

干旱区生态水文过程研究若干问题评述

赵文智 程国栋

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000. E-mail: zhaowzh@west163.com)

摘要 评述了干旱区生态水文过程研究的若干进展, 提出了临界生态需水量、最适生态需水量和饱和生态需水量的概念, 探讨了相应的确定方法. 强调了人工植被的建设应在加强对干旱区天然植被格局与生态水文效应、具有水力提升功能植物识别、植物吸收的水分来源、生态需水量及生态地下水位等方面研究的基础上, 从恢复生态学和生态水文学的角度, 确定干旱区适宜人工植被的种类组成和格局.

关键词 干旱区 植被格局 生态水文效应 植物水力提升 植物水分来源 生态需水.

占陆地面积约 1/3 的干旱地区主要分布在南北回归线及北半球 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间, 涉及全球 20 多个国家, 是陆地生态系统的重要组成部分, 对区域乃至全球气候变化和生态功能的维持具有重要作用. 中国干旱区在广义上既包括分布在 35°N 以北、 106°E 以西的广大内陆河流域, 也包括分布在北方农牧交错带降水量介于 300~400 mm 之间的半干旱地区. 全球和区域尺度的气候变暖已引起了干旱区许多水文过程变化, 气候变暖加上频繁的人类活动也诱发了干旱区的环境退化, 其中生态系统退化是干旱区的普遍性问题, 主要以土地荒漠化为标志^[1]. 虽然具体区域的变化速率和强度尚未完全定论, 但已经确定土壤侵蚀的峰值出现在降水量 300~500 mm 的地区^[2]. 气候变暖已经引起了中国干旱区水文过程的根本性变化, 例如塔里木河和黑河等内陆河的断流及流域生态环境的恶化, 直接威胁干旱区经济社会可持续发展的生态基础.

近年来干旱区生态过程和格局的水文学机制的研究已成为生态环境研究前沿和需求热点, 如旨在深入了解干旱区自然和人为诱发的环境变化后果的欧洲荒漠化威胁地区的试验研究计划(EFEDA), 半干旱热带地区水文大气先行性研究计划(Hapex-Sahel)^[3~5], 半干旱区陆面-大气研究计划(SALSA)^[6]以及黑河地区地气相互作用观测试验研究计划(HEIFE)^[7]. 国际地圈生物圈计划(IGBP)也把“水循环的生物学方面(BACH)”作为核心计划之一以便为评估气候变化和土地利用变化对生物圈和地球可居住性的影响提供有关陆面水文-生态过程方面的知识^[8].

干旱区水文过程控制植被的生长发育, 天然植

被和人工植被又是水土流失和土地荒漠化的主要调控者, 所以水文循环过程的改变往往是干旱区所有生态环境问题如水土流失和土地荒漠化的直接驱动力. 因此, 生态水文过程的机理是干旱区环境保护和恢复重建中必须面对的基础科学问题. 对其深入研究不仅可以为天然生态系统的可持续维持, 而且可以为退化生态系统的恢复重建提供科学依据, 从而为我国广大干旱区经济、社会和生态环境协调可持续发展提供重要的生态水文学依据. 因此, 在我国深入开展干旱区生态水文过程若干基础理论问题研究具有重要的理论和现实意义. 干旱区生态过程涉及范围广, 本文仅对干旱区植被格局及其生态水文效应、干旱区植物吸收水分机理、干旱区生态系统维持的水分来源、生态需水量和生态地下水位、干旱区生态水文模型等若干问题的研究进展予以评述, 对我国干旱区生态水文过程研究现状进行回顾并提出研究的主要方向, 旨在推动我国相关研究的深入开展.

1 干旱区植被格局及其生态水文效应

植被与其所处的生物气候带高度耦合. 植被的大小、盖度和多样性与降水水文过程高度相关. 在连续的干湿梯度上, 从半荒漠区(降水量 300~400 mm)到荒漠区(降水量不足 120 mm), 再到极端荒漠区(降水量不足 70 mm), 植被类型明显不同. 当降水量不足 400 mm 时, 乔木就不能生长, 120 mm 的等雨量线是草原和荒漠植被的界线, 70 mm 的等雨量线是盖度不足 10% 的稀疏矮小灌木散生植被(diffuse)和低洼集水地段生长的集聚植被(contract)的分界线^[9,10]. 植被与气候耦合的生物地带性规律是干旱区植被建设必须遵从的生态规律.

