,但微集水系统收集充足水量主要取决于年降雨量、季节中的暴雨频数、暴雨历时与强度、土壤特征、地形及树木的抗旱性等因素^[61]。利用自然坡面或改造小地形、处理地表,收集天然降水并汇集于植树穴内供树木生长需要,是干旱、半干旱区径流林业的主要技术路线^[62-63]。在降雨量不足150mm的沙漠地区,集流造林存在争议,而改造结皮集雨却能使土壤含水率显著提高。马全林等^[64]在民勤治沙综合试验站对人工梭梭林进行了土壤结皮改造试验,试验沿着梭梭林地的自然坡面建立10~20m²的集流面,在梭梭基部开挖容积为0.25~0.5m³的集流坑,结果表明每株梭梭年集水约0.5m³,相当于提供了一次充足的灌水。处理1a后梭梭植株根部的土

壤含水率提高到 1.77%,2 a 后提高到 1.95%,为梭梭恢复正常生长创造了基本水分条件。安富博等^[65]通过绿洲边缘退化梭梭林地的集流试验表明,集流措施能够有效提高降雨的深层入渗,且单株集流面积越大,降雨入渗深度越大,地上生物量增长差异越显著。黄丕振等^[66-67]在平均降水量为 116.5 mm 的莫索湾用犁开沟集雨营造梭梭林试验表明,造林第 2 年梭梭的树高和新枝长度均超过天然梭梭同龄林的 1 倍以上,单株地上部分生物量相当于同龄天然林木的 13 倍。在新疆风沙砾石戈壁区,深沟集水造林方式试验表明,60~80 cm 为集水蓄水的适宜深度,60 cm 深沟结合秸秆覆盖树木生长量达到最大^[68]。在生产实践中,泥炭等保水剂也用于沙区造林,在沙土中混合一定比例的黏土来提高土壤的持水能力,或在树穴内衬膜和覆盖造林均是沙区微区集水的具体措施。

5.2 在农业上的应用

干旱区的微集水种植技术通过在田间修筑沟垄,实施垄膜沟种,使降水由垄面向沟内汇集,改变了降雨的时空分布,以达到改善作物根区土壤水分环境的目的。目前,许多学者通过田间试验和模拟降雨对沟垄集雨的集水效应、增产效应等开展了系统研究:胡希远等^[69-70]在宁南半干旱偏旱区的试验均表明,该技术可明显改善作物根际水分状况,促进作物生长,并指出覆膜垄的宽度影响作物生产力和农田水分效益,在沟垄比为 60 cm : 60 cm 和 75 cm : 75 cm 的条件下冬小麦、春玉米、谷子、豌豆、糜子均表现了较明显的增长效应。在甘肃榆中试验成功的旱地玉米全膜双垄沟播技术使降水利用率最高达到 75.2%,平均降水利用率达到 70.1%,使玉米水分利用效率最高达到 35.93 kg/(mm·hm²),平均达到 33.63 kg/(mm·hm²),在旱作农田降水高效利用方面取得了新进展^[71]。目前我国该技术研究区域主要限于黄土高原地区,微集水适宜雨量范围可暂定为 250~440 mm 之间^[72-74],且 Tabor^[75]等已经通过试验验证了该技术对于荒漠土地的适用性,得出微集水技术可以显著提高荒漠中的土壤生产力,甚至能使已经废弃的土地重新得到有效利用。沙地防渗透节水栽培也是沙区微区集水在沙地农田上的应用,20 世纪 80 年代初中国科学院兰州沙漠研究所在腾格里沙漠沙坡头地区流沙地进行地下铺设隔水层种植大豆作物试验、90 年代在科尔沁沙地中部奈曼地区进行沙地薄膜水稻栽培技术研究均获得了成功^[76]。

