

区域植被水分适宜性研究：基于中国西南季节性旱灾的评述

黄新会¹，李小英¹，穆兴民²，袁华¹，梁启斌¹，姚平¹，于福科³

(1. 西南林业大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 云南大学 生态学与环境学院 环境科学与生态修复研究所, 云南 昆明 650091)

摘要：基于近年中国西南频发的季节性旱灾事件，探讨了区域植被的水分适宜性。分析了区域性旱灾事件中蕴藏的重要科学问题——具有高耗水特性的桉树(*Eucalyptus* spp.)、橡胶树(*Hevea* spp.)人工林的生态需水是否适应于区域降水条件(或能否打破区域生态用水的供需平衡)进而导致旱害。同时分析了植被水分适宜性研究的现状与发展趋势，认为以植被生态需水计算为基础的植被水分适宜性研究进展缓慢且成果缺乏，作为水分适宜性评价基础的植被生态需水研究也存在一些问题。据此提出对云南省典型植被的水分适宜性及其生态需水与区域干旱的关系开展专项研究的建议。

关键词：区域植被；水分适宜性；生态需水；中国西南；季节性旱灾

文献标识码：A

文章编号：1000-288X(2014)04-0301-07

中图分类号：P339

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.072

Research on Water Suitability of Regional Vegetation: Perspectives from Seasonal Drought Disaster Occurred Frequently in Southwest China

HUANG Xin-hui¹, LI Xiao-ying¹, MU Xing-min², YUAN Hua¹, LIANG Qi-bin¹, YAO Ping¹, YU Fu-ke³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University,

Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Environmental Sciences and Ecological Restoration, College of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

Abstract: On the basis of drought disaster occurred frequently in Southwest China in recent years, water suitability of regional vegetation was discussed. An important scientific issue concerned with the seasonal drought disaster was analyzed. The issue was whether could ecological water demand of *Eucalyptus* plantation and *Hevea* plantation be adapted to regional precipitation condition, or whether could ecological water demand of *Eucalyptus* plantation and *Hevea* plantation break the balance of supply and demand of regional ecological water use, and even lead to regional drought disaster. Research status and development trends in water suitability of regional vegetation were analyzed. It was pointed out that no great progress and no symbolic achievement was gotten in research related to water suitability of vegetation that based on the calculation of ecological water demand of vegetation. As for research on ecological water demand of vegetation, the basis for assessment of water suitability of vegetation, there are some problems left. Water suitability of typical vegetation in Yunnan Province and relationship between ecological water demand of regional vegetation and regional drought disaster should be investigated.

Keywords: regional vegetation; water suitability; ecological water demand; Southwest China; seasonal drought disaster

收稿日期:2013-11-20

修回日期:2014-01-01

资助项目:国家自然科学基金项目“云南省典型植被的水分适应性及其生态需水与区域旱灾的关系(31460191)”,“云南省典型人工植被的时空演变及其生态需水与区域性干旱的关系”(31270751),“桉树—紫茎泽兰复合系统的形成机理与生态效应”(31160155);云南大学“中青年骨干教师培养计划”(XT412003)

作者简介:黄新会(1979—),女(汉族),河南省内乡县人,讲师,硕士,主要从事区域生态与水土保持领域的教学与研究工作。E-mail: ylhxh2001@163.com。

通信作者:于福科(1976—),男(汉族),甘肃省灵台县人,博士,主要从事入侵植物生态、区域植被生态等科学研究工作。E-mail: ylyfk2005@aliyun.com。