干旱区的气候、土壤和植物群落具有特殊性. 如少而且变异很大的降水量决定了水文和生态条件的高度变化^[4], 因而植被也存在明显的斑块格局, 这种格局与降水量(P)和潜在蒸发量(E_p)的比值高度吻合. 从 $P/E_p > 1$ 到 $P/E_p < 0.3$ 的地区, 植被由连续覆盖的森林和草原向不连续的斑块状格局过渡.

Van der Maarel^[11]发现干旱区植被存在明显的斑块状格局, 而且随时间和空间发生明显的变化, 斑块内植被的密度往往很大, 有机质很高. 人为活动和气候变化导致的水文过程变化往往会引起植被和土壤资源格局的改变^[12]; 对干旱区植被的格局及其生态水文效应已进行了广泛的研究^[12~14]. 已经认识到植被丛周围往往形成一个土壤养分、水分和微生物的富集区, 即植被丛的“肥岛”^[15,16]. 它既是植被作用的结果, 又促进植被斑块状格局的形成.

干旱区研究表明植被斑块状格局具有如下生态水文效应: (1) 通过遮荫根区土壤, 减少土壤蒸发的损失; (2) 通过树干径流增加土壤湿度; (3) 增加降水的直接渗透, 减少地表径流; (4) 使多数叶片处于低温高湿的环境, 降低叶面蒸腾损失; (5) 将养分保留在土壤中从而减少养分损失; (6) 减轻放牧压力; (7) 提供小动物遮荫环境, 小动物的栖息活动又增强了土壤的养分和水分; (8) 将资源输入到根区而不是通过根系生长去捕获资源, 从而降低了地下生物量的消耗.

干旱区植被的组分和格局实质上是由水文过程所控制的, 同时, 植被在不同尺度上对水文过程产生反馈. 在区域尺度上, 近 40 年来关于干旱区径流形成和泥沙搬运方面所建立的一般模型, 似乎是可用的. 在较小尺度上, Schlesinger 等人^[12]研究表明斑块状格局的改变而引起的土壤资源异质性的增加与荒漠化过程有关, 但关于植被斑块格局、径流形成、泥沙沉积和养分侵蚀之间的内在关系方面还有许多细节问题的研究可以说才刚刚起步.

在干旱区要取得数据往往是特别困难的, 为了进一步了解干旱区的生态水文过程, 模拟是一种有效方式. 具有高时空分辨率又能与迅速发生的过程和长期过程相耦合的模型, 是必要的. 利用模型和生态水文实验对干旱区比较稳定的生态系统中不同类型植被不同尺度斑块的生态水文效应研究有待加强, 以便在人工植被建设中进行模拟, 这也是退化生态系统恢复重建的需求之所在.

2 干旱区植物水分吸收机理和水分依赖

干旱区的水文过程特别是地下水和地表水变化控制着生态过程, 生态系统的主体植物为了适应水文过程的变化也表现出许多适应方式. 例如, 许多植物在一部分根系处于土壤干旱条件下, 仍可以利用有限的土壤水分供应来维持气体交换、水分平衡和生长, 但植物利用土壤水分的量因植物而有很大差异^[17~19]. 有些植物根系可以伸展到深层湿的土壤中吸收土壤水分. 耐旱植物比农作物具有更多的根系从而增强了从干旱土壤中吸收水分的能力^[20,21], 例如 Gallardo 等人^[18]报道野莴苣(*Lactuca serrilola*)具有深根系而种植的莴苣(*Lactuca sativa*)具有浅根系, 当土壤干旱时, 野莴苣可以吸收深层土壤水分而种植的莴苣则不能.

干旱区有些植物还具有“水力提升”和“逆水力提升”的功能, 深根性植物可以将深层土壤水(甚至是浅层地下水)通过根系提升到浅根系植物的根际圈后释放到土壤中供浅根系植物吸收利用^[22~24]. 植物的水力提升作用将浅层地表水和植被联系起来, 浅层地表水的变化不仅影响植被的生长, 而且会影响植被组成的变化. 有些植物的浅层根系吸收的水分通过延伸的根系输送到深层后再释放到土壤中保存起来供其他深根性植物利用, 这样就会提高降水的利用率. 水力提升植物改善了其伴生植物的蒸腾作用, 缓解了水分亏缺^[25]. 目前已发现具有水力提升功能的植物主要有野牛结缕草(*Buffalo zoysiagrass*)、麦耶氏结缕草(*Meyer zoysiagrass*)^[21]、三齿蒿(*Artemisia tridentata*)^[22]、百慕大草(*Bermudagrass*)^[26]和梨果仙人掌(*Opuntia ficus-indica*)^[27]. Schulze 等人^[23]报道在干旱的 Kalahari 沙地上植物存在逆水力提升现象. 在干旱区具有水力提升功能的植物肯定还有, 加强对这类植物的识别研究是植被重建的需求热点.