6 研究展望

国内外的雨水收集历史非常悠久,科学工作者

对雨水集流系统的集水、贮存和高效利用各环节做了系统研究,成熟高效的雨水集流技术的研究和推广已经解决了干旱半干旱区人畜饮水和部分农田补灌问题,然而对微区集水研究仅局限于半干旱地区的农业生产,对沟垄集水做了大量的研究并取得了显著的成果。关于干旱沙漠的微区集水,由于降水资源的严重不足,使人们忽视了降水后形成的微区径流及其生态功能,微区集水的应用较少。

研究表明沙漠中存在具有集水意义的特定区域,这些区域形成的特殊的微环境对土壤生态水文过程及其植被都有不同的影响。本文对沙区微区集水过程及植被效应进行了综述,今后应重点研究不同微区集水区径流的形成、转化,探索微区径流的集水特点;对微区集水区土壤水分进行动态观测,研究沙区“四水”转化规律、沙区生态水文过程及其生态功能,提出沙区具有完整意义的水文模型,对微区水文过程做出更加准确的量化分析;通过微区集水区土壤种子库测定与植物生长过程的研究,评价沙区利用微区径流恢复植被的潜在能力。

总之,微区集水的研究是我国干旱沙漠地区的重要课题。对沙区微区径流的进一步研究,一方面将丰富沙漠地区生态水文学的研究,另一方面将为沙漠地区的生态恢复和重建提供理论依据。

参考文献:

[1] 王涛,朱震达. 中国沙漠化研究[J]. 中国生态农业学报,2001,9(2):7-12. (WANG Tao,ZHU Zhenda. Studies on the sandy desertification in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2001,9(2):7-12. (in Chinese))

[2] National Academy of Sciences. More water for aridlands [M]. Washington, D. C. :National Academy of Sciences, 1974:3-4.

[3] FINK D H,FRASIER G W,MYERS L E. Water harvesting treatment evaluation at granite [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1979, 15 (3): 861-873.

[4] BOERS T M,De GRAAF M,FEDDES R A,et al. A linear regression model combined with a soil water balance model to design micro-catchments for water harvesting in arid zones[J]. Agricultural Water Management, 1986, 11 (3): 187-206.

[5] 王百田. 径流农业:发展干旱农业的重要途径[C]//陈百明. 雨水利用论文集. 北京:中国水利水电出版社, 1998:12-34.

[6] DUFFY C J,AL-HASSAN S. Groundwater circulation in a closed desert basin: topographic scaling and climatic forcing[J]. Water Resources Research, 1988, 24 (10): 1675-1688.