自 2010 年以来,中国西南地区频发的季节性旱灾,不仅给灾区社会经济和群众生活造成严重影响,而且留给人们无尽的思考与启发,已成为学术界广泛关注和不懈探索的重大科学命题^[1-2]。尤其是 2010 年在云南、贵州、广西、重庆、四川 5 省(区、市)发生的历史罕见,跨季节,持续性特大旱灾震撼华夏,惊动世界。在旱灾发生、发展期间,乃至旱灾结束以后,针对旱灾成因的讨论和争议从未间断,其中,关于旱灾是“天灾”还是“人祸”的争论尤为激烈。在“人祸”论中,有学者指出:桉树(*Eucalyptus* spp.)、橡胶树(*Hevea* spp.)的种植是导致旱灾的“罪魁祸首”^[3-4]。实际上,此前已有学者^[5-8]认识到桉树、橡胶树种植对生态环境的一些不良影响,也早有桉树、橡胶树是“抽水机”等观点盛传。然而,这些观点更多的是一些专家、学者的感性认识或个人见解,尚且缺乏实验验证和统计数据的广泛支持^[9]。分析桉树和橡胶树,二者均为速生性经济树种,都具有水分需求量大的生物学特点。因此,人们迫切需要回答这样一个科学问题:具有高耗水特性的桉树、橡胶树,其在种植区的水分适宜性如何,进一步讲,其人工林的生态需水是否适应于区域降水条件(或能否打破区域生态用水的供需平衡)进而导致区域旱灾。换言之,区域降水条件是否满足桉树、橡胶人工林的生态需水(或能否维持区域水分收支平衡)从而规避旱灾。鉴于近年中国西南地区频发的季节性旱灾中蕴藏的重要科学问题,并结合该地区生态环境可持续发展的战略考量与科技需求,本文主要探讨该区域植被水分适宜性,重点分析其研究现状与发展趋势,并提出研究建议与主攻方向,以期为未来的植被水分适宜性研究提供指导。

植被水分适宜性研究是以植被生态需水为基础评价植被生长环境的主要手段。植被生态需水为自然界或人工生态系统的重要需水类型,指为维持植被正常生长或维持植被生态系统健康所需要的水量^[10],是水分适宜性研究的前提和基础,也是生态需水研究的重要内容。

1 植被(植物)水分适宜性研究概述

水分适宜性是从环境适宜性或气候适宜性^[11]研究中衍生出来的一个专业名词。其主要表征植被(植物)对环境水分条件的适宜程度,同时也反映环境水分条件对植被(植物)生态需水的满足程度^[12]。在国内,水分适宜性研究可追溯到 20 世纪 80 年代我国旱作区作物的水分利用研究和生长环境评价。粗略估计,我国对植被(植物)的水分适宜性研究已有大约 30 a 的发展历程。这期间,我国学者针对旱作区作物

的水分适宜性开展了一些研究。如姚小英等^[12]、杨小利等^[13]分别指出陇东地区种植玉米、苹果的水分条件比较优越,年均水分适宜度均在 0.5 以上;蒲金涌等^[14]的研究显示,1971—2008 年甘肃省河东地区夏秋作物水分适宜度均较低;杨东等^[15]研究发现,在陇南地区不适宜种植棉花,适宜种植大豆、玉米、小麦,但种植小麦需在其生长中后期进行适量的人工灌溉补水等^[16-19]。可是,此类研究成果并不多见。检索结果表明,自 1990 年至今,国内专业学术刊物发表的以水分适宜性(包括水分适应性)为主题的研究论文不足 50 篇,国外针对水分适宜性(包括水分适应性)的研究论文更为罕见。因此,从整体发展看,水分适宜性研究一直处于“徘徊”状态,其仍然属于植物水分利用和抗旱生理研究的一个方向,而没有发展成为一个独立研究领域。进一步分析现有的研究成果发现,目前水分适宜性研究的对象、范围、方法等均比较单一。以国内为例,水分适宜性研究目前仅涉及甘肃、陕西、宁夏、山西等地区的主栽作物(如小麦、玉米)^[12, 14-15]及少数经济林物种(如苹果、杏、桃)^[13, 16-17]等,研究方法局限于模型计算,即根据大气降水量和植物生理需水量的大小关系选择相应的数学公式计算水分适宜度^[12-14, 16-17]或采用模糊数学方法构建水分适宜度隶属函数进而计算函数值^[15, 18-19](表 1)。表明近 30 a 世界范围内植被(植物)水分适宜性研究之发展极其缓慢。在多发季节性干旱的中国西南地区,植被(植物)水分适宜性研究基本是一片空白。然而,基于人工植被构建的区域生态恢复与环境可持续发展对相应科学技术的需求力度却在逐年增加。无疑,植被(植物)水分适宜性研究徘徊不前的发展现状已成为影响区域植被建设与生态恢复的重大障碍。加强植被(植物)水分适宜性研究的广度和深度并推动其向纵深发展已迫在眉睫。