干旱区土壤水分具有较强的异质性^[12,28], 干旱区植物往往通过改变水分吸收的空间格局来响应根区土壤水分的异质性. 处在土壤湿度高的环境中的根系吸收较多的水分以补偿土壤湿度低的环境中的根系吸收水分的不足. 当一部分根区的土壤水分有效性降低而另一部分根区的土壤水分有效性正常时, 水分有效性正常的根区吸收水分的能力增加^[29~31]. Moreshet 等人^[32]研究表明给橘子树的部分根系灌溉供水, 而一部分根系处于干旱状态, 则从部分灌溉土壤根系吸收的水分占整个生长季蒸腾水分的 90%, 而

剩余 10%来源于干旱土壤中. Tan 等人^[33]报道桃(*Prunus persica*)幼苗只要一半的根系得到灌溉就可满足整个幼苗的需水量. 干旱区植物吸收水分对土壤水分异质性的这种响应方式也是植物适应干旱生境的主要机理, 但目前对多数植物这方面的了解较少.

干旱区植物的水力提升功能及水分利用方式可能是生态系统维持稳定的关键, 这也是干旱区人工植被建设中植物种选择值得模拟之处. 目前的研究仅局限于少数典型植物, 但对生长在干旱区的大部分植物, 特别是组成天然植被的植物来说是否都具有上述水分利用机理尚待研究, 这方面的理论攻关和知识基础对干旱区生态系统的恢复重建有重要指导意义.

此外, 有些学者还利用建立数学模型的方法来研究根系的吸收水分特点, 例如邵明安^[34]在对植物根系吸水物理过程定量分析的基础上, 提出了一个能反映根系吸水机理的宏观数学模型; 康绍忠等人^[35]根据冬小麦根系伸展深度、重量根密度以及土壤含水量分布的实测资料, 对冬小麦根系吸水分布进行了动态模拟, 建立了冬小麦根系吸水模型. 这些研究开创了定量研究根系吸收水分研究的领域. 但类似的研究主要集中在农作物方面, 而对天然植被和农林复合系统的研究较少.

3 干旱区生态系统维持的水分来源

组成干旱区生态系统的植物特别是非地带性中旱生植物吸收的水分除来源于降水外, 还可能来源于地表水、土壤水和地下水. 环境管理者和政策制定者希望了解植被吸收的水分来源的比例及其时间变化规律以制定环境管理的政策. 20 世纪 70 年代同位素技术被广泛应用于生态学和水文学研究领域, 并迅速成为该领域研究的有效手段之一.

环境同位素技术在确定植物水分来源和利用方面得到了广泛的应用^[36~38]. 应用稳定氧氢同位素技术对澳大利亚河岸桉树(*Eucalyptus* spp)生长季节蒸腾的水分来源的研究表明, 桉树蒸腾消耗的水分来自地下水、降水转化的土壤水和河流的地表水^[39~42]. 加利福尼亚山区常年河沿岸, 树木生长季节早期蒸腾的水分主要来源于土壤中, 而在大部分土壤干燥季节则来自地下水^[43]. 在亚利桑那西部的常年和季节性河流沿岸, 弗里芒氏杨(*Populus fremontii*)和古丁氏柳(*Salix goodingii*)在生长季节蒸腾的水分均来

自地下水^[44]. 犹它州槭树林(*Acer negundo*)蒸腾的水分来自地下水而不是降水和地表水^[45], 但在亚利桑那这种树木蒸腾的水分却来源于河流水和降水^[46]. 亚利桑那 San Pedro 河流沿岸弗里芒氏杨夏季雨季蒸腾的水分 26%~33%来自降水转化的土壤水, 而古丁氏柳蒸腾的水分却来源于地下水^[47]. 上述研究说明, 干旱区植物吸收的水分来源因植物种和时间的不同而不同.

干旱区本身的降水不足以维持其生态系统特别是非地带性的中旱生植被组成的生态系统的正常运转. 例如, 中国干旱区天然绿洲生态系统维持的水资源绝大部分来源于地下水和干旱区内孤立分布的高山拦截的地表水, 而不是降水. 干旱区有限的水资源在年际和年内的分配都是不均匀的, 如何利用干旱区十分有限的水分维持生态系统的正常运转, 需要对于干旱区特殊的植被吸收的水分来源及其分配规律进行深入研究. 利用环境同位素技术确定干旱区生态系统主要植被吸收的水分来源研究案例在中国较少, 而这恰恰是中国干旱区人工植被建设植物种选择与配置的科学依据之一, 据此可以根据干旱区特定地域的水分特点, 指导营造与局地水分条件相适应的植被模式.