[7] WANG X P,BERNDT R,LI X R,et al. Water balance

- change for a re-vegetated xerophyte shrub area [J]. Hydrological Science Journal, 2004, 49(2): 283-295.
- [8] 肖洪浪, 李新荣. 沙坡头站雨养人工生物防护体系水平衡研究五十年[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 166-172. (XIAO Honglang, LI Xinrong. Fifty-year history of water balance research ecosystem in Shapotou, Tengger Desert [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2): 166-172. (in Chinese))
- [9] BOERS T M, BEN-ASHER J. A review of rainwater harvesting[J]. Agricultural Water Management, 1982, 5(2): 145-158.
- [10] 马天恩, 高世铭. 黄土高原半干旱区集水高效利用技术体系的研究[J]. 农业现代化研究, 1994, 15(3): 166-171. (MA Tianen, GAO Shiming. Research of efficient use of water harvesting in Loess Plateau Semiarid region[J]. Research of Agricultural Modernization, 1994, 15(3): 166-171. (in Chinese))
- [11] 邝高明, 朱清科, 刘中奇, 等. 黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 74-77. (KUANG Gaoming, ZHU Qingke, LIU Zhongqi, et al. Effect of microrelief on the soil water and vegetation arrangement in loess hilly and gully region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 74-77. (in Chinese))
- [12] 库宁. 荒漠地方水及其利用问题[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 37-45.
- [13] RINGERSMA J, VINK M, MAMEDOV B. Deterioration of Central Asian water harvesting systems[C]//Proceedings of the XIth International Soil Conservation Conference. Buenos Aires: [s. n.], 2000: 22-27.
- [14] 肖笃志, 胡玉昆. 准噶尔盆地莫索湾龟裂地径流的研究[J]. 干旱区研究, 1989(3): 31-36. (XIAO Duzhi, HU Yukun. A study on the surface runoff of crust soil in mesuwan[J]. Arid Zone Research, 1989(3): 31-36. (in Chinese))
- [15] 王玉辉, 周广胜, 黄培佑. 以龟裂地植丛发生演替为例探讨植物对环境的反应与反馈效应[J]. 植物资源与环境, 1999, 8(3): 29-33. (WANG Yuhui, ZHOU Guangsheng, HUANG Peiyu. The responses of plant to environment and its feedback based on the general sucession in takir[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 1999, 8(3): 29-33. (in Chinese))
- [16] 黄培佑. 从龟裂地植物群落建群现象剖析生态演替中有关问题[J]. 新疆环境保护, 1995, 17(3/4): 4-6. (HUANG Peiyu. Analysis on the relevant problems in the ecological succession from plant community building in takir[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 1995, 17(3/4): 4-6. (in Chinese))
- [17] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4-8. (LI Xinrong, JIA Yukui, LONG Liqun, et al. Advance in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semiarid regions[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(1): 4-8. (in Chinese))
- [18] GEORGE D B, ROUNDY B A, CLAIR L L, et al. The effects of microbiotic soil crust on soil water loss[J]. Arid Land Research and Management, 2003, 17(2): 113-125.
- [19] 何明珠, 李新荣, 张景光, 等. 土壤生物结皮蒸散特征研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 159-164. (HE Mingzhu, LI Xinrong, ZHANG Jingguang, et al. Evapotranspiration characteristics of soil microbiotic crusts[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 159-164. (in Chinese))
- [20] ABU-AWWAD A M. Water infiltration and redistribution within soils affected by a surface crust[J]. Journal of Arid Environments, 1997, 37(2): 231-242.
- [21] 陈有君, 关世英, 李绍良, 等. 内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(1): 80-85. (CHEN Youjun, GUAN Shiyang, LI Shaoliang, et al. Soil water regime of hunshandake sandy land in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(1): 80-85. (in Chinese))
- [22] JOHANSEN J R. Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America[J]. Journal of Phycology, 1993, 29(2): 140-147.
- [23] 陈荷生. 沙坡头地区生物结皮的水文物理特点及环境意义[J]. 干旱区研究, 1992, 9(1): 31-38. (CHEN Hesheng. The characteristics of biological crust and its environmental significance in Shapotou Region [J]. Arid Zone Research, 1992, 9(1): 31-38. (in Chinese))
- [24] 王新平, 李新荣, 肖洪浪, 等. 干旱半干旱地区人工固沙灌木林生态系统演变特征[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1974-1980. (WANG Xinping, LI Xinrong, XIAO Honglang, et al. Evolution characteristics of the artificially re-vegetated shrub ecosystem of arid and semi-arid sand dune [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 1974-1980. (in Chinese))
- [25] 周丽芳. 微生物结皮层对地表蒸发过程影响的机理研究[J]. 水土保持学报, 2010(1): 208-213. (ZHOU Lifang. Mechanism of microbiotic crust effects on evaporation process [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010(1): 208-213. (in Chinese))
- [26] EVANS D D, THAMES J L. Water in desert ecosystems [J]. US/IBP Synthesis Series, 1981(11): 200-210.
- [27] GIFFORD G F. Infiltration rate and sediment production trends on a plowed big sagebrush site [J]. Journal of Range Management, 1972, 25(1): 53-55.
- [28] CLAIR L L S, JOHANSEN J R. Introduction to the symposium on soil crust communities[J]. Western North American Naturalist, 1993, 53(1): 1-4.
- [29] LOOPE W L, GIFFORD G F. Influence of a soil microfloral crust on select properties of soils under pinyon-juniper in southeastern Utah[J]. Journal of Soil and Water

