

湿地生态水文过程研究进展

于文颖¹,周广胜²,迟道才¹,徐德增³

(1. 沈阳农业大学水利学院, 辽宁 沈阳 110161; 2. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110016;
3. 辽宁省水利水电勘测设计研究院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要:生态水文学是20世纪90年代兴起的一门研究生态过程和生态格局水文机制的新学科。综述了湿地生态水文过程的研究进展,着重介绍了植被对水文过程各个环节包括降水截留、湿地蒸发散、径流过程等的影响及其模拟模型,在此基础上指出了湿地生态水文过程的研究重点,提出了未来研究的方向。

关键词:湿地;生态水文过程;生态水文模型;蒸发散

中图分类号:P33 文献标识码:A

Advance in Wetland Ecohydrological Process Research

YU Wen-ying¹, ZHOU Guang-sheng², CHI Dao-cai¹, XU De-zeng³

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China;

2. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China;

3. Liaoning Provincial Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Shenyang 110006, China)

Abstract: Ecohydrology is a new interdisciplinary subject between ecology and hydrology originated in the 1990s. It focuses on the study of the hydrological mechanisms of ecological patterns and processes. This paper reviews the study of wetland ecohydrological process, and especially introduces the advance in the study of the effects of vegetation on hydrological processes including rainfall intercepting, wetland evapotranspiring and runoff process, etc, as well as their simulation model. Based on the review, the themes of eco-hydrological processes of wetland ecosystems were suggested, and the key tasks in the future were given.

Key words: ecohydrology; ecohydrological process; ecohydrological model; evapotranspiration

0 引言

生态水文学是20世纪90年代兴起的一门研究生态过程和生态格局水文机制的边缘学科,是在全球水资源短缺的背景下,于1992年在都柏林国际水与环境大会上作为一门独立的学科提出来的。生态水文学的概念在国际水文计划(IHP)第五和第六阶段战略计划的框架内逐步形成并确定。1997年国际水文计划出版的专集:生态水文学—水资源可持续利用的新范例指出,生态水文学主要是为了研究水循环过程、机制与生物、非生物之间的相互关系。从1996年到2002年,联合国教科文组织国际水文计划召开了一系列生态水文学研讨会。进入21世纪后,国际水文计划(IHP)第六阶段(2002~2007年)计划中指出,陆地生境水文学仍然是生态水文学核心内容,

第七阶段(2008~2013年)计划的主题之一是“生态水文学与环境的可持续性”。由此可见,生态水文学作为IHP计划的核心内容之一,得到了迅速发展,成为生态学家和水文学家的研究热点。生态水文过程研究是生态水文学的一个重要研究方向。生态水文过程是指水文过程与生物动力过程之间的功能关系,是揭示生态格局和生态过程变化水文机理的关键^[1]。随着研究的深入,生态学家越来越认识到水文过程在生态系统中的重要性。随着水文循环的生物圈部分(BAHC)和国际教科文组织主持的国际水文计划(UNESCO/IHP2, 3~2.4)等国际项目的实施,生态水文过程研究得到迅速的发展和广泛的重视,成为当前研究的热点。生态水文过程研究的核心是生物与水分之间的关系,充分理解陆地生态水文过程和功能,预测生态水文过程变化可能带来的后果,为确保水资源的持续利用提供理论支持。

由于湿地作为地球之肺的巨大生态功能和对全球变化的敏感反应,湿地生态水文学现在仍然是生态学家和水文学家关注的热点。就湿地生态系统而言,湿地生态水文学着重研究多时空尺度的水文与生物格局、过程的耦合特征和相互作用。水是湿地生态系统最敏感的因子,水动态平衡为湿地创造了有别于陆地和水体生态系统的独特物理化学条件。水文过程通过调节湿地植被、营养动力学和碳通量之间的相互作用而影响湿地地形的发育和演化,改变并决定了湿地下垫面性质及特定的生态系统响应。同时,湿地的植被群落特征、地貌、下垫面性质和地质背景也影响着湿地的水文过程。湿地植被通过拦蓄沉积物、对地表水的遮荫以及蒸腾的调节作用影响着湿地的水文过程功能。另外,气候变化和人类活动等都以不同方式影响着湿地的水文系统和生态功能。因此,湿地生态水文过程的研究作为湿地生态系统研究的重要组成部分,对流域水资源管理、生物多样性保护以及全球气候变化等具有极其重要的意义。