4 生态需水量及生态地下水位研究

一般而言生态需水是指改善生态环境质量或维护环境质量不至于进一步下降所需的水量. 从广义上讲, 维持全球生物地球化学平衡诸如水热平衡、源汇库动态平衡、生物平衡、水沙平衡、水盐平衡所需要的最低水分消耗都是生态需水. 用于河流水质保护和鱼类回游等所需的最低水量也属生态需水的范畴. 但迄今为止, 还没有一个明确的生态需水定义, 因而使得使用者在该概念的外延理解上尚有一些差异. 对于生态环境脆弱区, 生态需水应当指维护生态环境不再进一步恶化并逐渐改善所需地表水和地下水资源总量. 对于荒漠绿洲来说, 生态需水是指对绿洲景观的稳定和发展及绿洲环境质量维持和改变起支撑作用的系统所消耗的水量^[48]. 植被在维护生态环境的稳定方面具有不可替代的作用, 因此植被建设的生态需水量应该首先得到保证.

植被建设的生态需水量具有区域性, 计算时应根据不同区域的典型植被耗水特征, 结合降水补给土壤水分的实际可利用量或根据不同区域实测不同

类型植被减少河川径流资料确定生态用水定额,进而根据不同植被类型的面积计算生态需水量.我国有关研究人员已经开始关注生态需水量的研究,如新疆的生态需水量的估算^[49,50].

干旱区植被耗水量因供水条件的差异具有很大的可塑性.因此,在干旱区生态需水研究中严格界定相关的概念是十分重要的.我们认为干旱区植物需水量又可划分为临界需水量、最适需水量和饱和需水量.临界需水量指维持干旱区植物生存的最小耗水量;最适需水量指干旱区植物具有正常的功能特别是防护功能的耗水量;饱和需水量指干旱区光温生产潜力得以最大发挥时的植物耗水量.生态需水量的确定必须从土壤水分状况、植物生长模型、植物蒸腾三方面综合考虑,而且还应考虑个体、群落、生态系统等尺度转换问题.此外,还应考虑植物消耗的水分来源于地下水、地表水和降水的比例和时间变化.维持生态系统的正常运转的水分除植物蒸腾外还有土壤蒸发,所以用植物耗水量确定的生态需水量还应加 25% 的水分^[50].

野外观测和风洞模拟可以用来研究植被防护功能(降低风速、减少风蚀)与植被盖度、植物冠幅和高度的关系.通过对不同盖度、冠幅和高度的植被降低风速和阻沙效果的风洞模拟和野外观测,可以建立防护功能与植被特性的函数关系.通过热脉冲树干径流仪测定树干液流,计算出具有不同生长状况的植被耗水量,将生长量与耗水量回归拟合,即可得到植被的生长水文模型.生长水文模型中达到具有正常防护功能的植被盖度、植冠大小和高度的植物生长状况对应的耗水量就是最适需水量.植被盖度、植物冠幅、高度达到最大时对应的耗水量为饱和需水量.植物维持在现有的生长状况,当年生长量接近零时对应的耗水量为临界生态需水量.

在干旱地区,生态用水和经济用水的合理分配问题既是一个科学问题,又是一个政治问题.生态需水量不仅是干旱区生态系统健康诊断的一个关键性指标,而且也是水资源在生态环境建设和国民经济各行业合理分配的关键依据.因此,近几年生态需水的问题在干旱区研究方面受到广泛关注.我们虽然初步建立了确定 3 种生态需水量的框架,但在实际研究中的测试技术、尺度转换等问题仍待改进.

干旱荒漠区降水稀少,地带性植被为荒漠植被,十分稀疏.而对生态环境起主要作用的是主要依靠

地下水维持的非地带性中生和中旱生植被.因此,宋郁东等人^[51]提出把满足干旱区非地带性天然植被生长需要的地下水位埋藏深度称作生态地下水位(简称生态水位).在干旱区影响植物生长的主要因素是土壤盐分和水分,两者都与地下水位高低有关.当地下水位过高时,溶于地下水中的盐分受蒸发影响就会在土壤表层聚积,导致盐渍化,不利于植物的生长.当地下水位过低时,地下水不能通过毛管上升到植物可以吸收利用的程度,导致土壤干化、植被衰败,发生土地荒漠化.因此,把既能减少地下水强烈蒸发返盐,又不造成土壤干旱而影响植物生长的地下水位称为合理地下水位^[51].为此,有关学者从不同角度提出了适宜水位、最佳水位、盐渍临界深度、生态警戒水位等^[52,53],王让会等人^[50]列举了沼泽化水位、盐渍化水位、沙漠化水位的主要特征,袁生禄^[54]研究了地下水位与植物生命活动强度的关系.