- Conservation,1972,27(4):164-167.
- [30] BROTHERRSON J D, RUSHFORTH S R. Influence of cryptogamic crusts on moisture relationships of soils in Navajo National Monument, Arizona [J]. Western North American Naturalist,1983,43(1):73-78.
- [31] 王新平,康尔泗,李新荣,等. 荒漠地区土壤初始状况对水平入渗的影响[J]. 地球科学进展,2003,18(4):592-596. (WANG Xinping, KANG Ersi, LI Xinrong, et al. The influence of initial soil conditions on water penetration and soil moisture distribution[J]. Advance in Earth Sciences, 2003,18(4):592-596. (in Chinese))
- [32] HILLEL D, GARDNER W R. Transient infiltration into crust-topped profiles[J]. Soil Science,1970,109(2):69-76.
- [33] SACKSCHEWSKY M R, KEMP C J, LINK S O, et al. Soil water balance changes in engineered soil surfaces [J]. Journal of Environmental Quality,1995,24(2):352-359.
- [34] 黄伟. 宁南旱作农区谷子微集水种植增产技术研究 [J]. 榆林学院学报,2010,20(4):12-16. (HUANG Wei. Technique of output increase of micro-catchment on foxtail millet on in arid farming of South of Ningxia[J]. Journal of Yulin University, 2010,20(4):12-16. (in Chinese))
- [35] SULEMAN S, WOOD M K, SHAH B H, et al. Development of a rainwater harvesting system for increasing soil moisture in arid rangelands of Pakistan [J]. Journal of Arid Environments,1995,31(4):471-481.
- [36] OJASVI P R, GOYAL R K, GUPTA J P. The micro-catchment water harvesting technique for the plantation of jujube in an agroforestry system under arid conditions[J]. Agricultural Water Management,1999,41(3):139-147.
- [37] SINGH G, CHOADHARY G R, RAM B, et al. Effects of rainwater harvesting on herbage diversity and productivity in degraded Aravalli hills in western India[J]. Journal of Forestry Research,2011,22(3):329-340.
- [38] FLESKENS L, ATAIEV A, MAMEDOV B, et al. Desert water harvesting from takyr surfaces: assessing the potential of traditional and experimental technologies in the Karakum [J]. Land Degradation & Development, 2007,18(1):17-39.
- [39] GONTIA N K, PATIL P Y. Assessment of groundwater recharge through rainfall and water harvesting structures in Jamka microwatershed using remote sensing and GIS[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2012,40(4):639-648.
- [40] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research,1982,18(5):1311-1325.
- [41] 陈启慧,郝振纯,冯杰. 农田大孔隙对土壤水运动和溶质运移的影响研究[J]. 灌溉排水,2001,20(4):1-4. (CHEN Qihui, HAO Zhenchun, FENG Jie. Effects of macro-pore on water and solute movement in soil [J]. Irrigation and Drainage,2001,20(4):1-4. (in Chinese))
- [42] 张建丰,林性粹,王文焰. 黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究 [J]. 水土保持学报,2003,17(4):168-171. (ZHANG Jianfeng, LIN Xingcui, WANG Wenyan. Characteristics of macro-pore and macor-pore flow in loess soil [J]. Journal of Soil Water Conservation,2003,17(4):168-171. (in Chinese))
- [43] 石辉,陈凤琴,刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报,2005,25(3):507-512. (SHI Hui, CHEN Fengqing, LIU Shirong. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River [J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(3):507-512. (in Chinese))
- [44] 冯秀,仝川,丁勇,等. 土壤种子库在植被恢复与重建中的作用与潜力 [J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,2007,38(1):102-108. (FENG Xiu, TONG Chuan, DING Yong, et al. Potential role of soil seed banks in vegetation restoration and reclamation [J]. Journal of Inner Mongolia University,2007,38(1):102-108. (in Chinese))
- [45] CRAWFORD C S, GOSZ J R. Desert ecosystems: their resources in space and time [J]. Environmental Conservation,1982(9):181-195.
- [46] GARNER W, STEINBERGER Y. A proposed mechanism for the formation of ‘Fertile Islands’ in the desert ecosystem [J]. Journal of Arid Environments,1989,16:257-262.
- [47] TINLEY K L. Ecology of tropical savannas [M]. Berlin: Springer,1982:175-192.
- [48] STEPHENSON N L. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance [J]. American Naturalist,1990:649-670.
- [49] WANG X P, BERNDTSSON R, LI X R, et al. Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area [J]. Hydro-Logical Science Journal,2004,49(2):283-295.
- [50] 陈鹏,初雨,顾峰雪. 绿洲-荒漠过渡带景观的植被与土壤特征要素的空间异质性分析 [J]. 应用生态学报,2003,14(6):904-908. (CHEN Peng, CHU Yu, GU Fengxue. Analysis of spatial heterogeneity of vegetation and soil in Oasis and desert ecotone [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003,14(6):904-908. (in Chinese))
- [51] 肖洪浪,李新荣,段争虎,等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变对水环境的影响 [J]. 土壤学报,2003,40(6):809-814. (XIAO Honglang, LI Xinrong DUAN Zhenghu, et al. The impact of soil vegetation system evolution on water environmen in the process of quicksand be fixed [J]. Acta Pedologica Sinica,2003,40(6):809-814. (in Chinese))
- [52] MACFADYEN W A. Soil and vegetation in British Somaliland [J]. Nature,1950,165:121-121.