2 植被生态需水研究的理论、方法与实践

生态需水研究源自 20 世纪 40 年代美国为维持河道内鱼类生存而开展的河道基流(base flow)研究,之后发展到河岸带生态需水研究,直到现在开展的流域、区域尺度上的生态需水研究。我国生态需水研究始于 20 世纪 90 年代西北干旱区生态恢复与重建研究。近年,随着理论研究和实践应用的发展,生态需水研究已分化出侧重于生态学、环境学、水文学的 3 个研究方向;同时,伴随流域、区域生态需水研究的快速发展,植被生态需水研究也获得较大发展。以国内为例,近年植被生态需水研究的主要进展有 4 个方面。

(1) 基本厘清了生态需水的相关概念及其相互关系。如郑红星等^[20]科学界定了生态需水、生态储水、生态用水、生态缺水、生态耗水、生态退水等基本

概念(表 2),并提出两个基本关系式,分别为:

$$\text{生态缺水} = \text{生态需水} - \text{生态储水} - \text{生态用水}$$

$$\text{生态退水} = \Delta \text{生态储水} + \text{生态用水} - \text{生态耗水}$$

表 1 中国大陆境内区域植被(植物)水分适宜性研究典型案例

省份(区域)	被研究物种	研究方法	文献作者(发表年份)
甘肃(陇南地区)	农作物(小麦、玉米等)	模糊数学分析	杨东,等(2010) ^[15]
陕西(延安地区)	农作物(小麦、玉米等)	模糊数学分析	徐学选,等(2000) ^[19]
甘肃(河东地区)	夏秋作物(小麦、玉米)	水分适宜度计算	蒲金涌,等(2011) ^[14]
河北(蔚县等地)	冬小麦	PCA—TOPSIS 方法	郑春雨,等(2009)
河南(全省各地)	冬小麦	水分适宜度计算	千怀遂,等(2005)
甘肃(陇西、陇东)	旱作玉米	水分适宜度计算	姚小英,等(2010) ^[12]
山西(太原地区)	18 个玉米杂交种	水分适宜指数 WAI 计算	张健,等(2007)
甘肃(陇东地区)	苹果	水分适宜度计算	杨小利,等(2009) ^[13]
陕西(黄土沟壑区)	杏树林	水分适宜度计算	张思祖,等(2010) ^[16]
甘肃(天水)	桃	水分适宜度计算	蒲金涌,等(2011) ^[17]
宁夏(沙坡头沙区)	固沙植物(柠条、油蒿)	模糊数学分析	岳东霞,李自珍(2003) ^[18]

表 2 生态需水相关概念释义

相关概念	基本内涵	辅助说明
生态需水	在特定的生态目标下,维持特定时空范围内的生态系统水分平衡所需要的总水量	维持生态系统水分平衡所需用的水分一般由维持水热平衡、水沙平衡、水盐平衡等所需用的水分构成
生态储水	在生态系统所处的特定时空范围内储存的或可获取的天然存在的水	从“水银行”的角度看,生态储水是一种“资产”,包括天然储存的水如地下水、土壤水以及部分生物体内的水分等“存款”部分,以及天然获取的水如降水、径流等“收入”部分
生态用水	为实现特定生态目标,人为补充到生态系统中的水量	所谓“实现特定的生态目标”具体指“为维护生态环境不再恶化并逐渐改善”。生态用水有明显的社会属性,即生态用水的大小往往取决于人类社会对生态环境保护的认知和重视程度
生态缺水	特定状态下的生态系统对于预期的生态目标,系统缺乏的、需要加以补充的水量	当生态缺水超过一定的限度或者缺水持续时间过长,超过生态系统的自我调节能力,生态系统将面临生态退化、功能衰竭的风险。因此,生态缺水状态是衡量生态系统健康的一个重要标志,也是水资源开发和配置的重要依据
生态耗水	一定时段内,生态系统为维持自身的组成、结构和功能而自然消耗的水量	生态系统消耗水量主要有两种形式,一是通过蒸散发消耗于大气中的水分,另一部分则参与形成生物体的有机质
生态退水	参与生态系统的物质和能量循环,而不被生态系统所消耗并以液态水的形式排出生态系统的水	生态退水实际是从一个生态系统流出而进入另一个生态系统的水,是毗邻生态系统之间重要的联系纽带。其意义在于揭示了水资源的可重复利用性