上述研究建立了生态地下水位的基本概念性框架,并据此确定了一些典型荒漠植物的生态水位,但这些研究都受测试手段的限制,仅仅停留在定性、最多是半定量的描述阶段.

5 干旱区生态水文模型研究

目前已经开发出许多干旱区水文模型^[55~57]、生态模型^[58]及生态水文耦合模型^[59~62].有些生态水文模型已成功地揭示了许多生态过程的机理.如荒漠化试验模型模拟表明:荒漠化导致植被覆盖度的降低,反射率增加,潜热通量损失降低,感热通量损失增加,湍流减少,形成的云量减少及降水减少,如此循环导致荒漠化加剧^[3,9].Dunkerley^[63]通过模拟指出,在干旱和放牧的压力下,植被的斑块状格局往往是生态系统的一种稳定状态^[63],植被防止土壤侵蚀的效果是植被盖度、植冠大小、植被高度和植被空间格局的函数.

邵明安等人^[64]提出了一个较理想的描述土壤-植被-大气系统中水流运动的瞬态流模型,并全面分析了 SVATs 水流阻力各分量的大小、变化规律及其相对重要性.他们提出的根系吸水函数将土壤水分有效性的研究和根系吸水速率结合起来^[65,66].康绍忠^[67]也提出了根区土壤水分动态,作物根系吸水、蒸腾、蒸发 3 个子系统的 SVATs 传输模拟模型.这些模型的建立很好地阐明了干旱黄土区水分运动机理及土壤水分的有效性,为中国开展类似工作提供了借

鉴。但这些研究多局限于农作物方面。干旱区低的植被覆盖度意味着土壤-植被-大气传输(SVATs)过程特别复杂^[68,69],这种复杂性主要表现在两个方面:(1)与具有连续覆盖的湿润环境的森林和草地植被相比,干旱区不连续的植被覆盖导致大气下垫面的复杂化;(2)干旱地区土壤边界、植被边界层行为明显。近期的许多实验模型虽然已经考虑到了界面层的复杂性,如北非作物与条斑灌丛生态水文模型^[63]和地中海灌木林地、雨养农业和灌溉农业模型^[9]。但对描述干旱区复杂的生态过程仍需改进。

在干旱区生态水文模型的研究方面除了要加强天然植被和其他农林复合系统 SVATs 中水分运动机理的研究,还要加强对植被防止土壤侵蚀的效果与植被盖度、植冠大小、植被高度和植被的斑块格局的函数的精确关系的确定。这些研究将会对干旱区植被管理和建设提供重要的科学依据。

6 中国干旱区生态水文过程研究

中国干旱区具有明显的特点,即高山冰川、森林草原到平原绿洲和戈壁荒漠构成了一个干旱区复合生态系统,生态系统要素之间相互依存,相互制约,水资源是维持该复合生态系统的纽带^[70]。此外,人类活动而引起的荒漠化和绿洲化同时发生。因此,生态水文过程具有特殊复杂性。

在水文方面对内陆河流域的黑河、塔里木河的水文循环研究方面的研究已经基本摸清了主要水文过程的时空分布和变化规律^[71],在干旱区植物水分生理生态方面对主要植物种的耐旱性和林地的土壤水分已有较清楚的认识^[72~76]。对区域内地下水的变化与天然植物群落的消长研究表明,浅层地下水水质对植物的生长发育也有很大影响。对于胡杨、柽柳、芦苇、罗布麻、甘草、骆驼刺等荒漠植物而言,当地下水矿化度小于 3.0 g/L 时天然植被生长状况良好,当地下水矿化度介于 3.0~7.0 g/L 时天然植被生长状况一般,当地下水矿化度介于 7.0~10.0 g/L 时天然植被生长就会受到抑制^[50,77,78]。但就浅层地下水变化对天然植被组成、结构和生物生产力的影响,浅层地下水变化对天然植被根际圈周围的土壤湿度变化以及土壤湿度变化如何影响植物蒸腾作用等方面尚未开展过系统研究。在生态需水研究方面,贾宝全等人^[48]计算了新疆的生态用水,王让会等人^[50]研究了塔里木河“四源一干”的生态需水量。