- [53] 杜建会,严平,董玉祥. 干旱地区斑块状植被格局形成的水分驱动机制及其研究进展[J]. 生态学杂志, 2012,31(8):2137-2144. (DU Jianhui, YAN Ping, DONG Yuxiang. Water driving mechanism of patched vegetation formation in arid areas: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(8):2137-2144. (in Chinese))
- [54] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J]. 林业科学, 1996,32(1):78-85. (YANG Weixi. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the Northern Regions of China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996,32(1):78-85. (in Chinese))
- [55] ANDRASKI B J. Soil-water movement under natural-site and waste-site conditions: a multiple-year field study in the Mojave Desert, Nevada[J]. Water Resources Research, 1997,33(8):1901-1916.
- [56] GURNELL A M, HUPP C R, GREGORY S V. Linking hydrology and ecology[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(16/17):2813-2815.
- [57] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁瑶. 科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿植被水分入渗动态研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1):56-59. (ALAMUSA, JIANG Deming, PEI Tiejiao. Soil moisture infiltration dynamics in plantation of Caragana microphylla in Heerqin sandy land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004,23(1):56-59. (in Chinese))
- [58] 李小军,汪君,高永平. 荒漠化草原植被斑块分布对地表径流、侵蚀及养分流失的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5):1112-1118. (LI Xiaojun, WANG Jun, GAO Yongping. Effects of vegetation patchy distribution on runoff, erosion and nutrients loss in desertified steppe area[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5):1112-1118. (in Chinese))
- [59] 查轩,唐克丽,白红英. 植被恢复对土壤抗侵蚀特性影响的研究[J]. 水土保持研究, 1993(1):37-43. (ZHA Xuan, TANG Keli, BAI Hongying. The effects of vegetation restoration on soil erosion resistance characteristics[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1993(1):37-43. (in Chinese))
- [60] GREENE R S B, CHARTRES C J. The effect of fire on the soil of the degraded semiarid woodland I: cryptogam cover and physical micromorphological properties[J]. Australian J Soil Res, 1990,28(5):755-777.
- [61] BOERS T M, GIDEON O, 张汉雄. 微集水区雨水回收的经济效益评价[J]. 水土保持科技情报, 1986(4):21-24. (BOERS T M, GIDEON O, ZHANG Hanxiong. Economy benefit evaluation on rainwater recycling in micro-water catchment[J]. Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 1986(4):21-24. (in Chinese))
- [62] 尹祚栋. 径流林业: 旱塬曙光[J]. 青海农林科技, 1994(4):57-58. (YIN Zuodong. Runoff forestry: Hanyuan dawn[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 1994(4):57-58. (in Chinese))
- [63] 王斌瑞,王百田,张府娥. 黄土高原径流林业技术研究[J]. 林业科技通讯, 1996(9):13-15 (WANG Bingrui, WANG Baitian, ZHANG Fue. Research on Loess Plateau runoff forestry technology[J]. Forest Science and Technology, 1996(9):13-15. (in Chinese))
- [64] 马全林,王继和,赵明,等. 退化人工梭梭林的恢复技术研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(2):151-157. (MA Quanlin, WANG Jihe, ZHAO Ming, et al. Research on restoration technology of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* forest[J]. Forest Research, 2006, 19(2):151-157. (in Chinese))
- [65] 安富博,孙坤,王继和,等. 绿洲边缘退化梭梭林地集流试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(1):115-120. (AN Fubo, SUN Kun, WANG Jihe, et al. A study on precipitation collection on the degenerated *Haloxylon ammodendron* woodland on oasis boundary[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2006, 27(1):115-120. (in Chinese))
- [66] 黄丕振,刘志俊,崔望诚. 梭梭集水造林初步研究[J]. 新疆农业科学, 1985(6):23-25. (HUANG Pizhen, LIU Zhijun, CUI Wangcheng. Preliminary research on *H. ammodendron* catchment afforestation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1985(6):23-25. (in Chinese))
- [67] 刘钰华,张纯,刘晋. 梭梭的径流造林技术[J]. 新疆林业, 1987(5):23. (LIU Yuhua, ZHANG Chun, LIU Jin. Techniques for *H. ammodendron* runoff forestation[J]. Forestry of Xinjiang, 1987(5):23. (in Chinese))
- [68] 鲁天平,史征,刘永萍,等. 风沙砾石戈壁下深沟集水造林方式研究[J]. 南方农业学报, 2012, 43(11):1737-1740. (LU Tianping, SHI Zheng, LIU Yongping et al. Research on deep groove catchment afforestation modes of sand gravel gobi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(11):1737-1740. (in Chinese))
- [69] 胡希远,陶士珩,王立祥. 半干旱偏旱区糜子沟垄径流栽培研究初报[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1):44-49. (HU Xiyuan, TAO Shiheng, WANG Lixiang. Research on ridge and furrow planting of prosoin semi-arid and drought-inclined areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(1):44-49. (in Chinese))
- [70] 王俊鹏,韩清芳,王龙昌,等. 宁南半干旱区农田微集水种植技术效果研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(4):16-20. (WANG Junpeng, HAN Qingfang, WANG Longchang, et al. Research on the technique of micro-water harvesting plant in semiarid area of South Ningxia[J]. Journal of Northwest A&F University, 2000, 28(4):16-20. (in Chinese))
- [71] 刘广才,杨祁峰,李来祥,等. 旱地玉米全膜双垄沟播技术土壤水分效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6):18-28. (LIU Guangcai, YANG Qifeng, LI Laixiang et al. Effect of dryland corn all membrane technology on the double ditch planting on the soil moisture[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(6):18-28. (in Chinese))