注:引自郑红星等(2004)^[20]。

(2) 初步建立了相对统一的生态需水分类体系。经过多年探索,并在区分生态需水与环境需水^[21]的基础上,我国已初步建立起相对统一的生态需水分类体系。如依据需水的地理位置划分出河道内生态需水和河道外生态需水^[22],依据需水的实际来源划分出降水性生态需水和径流性生态需水^[23]。这些分类体系已被普遍接受和应用。

(3) 完善和发展了生态需水的基本理论和计算方法。根据胡广录等^[24]、胡广录和赵文智^[25]对诸多研究成果的综合分析,植被生态需水的基本理论有生态适宜性理论、系统阈值理论、水文循环和水量平衡

理论、农业气象学理论,植被生态需水的计算方法有面积定额法(直接算法)、潜水蒸发法(间接算法)、基于植物蒸散发量的算法、水量平衡法、基于生物量的算法、基于遥感技术的算法。这些理论和方法已在生态需水研究中得到广泛应用。

(4) 广泛开展了典型区域植被生态需水的个案研究。如先后计算了额济纳荒漠绿洲植被^[26]、晋西黄土丘陵区植被^[27]、石河子垦区植被^[28]、大渡河流域作物^[29]、典型喀斯特区林地^[30]的生态需水,等等^[31-33]。事实上,近年植被生态需水研究已遍及湖泊(湿地)、河口(三角洲)、绿洲、灌区(垦区)、丘陵(沟壑、河谷、沙

漠、盆地、平原、高原)、岛屿、城市、流域(区域)等各类生态系统(表 3)并跨越不同研究尺度,表明植被生态需水研究广度和深度都较以前有很大提升。不过,目前植被生态需水研究尚局限于干旱、半干旱区植被,而对其它气候区植被生态需水的研究显著偏少。如针对中国西南地区,目前仅见到对大渡河流域作物^[29]

和喀斯特区林地^[30]的生态需水研究。这种研究状况不利于区域植被建设和生态恢复以及水资源人工调控。在水资源供需矛盾日益加剧的未来,尽快打破植被生态需水研究的地区不平衡性已显得刻不容缓。