总体而言,中国干旱区生态水文过程的研究积累十分薄弱,对干旱区天然植被植物水分利用机理的研究基本处于空白状态。目前的知识积累尚不足以回答维持干旱区生态系统健康的水分从哪里来、如何来、需要多少的问题。中国以往在干旱区人工植被建设特别是大面积的防止土壤侵蚀的人工植被建设仅强调了植被盖度和高度两个方面,而未重视植被的斑块格局及其合理配置的方式,所以出现了北方人工植被土壤旱化、稳定性低等问题^[79]。

在今后的研究中,应加强干旱区天然植被格局及其生态水文学机制、具有水力提升功能植物识别、确定植物吸收的水分来源、计算不同尺度的生态需水量及主要植被类型的生态地下水位等方面的研究。应用生态水文学实验和数学模型的方法深入开展小尺度上植被斑块格局、径流形成、泥沙沉积和养分侵蚀的内在关系的研究。人工植被的建设应在对天然植被特性深入认识的基础上进行模拟。从恢复生态学和生态水文学的角度,确定干旱区适宜的人工植被的种类组成和斑块格局,确定干旱区植被防止土壤侵蚀功能与植被盖度、植冠大小、植被高度和植被斑块格局函数的精确关系,为干旱区生态系统的可持续管理,为干旱区退化生态系统的恢复重建奠定坚实的生态水文学基础。

致谢 本工作受中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新课题(210049)、国家自然科学基金重点项目(批准号:49731030)和中国科学院知识创新项目(KZCX01-09)资助。

参 考 文 献

- 1 UNEP. Climate change information kit. United Nations Environment Programme, Information Unit for Conventions, Chatelaine. Switzerland, January, 1997
- 2 Langbein W B, Schumm S A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Transactions of the American Geographical Union, 1958, 39: 1076~1084
- 3 Goutorbe J P, Lebel T, Tinga A, et al. HAPEX-Sahel——a large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid Tropics. Annales Geophysicae-Atmosphere, Hydrospheres and Space Sciences, 1994, 12(1): 53~64
- 4 Goutorbe J P, Lebel T, Tinga A, et al. An overview of HAPEX-Sahel: A study in climate and desertification. Journal of Hydrology, 1997, 188-189: 4~17
- 5 Bolle H J, Andre J C, Arrue J L, et al. European field experiment in desertification threatened areas. Annales Geophysicae, 1993, 11: 173~189
- 6 Goodrich D C, Chehbouni A, Golf B, et al. Preface paper to the

- Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program special issue. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105(1-3): 3~20
- 7 胡隐樵. 陆面过程野外观测试验的进展. *地球科学进展*, 1992, 7(3): 37~42
- 8 Hutjes R W A, Kabat P, Running S W, et al. Biospheric aspects of the Hydrological Cycle. *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 1~21
- 9 Baird A J, Wilby R L. *Ecohydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*. London: Routledge, 1998. 78~123
- 10 Beatley J C. Phenological events and their environmental triggers in Mojave Desert ecosystems. *Ecology*, 1974, 55: 856~863
- 11 Van der Maarel E. Vegetation dynamics: Patterns of change in time and space. *Vegetation*, 1988, 77: 1~9
- 12 Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, et al. Biological feedbacks in global desertification. *Sciences*, 1990, 247: 1043~1048
- 13 Lefever R, Lejeune O. On the origin of tiger bush. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1997, 59(2): 263~294
- 14 Cedra A. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments*, 1997, 36: 37~51
- 15 Allen M F. Belowground spatial patterning: Influence of root architecture, microorganism and nutrients on plant survival in arid lands. In: Allen E B, ed. *The Reconstruction of Disturbed Arid Ecosystems*. Boulder: Westview Press, 1988. 113~135
- 16 Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2): 364~374
- 17 Blum A, Johnson J W. Wheat cultivars respond differently to a drying top soil and a possible non-hydraulic root signal. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 264: 1149~1153
- 18 Gallardo M, Jackson L E, Thompson R B. Shoot and root physiological responses to localized zones of soil moisture in cultivated and wild lettuce (*Lactuca* spp). *Plant Cell Environment*, 1996, 19: 1169~1178
- 19 Tardieu F, Zhang J, Davies W J. What information is conveyed by an ABA signal from maize roots in drying field soil? *Plant Cell Environment*, 1992, 15: 185~191
- 20 Huang B, Duncan R R, Carrow R N. Drought-resistance mechanisms of seven warm-season turfgrass under surface soil drying. I. Root aspects. *Crop Science*, 1997, 37: 1863~1869
- 21 Huang B. Water relations and root activities of Buffalo Zoysia-grass in relation to localized soil drying. *Plant Soil*, 1990, 208: 179~186
- 22 Richards J H, Caldwell M M. Hydraulic lift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia*, 1987, 73: 486~489
- 23 Schulze E D, Galdwell M M, Galdwell J, et al. Downward flux of water through roots (i.e. inverse hydraulic lift) in dry Kalahari sands. *Oecologia*, 1998, 115: 460~462
- 24 Wraith J M, Baker J M. High resolution measurement of root water uptake using automated time-domain reflectometry. *Soil Sciences Society of American Journal*, 1991, 55: 928~932
- 25 Galdwell M M, Richards J H. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia*, 1989, 79: 1~5
- 26 Baker J M, van Bavel C H M. Resistance of plant roots to water loss. *Agronomy Journal*, 1986, 78: 641~644
- 27 Huang B, Nobel P. Hydraulic conductivity and anatomy along lateral roots of cacti: Changes with soil water status. *New Phytologist*, 1993, 123: 499~507
- 28 傅伯杰, 杨志坚, 王仰麟, 等. 黄土丘陵坡地土壤水分空间分布数学模型. *中国科学, D辑*, 2001, 31(3): 185~191
- 29 Michel B E, Sharkawi H M. Investigation of plant water relations with divided root systems of soybean. *Plant Physiology*, 1970, 46: 728~731
- 30 Simoneau T, Habib R. Water uptake regulation in peach trees with split-root systems. *Plant Cell Environment*, 1994, 17: 379~388
- 31 Green S R, Clothier B E. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of root zone. *Plant Soil*, 1995, 173: 317~328
- 32 Moreshet S, Cohen Y, Fuchs M. Response of mature "Shamouti" orange trees to irrigation of different soil volumes and similar levels of available water. *Irrigation Science*, 1983, 3: 223~236
- 33 Tan C S, BATTERY M. The effect of soil moisture stress to various fractions of the root system on transpiration, photosynthesis, and internal water relations of peach seedlings. *Journal of American Society Horticulture Science*, 1982, 107: 845~849
- 34 邵明安, 杨文治, 李玉山. 植物根系吸收土壤水分模型. *土壤学报*, 1987, 24(4): 295~305
- 35 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 冬小麦吸水模式的研究. *西北农业大学学报*, 1992, (2): 5~12
- 36 Brunel J P, Walker G R, Keennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining source water used by plants in semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 1995, 167: 351~368
- 37 Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition. *Plant Cell Environment*, 1992, 15: 1073~1082
- 38 Liu B, Phillips F, Hoines S, et al. Water movement in desert soil traced by hydrogen and oxygen isotopes, chloride, and chlorine-36, south Arizona. *Journal of Hydrology*, 1995, 168: 91~110
- 39 Mensforth L J, Thorburn P J, Tyerman S D, et al. Sources of water used by riparian *Eucalyptus camaldulensis* overlying highly saline groundwater. *Oecologia*, 1994, 100: 21~28
- 40 Thorburn P J, Walker G R. Variations in stream water uptake by *Eucalyptus camaldulensis* with differing access to stream water. *Oecologia*, 1994, 100: 293~301
- 41 Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation. *Oecologia*, 1995, 107: 13~20
- 42 Jolly I D, Walker G R. Is the field water use of *Eucalyptus largiflorens* F. Muell. affected by short-term flooding. *Australia Journal of Ecology*, 1996, 21: 173~183
- 43 Smith S D, Welling A B, Nachlinger J A, et al. Functional responses of riparian vegetation to streamflow diversions in eastern Sierra Nevada. *Ecological Application*, 1991, 1: 89~97
- 44 Busch D E, Ingraham N L, Smith S D. Water uptake in a woody riparian phreatophytes of the southwestern United States: A stable study. *Ecological Application*, 1992, 2: 450~459
- 45 Dawson T E, Ehleringer J R. Stream trees that do not use stream

water. *Nature*, 1991, 350: 335~337

46 Kolb T E, Hart S C, Amundson R. Water source and physiology at perennial and ephemeral stream sites in Arizona. *Tree Physiology*, 1997, 17: 151~160

47 Synder K A, William D C. Water resources used by riparian trees varies among stream types on the Pedro River, Arizona. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105: 1-2: 227~240

48 贾宝全, 许英勤. 干旱区生态用水的概念和分类. *干旱区地理*, 1998, 21(2): 8~12

49 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水的初步估算. *生态学报*, 2000, 20(2): 243~250

50 王让会, 宋郁东, 樊自立, 等. 塔里木流域“四源一干”生态需水量估算. *水土保持通报*, 2001, 15(1): 19~22

51 宋郁东, 樊自立, 雷诗栋, 等. 中国塔里木河流域水资源及生态问题研究. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000