1 湿地生态水文过程研究进展

生态水文学源于湿地生态系统管理和恢复研究。Ingram^[2]首次提出了生态水文学这一概念,并对苏格兰泥炭地的生态水文过程进行了研究。20世纪90年代中期,生态水文学研究主要以湿地为研究对象,Bragg等^[3]模拟了苏格兰湿地泥炭的生态水文过程;Hensel等^[4]研究了天然湿地的生态水文过程;Jansen等^[5]研究了平坦湿地的生态水文过程,并采用模型方法来研究生态水文过程;20世纪90年代中期以后代表性的研究成果是1998年5月在波兰Lodz召开的UNESCO/IHP-V2.3,2.4(1995~2001)“生态水文学的专题会议”。我国生态水文学研究的起步较晚,直到20世纪90年代中后期,尚未将生态水文学作为一专门学科加以研究,只是在相关研究有所涉及,包括土地利用方式的改变对河川径流量的影响,森林破坏和草地退化对径流量变化的影响以及近年来开展的生态需水研究等^[6]。2000年以后中国学者才开始重视,并将生态水文学介绍到国内来,目前尚处于起步阶段。

生态水文过程是指水文过程与生物动力过程之间的功能关系,是揭示生态格局和生态过程变化的生态水文机理的关键^[1]。国际地圈生物圈计划(IGBP)把“水循环的生物学方面(BACH)”作为核心计划之一,为评估气候变化和土地利用变化对生物圈和地球生存环境的影响提供有关陆面水文—生态过程方面的知识。生态水文过程研究横跨生态学和文学,属于交叉学科。为获得生态水文过程资料,国内外建立了许多野外试验站、生态监测站以及水文监测站和气象站。我国关于湿地领域的研究一直比较薄弱,目前还没有形成覆盖湿地范围的监测网络,缺乏长期系统的湿地实测资料。根据水分为行,生态水文过程可分为生态水文物理过程、化学过程及其生态效应3部分。生态水文物理过程主要是指植被覆盖和土地利用对降雨、径流、蒸发等水分要素的影响;生态水文化学过程是指水质性研究;而水分生态效应主要指水分为行为对植被生长和分布的影响^[1]。以下将分别就湿地生态水文过程和模型两方面的研究进展进行综述,以提炼湿地生态水文过程的研究重点,指明

未来研究的方向。

1.1 湿地生态水文过程

1.1.1 生态水文物理过程

湿地生态水文物理过程包括湿地植被降水截留、蒸发散、径流和地下水等水文过程。其中,植被降水截留过程和湿地蒸发散过程是生态水文过程研究的重要内容,是生态过程与水文过程耦合的关键。如何从生态过程准确地模拟湿地植被的蒸发与蒸腾是评估湿地水收支及植被对于水分变化响应的关键。以下重点介绍这两个过程的研究内容与进展。

1.1.1.1 湿地植被降水截留过程

大气降水进入生态系统,首先到达植被冠层,落到冠层上的降水在向地面下移的过程中被重新分配,分配过程的每个环节都伴随着液态水的损失和气态水的生成与发散。湿地植被通过植被截留、形成树干茎流和透冠雨,植被截留通过植被表面蒸发再回归大气中。因此,植被冠层截流也是湿地水分损失的一个途径。植被对降水的截流损失受植被的类型、结构特征、密度、枯枝落叶层和降水形式以及时空分布等多方面的影响^[7]。

关于湿地植被截流的研究多集中在森林湿地和森林—灌丛湿地。Dubé等^[8]在加拿大魁北克沼泽湿地研究发现,该湿地乔木截留量约占降雨量的35%~41%。Van Seters^[9]对魁北克废弃泥炭沼泽植被水文效应研究表明,云杉林泥炭地的季节性植被截流约占降雨量的32%,林木碎屑截流达12%。Pook等^[10]发现当降雨较小且不超过植被树冠储水容量时,植被的截流率较高;降雨持续时间较长时,植被树冠的水分蒸发损失控制着植被的截流率。