国外生态需水研究也在多方面取得进展,因篇幅限制,这里不再赘述。

表 3 中国大陆境内区域植被生态需水研究典型案例

研究区域	生态系统类型	主要需水植被	研究方法	文献作者(发表年份)
白洋淀	湿地生态系统	水生植物	基于植物蒸散发量的计算法	王强,等(2008) ^[33]
黄河三角洲	湿地生态系统	湿地生物	生物量—水情关系分析法结合分级计算法	崔保山,等(2009) ^[32]
额济纳	绿洲生态系统	胡杨林、怪柳林、河滩草地等	3S技术与野外生产力测定相结合的方法	Zhao, et al(2007) ^[26]
甘肃民勤	绿洲生态系统	沙枣、新疆杨、梭梭、怪柳、白刺等防风固沙植被	GIS技术结合茎流观测	徐先英,等(2007)
北京通州灌区	农林生态系统	人工林地、苗圃、城市绿地、自然草地、天然林地等	作物系数法、面积定额法	潘兴瑶(2007)
石河子垦区	农林生态系统	草地、林地、耕地	GIS技术、面积定额法	王玲,等(2011) ^[28]
晋西黄土丘陵区	森林生态系统	有林地、灌木林地、稀疏林地等	GIS技术结合改进后的Penman公式法	Wu, et al(2010) ^[27]
晋南黄土沟壑区	森林生态系统	人工刺槐林	Penman公式结合Thornthwaita公式	马义虎,等(2005)
大渡河上游河谷	森林生态系统	草地、针叶林、常绿阔叶林、针阔叶混交林、落叶阔叶林等	改进后的Penman公式法	王晶,等(2006)
浑善达克沙地	沙漠生态系统	重叠植被如黄柳、扁蓿豆	作物系数法	李敏,等(2008)
古尔班通古特沙漠	沙漠生态系统	原生梭梭	单木蒸腾测定结合尺度转换与计算	孙鹏飞,等(2010)
柴达木盆地	盆地生态系统	超旱生及早生灌木和半灌木	水量平衡法	张树军,等(2010)
三江平原	农林生态系统	森林、湿地植物、农作物	SEBAL模型	杜嘉,等(2010)
黄土高原地区	森林生态系统	有林地、灌木林地、稀疏林地等	GIS技术结合基于植物蒸散发量的计算法	何永涛,等(2004)
贵州喀斯特区	农田生态系统	花椒人工林	蒸腾实测与耗水计算法	李安定,等(2011) ^[30]
福建海坛岛	岛屿生态系统	林地	面积定额法结合Penman综合法	张锦新(2007)
沈阳市	城市生态系统	林地	面积定额法	魏国,何俊仕(2008)
大渡河流域	农田生态系统	小麦、玉米、油菜、水稻、青稞等作物	Penman—Monteith方程结合MODIS LAI	严冬,等(2009) ^[29]
泾河流域	森林生态系统	有林地、灌木林地、稀疏林地等	GIS技术结合基于植物蒸散发量的计算法	闵庆文,等(2004)
云南省	复合生态系统	生态防护林、城市绿地	面积定额法	曹世惠,等(2007)

3 区域植被类型与区域干旱的关系研究

根据气候学和植物地理学的基本原理,一个地区的气候条件在很大程度上决定着该区域拥有何种植被类型;反过来,不同植被类型也对区域气候环境产

生一定的反馈调节作用。然而,区域气候条件和区域植被状况都不可避免地受人类活动(如土地利用)的高度影响^[34-35]。据此,不难看出区域植被类型与区域干旱之间的复杂关系。实际上,区域植被类型与区域干旱的关系是一项跨区域、跨学科的研究命题。目

前,在区域生态学、全球生态学领域产出了一些有关人类活动与气候变化关系的研究成果,但在植被生态学、水文与水资源领域鲜有区域植被类型与区域干旱关系的研究报道。所幸,多年以来国内外对植被蒸腾耗水特性及其生态水文效应的研究在稳定推进和持续发展。如对干旱、半干旱区植被蒸腾耗水的研究已由单一物种蒸腾速率(强度)的简单测定发展到对其环境影响因素的分析^[36],以及大尺度研究方法(如尺度转换、模型计算)^[37-38]的开发,人工调控技术手段(如地表覆沙)^[39]的应用等综合研究,实验物种已涉及区域特有生态恢复物种^[40]、景观绿化物种^[41]、经济作物^[42]等,研究尺度也由个体延伸至生态系统(如林分)。植被的生态水文效应如植被对降雨的截留作用^[43-44]、对地表径流和土壤侵蚀的削减作用^[45-46],对土壤水分的保蓄作用^[47-48],对受损环境的修复与改良作用^[49-50],对微环境气候的调节作用^[51-52]等已被广泛研究和不断认知。这些基础研究已为日后探索区域植被类型与区域干旱的关系创造了一定的研究条件,将有助于该领域的科学研究在未来取得重要突破。

上述分析表明,近年植被水分适宜性研究已取得一定进展,如植被生态需水基础理论比较完善、计算方法较为多样;当然,也遗留不少问题,如植被生态需水研究存在区域不均衡性,以植被生态需水计算为基础的植被水分适宜性研究进展缓慢和成果缺乏,区域植被类型与区域干旱的关系研究面临跨区域、跨学科联合攻关的挑战。