- Chinese))
- [72] 任小龙,贾志宽,韩清芳,等. 半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响[J]. 农业工程学报,2007, 23(10): 45-50. (REN Xiaolong, JIA Zhikuan, HAN Qingfang, et al. Effect of ridge and furrow rainfall harvesting planting system on production of summer corn (*Zeamays L.*) under simulated rainfall conditions in semi-arid areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(10): 45-50. (in Chinese))
- [73] 张建新,郑大玮. 国内外集雨农业研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究,2005, 23(2): 223-229. (ZHANG Jianxin, ZHWNG Dawei. Advances and expectations of international rainwater catchment researches [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(2): 223-229. (in Chinese))
- [74] 李锋瑞. 干旱农业生态系统研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1998.
- [75] TABOR J A. Improving crop yields in the Sahel by means of water-harvesting [J]. Journal of Arid Environments, 1995,30(1): 83-106.
- [76] 宋云民,周泽福,党宏忠. 北方半干旱沙地植被建设中节水技术的应用研究进展[J]. 世界林业研究,2006, 19(6): 22-26. (SONG Yunmin, ZHOU Zefu, DANG Hongzhong. Progress of application research of water-saving technologies in vegetation recovery in Northern semi-arid sandy area[J]. World Forestry Research,2006, 19(6): 22-26. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-09-17 编辑:熊水斌)