52 张天曾. 中国干旱区水资源利用与生态环境. *自然资源*, 1981, (1): 62~67

53 袁长极. 地下水临界深度的确定. *水利学报*, 1964, (3): 50~53

54 袁生禄. 民勤沙漠绿洲地下水生态开采量的初步研究. *水土保持学报*, 1982, (2): 43~105

55 Braud I, Dantas-Antonino A C, Vauclin M A. Stochastic approach to studying the influence of the spatial variability of soil hydraulic properties on surface fluxes, temperature and humidity. *Journal of Hydrology*, 1995, 165(1-4): 283~310

56 Kirkby M J, Neale R H. A soil-erosion model incorporating seasonal factors. In: Gardiner V G, ed. *International Geomorphology, Proceedings of the First International Conference of Geomorphology*. Chichester: Wiley, 1987. 189~210

57 Kirkby M J. A simulation model for desert runoff and erosion. In: *Erosion, Transport and deposition Process, Proceedings of Jerusalem Workshop*. Wallingford: IAHS Publication, 1990, 189: 87~104

58 Uso-Domenech J L, Villacampa-estevé Y, Stubing-Martinez G, et al. MARIOIA: A model for calculating the response of Mediterranean bush ecosystem to climatic variations. *Ecological Modelling*, 1995, 80: 113~129

59 Mulligan M. Modeling hydrology and vegetation change in a degraded semi-arid environment. In: Anderson M G, Brooks S M, eds. *Advances in Hillslope Process*. Chichester: Wiley, 1996. 1039~1049

60 Kirkby M J, Baird A J, Diamond S M, et al. The MEDALUS slope catena model: A physically based process model for hydrology, ecology and land degradation interactions. In: Brandt C J, Thornes J B, eds. *Mediterranean Desertification and Land Use*. Chichester: Wiley, 1996. 303~354

61 Kremer R G, Hunt E R, Running S W, et al. Simulating vegetational and hydrologic response to natural climatic variation and GCM-predicted climate change in semi-arid ecosystem in Washington, USA. *Journal of Arid Environments*, 1996, 33: 23~38

62 Thornes J B. The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: Spatial outcome. In: Thorne J B, ed. *Vegetation and Erosion*. Chichester: Wiley, 1990. 41~53

63 Dunkerley D L. Banded vegetation: Survival under drought and grazing pressure based on a simple cellular automation model. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35(3): 419~428

64 邵明安, 杨文治, 李玉山. 土壤-植物-大气连续体中的水流阻力及相对重要性. *水利学报*, 1986, (9): 8~14

65 邵明安, 杨文治, 李玉山. 黄土区土壤水分有效性的动力学模式. *科学通报*, 1987, (18): 1421~1423

66 邵明安, 杨文治, 李玉山. 黄土区土壤水分有效性研究. *水利学报*, 1987, 32(8): 38~44

67 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及应用. 北京: 水利电力出版社, 1994

68 Noilhan J, Lacarrere P, Dolman B, et al. Defining area-average parameters in meteorological models for land surfaces with mesoscale heterogeneity. *Journal of Hydrology*, 1997, 190: 3-4: 302~316

69 Pelgrum H, Bastiaanssen W G M. An intercomparison of techniques to determine the area-average latent-heat flux from individual in-situ observation a remote-sensing approach using a European field experiment in a desertification-threatened area data. *Water Resources Research*, 1996, 32(9): 2775~2786

70 张志强, 孙成权, 王学定. 甘肃省生态建设与大农业可持续发展研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2001

71 康尔泗. 我国寒区和干旱区水文研究的回顾和展望. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 178~188

72 张国盛. 干旱半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态研究进展. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 368~373

73 冯今朝, 刘新民. 干旱环境与植物的水分关系. 北京: 中国环境科学出版社, 1998

74 杨文治, 邵明安, 彭新德, 等. 黄土高原环境旱化与黄土中水分关系. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(4): 357~365

75 冯今朝, 陈荷生, 康跃虎, 等. 腾格里沙漠沙坡头地区人工植被蒸散耗水与水量平衡研究. *植物学报*, 1995, 37(10): 815~821

76 王积强, 黄丕振, 陈文海. 树木蒸发量之测定. *新疆林业*, 1995(1): 10~13

77 杨志辉, 高志海. 荒漠绿洲边缘降水与地下水对白刺群落消长的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 923~926

78 季方, 马英杰, 樊自立. 塔里木河冲积平原胡杨林的土壤水分状况研究. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 17~21

79 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1): 78~84

(2001-07-24 收稿)