4 结论

基于中国西南地区植被水分适宜性研究严重滞后的现状和亟待加强该领域研究工作的迫切需求,同时考虑到该地区多发的季节性旱灾以及社会各界对桉树林、橡胶林等人工植被生态环境效益的质疑和争议,建议日后从多学科交叉的角度、应用生态需水基本理论与计算方法对云南省典型植被的水分适宜性及其生态需水与区域干旱的关系开展专项研究。该研究有望揭示云南省典型植被的水分适宜性及其生态需水与区域干旱的关联程度,对于区域旱灾成因的科学认知、水资源的科学配置以及植被恢复与重建等具有深远指导意义。其主攻方向和重点研究内容为:(1)区域典型植被的生态需水及其历史演变。借助不同历史年代(如1960年以来的各个年代)或不同历史年份(如1960年以来的各个年份)各个研究区的历史气象资料,并结合某一时期(如1960年)以来云南省典型植被类型的历史演变与分布格局的研究成果,采取目前比较认可的植被生态需水计算方法,如联合

国粮农组织(FAO)推荐的作物系数法,研究掌握不同历史年代(年份)区域典型植被的生态需水及其历史演变规律。(2)区域典型植被水分适宜性及其历史演变。在确定不同历史年代(如1960年以来的各个年代)或不同历史年份(如1960年以来的各个年份)各个研究区典型植被的生态需水量并掌握相应历史年代(年份)区域降水量的基础上,构建基于植被生态需水量和大气降水量的区域典型植被水分适宜度计算模型,研究确定不同历史年代(年份)区域典型植被的水分适宜性及其历史演变规律。(3)区域典型植被水分适宜性与区域干旱的关系。假定区域典型植被水分适宜性以及区域降水量、大气温度、水汽蒸发量等共同影响并决定区域气候条件和干旱程度,应用多元统计分析方法,对比分析不同历史年代(年份)区域典型植被水分适宜性与区域干旱指标的关联性、区域降水量与区域干旱指标的关联性、区域大气温度与区域干旱指标的关联性,以及区域水汽蒸发量与区域干旱指标的关联性,最终探明区域典型植被水分适宜性的时空演变是否与区域干旱密切相关,同时掌握区域典型植被水分适宜性对区域干旱指标的影响程度与其它主要干旱因子之间的差异。

致谢:本文的撰写得到西北农林科技大学宋松柏教授、张广军教授以及中科院水利部水土保持研究所张兴昌研究员、王占礼研究员、马永清研究员的大力支持与帮助,在此向他们致以衷心和诚挚的感谢。

[参考文献]

- [1] Qiu J. China drought highlights future climate threats [J]. *Nature*, 2010, 465(7295): 142-143.
- [2] Stone R. Severe drought puts spotlight on Chinese dams [J]. *Science*, 2010, 327(5971): 1311-1311.
- [3] 杜悦英. “绿色沙漠”助推西南大旱? [N]. *中国经济时报*, 20100401(A3).
- [4] 张行勇. 西南旱灾既是天灾更是人祸 [N]. *科学时报*, 20100413(A2).
- [5] Robinson N, Harper R J, Smettem K R J. Soil water depletion by *Eucalyptus* spp. integrated into dryland agricultural systems [J]. *Plant and Soil*, 2006, 286(1/2), 141-151.
- [6] Li Hongmei, Mitchell A T, Ma Youxin, et al. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China [J]. *Biodiversity & Conservation*, 2007, 16(6): 1731-1745.
- [7] Espinosa G F J, Martínez H E, Quiroz F A. Allelopathic potential of *Eucalyptus* spp. plantations on germination and early growth of annual crops [J]. *Allelopathy*