(上接第 27 页)

- [5] KIM D G. Numerical analysis of free flow past a sluice gate [J]. Journal of Civil Engineering,2007, 11(2): 127-132.
- [6] ROTH A, HAGER W H. Underflow of standard sluice gate [J]. Experiments in Fluids,1999, 27(4): 339-349.
- [7] WANG Huaming, ZOU Zaojian, TIAN Ximin. Numerical simulation of transient flow around a ship in unsteady berthing motion [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2009, 21(3): 379-385.
- [8] 傅宗甫,严忠民. 新型浮体闸的稳定性分析[J]. 水利学报,2005, 36(8): 1014-1018. (FU Zongfu, YAN Zhongmin. Stability analysis on a new type of floating sluice [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 1014-1018. (in Chinese))
- [9] ZOU Lin, LIN Yufeng. Force reduction of flow around a sinusoidal wavy cylinder [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2009, 21(3): 308-315.
- [10] ZHANG Jun, MIAO Guoping. A liner hybrid model of mse and bem for floating structures in coastal zones [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2006, 18(3): 649-658.
- [11] SHI Zhongkun, WU Fangliang, ZHOU Feng. Fluid dynamic performance of grooved planing boat and its effect on resistance [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2005, 17(5): 571-579.
- [12] ZHANG Jun, MIAO Guoping. Analytical models of floating bridges subjected by moving loads for different water depths [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2008, 20(5): 735-740.
- [13] ZHU Renchuan, MIAO Guoping, YOU Yunxiang. Influence of gaps between 3-D multiple floating structures on wave forces [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2005, 17(2): 141-147.
- [14] SUN Ren, CHWANG A T. Interaction of a floating elliptic cylinder with a vibrating circular cylinder [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2006, 18(4): 481-491.
- [15] 傅宗甫,严忠民,吕家才. 大型浮体闸模型水工试验方法[J]. 水利水电科技进展,2007, 27(5): 6-9. (FU Zongfu, YAN Zhongmin, LÜ Jiakai. Method for hydraulic model test of large-scale floating sluice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(5): 6-9. (in Chinese))
- [16] KOVALEV S V. Investigation and operation of water gates [J]. Power Technology and Engineering, 2009, 43(2): 99-102.
- [17] FU Zongfu, YAN Zhongmin. Experimental study on resistance characteristics in pulling process of pontoon gate [C]//Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 1646-1651.
- [18] WANG Wei, YANG Yongquan, XU Weilin, et al. Experimental investigation of emergency gate shutting for orifice tunnel [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2002, 14(3): 29-34.
- [19] 陆志妹,缪国平,朱仁传,等. V形贯底式防波堤上波浪作用力的解析研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(1): 135-141 (LU Zhimei, MIAO Guoping, ZHU Renchuan, et al. Analytical research on the wave force exerted on V-shaped bottom-mounted breakwaters [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser A, 2007, 22(1): 135-141. (in Chinese))
- [20] 林建筑,郑振飞,卓卫东. 泉州后渚大桥船撞力试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 58-60. (LIN Jianzhu, ZHENG Zhenfei, ZHOU Weidong. Experimental study of force of ship collision with Houzhu bridge of Quanzhou [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 58-60. (in Chinese))
- [21] WU Chao, HUANG Guofu, ZHANG Ting, et al. Bearing forces of emergency gate during shut off [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2000, (1): 42-48.
- (收稿日期:2014-05-04 编辑:熊水斌)