- Journal, 2008, 21(1): 25-37.
- [8] Qiu J. Where the rubber meets the garden[J]. Nature, 2009, 457(7227): 246-247.
- [9] Yu Fuke, Huang Xinhui, Liang Qibin, et al. Ecological water demand of regional vegetation; The example of the 2010 severe drought in Southwest China[J]. Plant Biosystem, Doi: 10.1080/11263504.2013.817488.
- [10] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域植被生态用水评价[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 152-155.
- [11] He Qijin, Zhou Guangsheng. The climatic suitability for maize cultivation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(4): 267-275.
- [12] 姚小英, 蒲金涌, 姚茹莘, 等. 甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6242-6248.
- [13] 杨小利, 蒲金涌, 马鹏里, 等. 陇东地区苹果生产水分适宜性评估[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 27(9): 71-76.
- [14] 蒲金涌, 姚小英, 姚茹莘. 近 40 年甘肃河东地区夏秋作物气候适宜性变化[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 253-258.
- [15] 杨东, 郭盼盼, 刘强, 等. 基于模糊数学的甘肃陇南地区农作物气候适宜性分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 98-104, 110.
- [16] 张思祖, 李凯荣, 易亮, 等. 黄土高原沟壑区杏树林地土壤水分时空动态变化及适宜性研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 21-25.
- [17] 蒲金涌, 齐艳君, 陈薇. 天水桃气候适宜性变化研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(22): 208-213.
- [18] 岳东霞, 李自珍. 沙区人工固沙植物水分适宜度模糊数学模型及应用[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2003, 39(3): 60-63.
- [19] 徐学选, 高鹏, 蒋定生. 延安降水对农作物生长适宜性的模糊分析[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 73-76, 118.
- [20] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨[J]. 水科学进展, 2004, 5(5): 626-633.
- [21] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量: 理论、方法与实践[J]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 杨爱民, 唐克旺, 王浩, 等. 生态用水的基本理论与计算方法[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 39-45.
- [23] Hillbricht-Ilkowska A, Rybak J, Rzepecki M. Ecohydrological research of lake-watershed relations in diversified landscape (Masurian Lakeland, Poland) [J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 91-98.
- [24] 胡广录, 赵文智, 谢国勋. 干旱区植被生态需水理论研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 193-200.
- [25] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J]. 生态学报, 2008, 8(12): 6282-6291.
- [26] Zhao Wenzhi, Chang Xueli, He Zhibin, et al. Study on vegetation ecological water requirement in Ejina Oasis [J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2007, 50(1): 121-129.
- [27] Wu Yongli, Ma Yali, Luan Qing. Ecological water requirement for vegetation in loess hilly area of western Shanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(6): 153-158.
- [28] 王玲, 姚亚楠, 奚秀梅, 等. 基于遥感的石河子垦区植被生态需水量的研究[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29(2): 218-223.
- [29] 严冬, 范建容, 欧国强. 基于 MODIS 叶面积指数的大渡河流域作物生态需水研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10): 976-984.
- [30] 李安定, 杨瑞, 林昌虎, 等. 典型喀斯特区不同覆盖下顶坛花椒林地生态需水量研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 57-61.
- [31] Zhang Yu, Yang Shengtian, Ouyang Wei, et al. Applying multi-source remote sensing data on estimating ecological water requirement of grassland in Ungauged Region[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 953-963.
- [32] Cui Baoshan, Tang Na, Zhao Xinsheng, et al. A management-oriented valuation method to determine ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta of China[J]. Journal for Nature Conservation, 2009, 17(3): 129-141.
- [33] 王强, 刘静玲, 杨志峰. 白洋淀湿地不同时空水生植物生态需水规律研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1447-1454.
- [34] Martínez Pastur G, Jordán C, Soler Esteban R, et al. Landscape and microenvironmental conditions influence over regeneration dynamics in old-growth *Nothofagus betuloides* Southern Patagonian forests[J]. Plant Biosystem, 2012, 146(1): 201-213.
- [35] Henkin Z, Seligman N G. The role of management on the rate of secondary succession in Mediterranean shrubland after fire[J]. Plant Biosystem, 2011, 145(3): 708-714.
- [36] 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 蒸腾耗水规律[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3713-3720.
- [37] 张毓涛, 梁凤超, 常顺利, 等. 基于 8 hm² 样地的天山云杉林蒸腾耗水从单株到林分的转换[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3330-3339.
- [38] Komatsu H, Maita E, Otsuki K. A model to estimate annual forest evapotranspiration in Japan from mean annual temperature[J]. Journal of Hydrology, 2008, 348(3/4): 330-340.
- [39] 张坤, 尹小宁, 刘小勇, 等. 陇东旱地果园覆沙对苹果树

- 蒸腾耗水及果实品质的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11):2755-2762.
- [40] Tong Chuan, Gong Jianzhou, Marrs Robb, et al. Pattern of transpiration of four shrub species and water consumption from shrub stands in an eco-reclamation catchment in Northwest China[J]. Arid Land Research and Management, 2008, 22(3):242-254.
- [41] 王华, 欧阳志云, 任玉芬, 等. 北京市绿化树种紫玉兰的蒸腾特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1867-1876.
- [42] 汪耀富, 蔡寒玉, 李进平, 等. 不同供水条件下土壤水分与烤烟蒸腾耗水的关系[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1):19-23.
- [43] 张一平, 王馨, 王玉杰, 等. 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究[J]. 生态学报, 2003, 23(12):2653-2665.
- [44] 袁春明, 郎南军, 孟广涛, 等. 长江上游云南松林水土保持生态效益的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2):87-90.
- [45] 邓云, 唐炎林, 曹敏, 等. 西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7836-7843.
- [46] 杨吉山, 王兆印, 余国安, 等. 小江流域不同人工林群落结构变化及其对侵蚀的控制作用[J]. 生态学报, 2009, 29(4):1921-1930.
- [47] 杞金华, 章永江, 张一平, 等. 哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用[J]. 生态学报, 2012, 32(6):1692-1702.
- [48] 赵筱青, 和春兰, 易琦. 大面积桉树引种区土壤水分及水源涵养性能研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 205-210.
- [49] Bacchetta G, Cao A, Cappai G, et al. A field experiment on the use of *Pistacia lentiscus* L. and *Scrophularia canina* L. subsp. *bicolor* (Sibth. et Sm.) Greuter for the phytoremediation of abandoned mining areas [J]. Plant Biosystem, 2012, 146(4): 1054-1063.
- [50] Petrou P, Milios E. Establishment and survival of *Pinus brutia* Ten. seedlings over the first growing season in abandoned fields in central Cyprus[J]. Plant Biosystem, 2012, 146(3): 522-533.
- [51] Huang Yuqing, Li Xiankun, Zhang Zhongfeng, et al. Seasonal changes in *Cyclobalanopsis glauca* transpiration and canopy stomatal conductance and their dependence on subterranean water and climatic factors in rocky karst terrain[J]. Journal of Hydrology, 2011, 402(1/2): 135-143.
- [52] Zhao M, Pitman A J, Chase T. The impact of land covers change on the atmospheric circulation[J]. Climate Dynamics, 2001, 17(5/6): 467-477.

(上接第300页)

- [12] 马文宝, 薛建辉. 西南喀斯特山地森林群落土壤种子库研究综述[J]. 生态学杂志, 2009, 28(12):2619-2623.
- [13] 魏守辉, 强胜, 马波, 等. 不同作物轮作制度对土壤杂草种子库特征的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4):385-389.
- [14] 王国栋, 吕宪国. 三江平原恢复湿地土壤种子库及其与植被的关系[J]. 植物生态学报, 2012, 36(8):763-773.
- [15] 莫训强, 王秀明. 天津地区湿地土壤种子库及其在受限空间中的植被演替研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4):219-224.
- [16] Levassor C M, Ortega B P. Seed bank dynamics of Mediterranean pastures subjected to mechanical disturbance [J]. Journal of Vegetation Science, 1990, 1(3):339-344.
- [17] Lavorel S, Debussche M, Lebreton J D, et al. Seasonal patterns in the seed bank of Mediterranean old-fields [J]. Oikos, 1993, 67(1):114-128.
- [18] 杨允菲, 祝玲, 张宏一. 松嫩平原两种碱蓬群落土壤种子库通量及幼苗死亡的分析[J]. 生态学报, 1995, 15(1):66-71.
- [19] Russi L P S, Cocks E H, Roberts. Seed bank dynamic in a Mediterranean grassland [J]. Journal of Applied Ecology, 1992, 29(2):763-771.
- [20] 李宁, 冯固, 田长彦. 塔克拉玛干沙漠北缘土壤种子库特征及动态[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2006, 36(SII):110-118
- [21] Kemp P R. Seed Bank and Vegetation Processes in Deserts[M]//Leck M A, Parker V T, Simpson R. L, ed. Ecology of Soil Seed Bank. San Diego: Academic Press, 1989:257-282.
- [22] Guo Q, Rundel P W, Goodall D W. Horizontal and vertical distribution of desert seed banks: Patterns, causes, and implications[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 38(3):465-478.