由于测量方法的局限性,植被截流的测定误差很大,目前还没有成熟的技术手段或方法获得精确的湿地植被(尤其是草本植被)截流量^[11]。植被降水截留模型是生态过程与水文过程的耦合点之一。对植被降水截留量经常采用经验公式进行估算。目前国内对湿地植被截留量模型研究较少,且多针对森林等生态系统。

Shuttleworth^[12]提出了植被截留降水量 E_l 的计算公式:

$$E_l = A + BP \quad (1)$$

式中: A, B 为唯象系数; E_l 植被截留降水量; P 降水量。

但实践表明,该公式过高地估计了植被的截留降水量。

Walker^[13]认为植被截留降水量应为降水量 P 和潜在蒸散 E^* 两者之间的最小值:

$$E_l = \min(P, E^*) \quad (2)$$

但该公式计算结果存在不确定性。

仪垂祥等^[14]建立了一个不包含唯象性质的植被截留降水量计算公式,从而减少了植被降水量人为估算或一些参数化关系中的不确定性。

$$E_l(P) = \begin{cases} \sigma \cdot P & P \leq P^* \\ E_l^* & P > P^* \end{cases} \quad (3)$$

$$E_l^* = \alpha \cdot \omega g \cdot LAI \quad (4)$$

$$\sigma = \omega g \quad (5)$$

$$p^* = \alpha \cdot LAI \quad (6)$$

式中: E_l 为植被截留降水量; σ 为最大截留系数,它等于植被盖

度; P 为降水量; P^* 为植被达到最大截留量的临界降水量; E_t^* 为最大截留量; α 为叶面上平均最大持水深度, mm; LAI 为叶面积指数; veg 为植物盖度。

何东进等^[15]对仪垂祥等^[14]提出的植被截留降水量公式进行了改进:

$$E_t = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{veg}{LAI} \right)^* \right] \cdot P & P \leq P^* \\ E_t^* & P > P^* \end{cases} \quad (7)$$

该公式在仪垂祥公式^[14]的基础上,除消除了植被截留降水量的不确定性外,还给出其明确的物理意义。

这些公式适用于森林各类植被,但对于湿地植被降水截留是否适合,尚无明确指出和验证。

1.1.1.2 湿地蒸发散过程

湿地蒸发散是湿地水分损失的主要途径,植被对水文过程的影响主要表现在湿地蒸发散过程中。蒸发散作为湿地生态系统的重要水文特征直接影响着其物质和能量循环。湿地蒸发散研究被列为第5届国际湿地会议(1996)的核心之一^[16]。水分从有植被覆盖的地表传输到大气的全部过程统称为蒸发散(ET)。湿地蒸发散包括湿地水—土壤—植被表面的蒸发过程和湿地植被的蒸腾过程,其中湿地植被表面的蒸发过程是湿地植被截流过程的延续^[17]。

(1)蒸发散观测。通常将蒸发散划分为潜在蒸发散(PET)和实际蒸发散(AET)。PET是指在水分充分供应、不受限制条件下某地的最大可能蒸发散量,一般采用经验方程估算或模型模拟获得。AET是受多重环境因素制约和植物生理生态影响下的某地实际蒸发散量,一般通过实测或模型模拟获得。常用测定方法有蒸渗仪^[18]、蒸发皿和地下水水位昼夜波动法、涡动相关法、遥感法^[19]等。

(2)蒸发散估算模型。估算湿地蒸发散量的方法主要有: Thornthwaite公式^[20]、Penman模型、Penman-Monteith(PM)模型、Hammer-Kadle经验方程、Priestly-Taylor(PT)模型、基于湿地地下水或地表水水位的昼夜循环观测推算方程、基于水热通量交换的蒸发散估算模型等。

1.1.2 生态水文化学过程

生态水文化学过程不同于生态过程中的化学过程,它主要是指水文行为的化学方面,也就是水质性研究。人类耕作造成的点源、非点源污染和定居引起的生态水文变化已造成了世界性的水污染。近代对湿地过度开发、洪泛平原面积减少、质量下降以及河流疏导严重地影响水流排泄,养分运移、沉积和污染分布格局^[21~27]。湿地具有很强的降解和转化污染物的能力,它利用生态系统中物理、化学、生物的三重协调作用,通过过滤、吸附、沉淀、植物吸收、微生物降解来实现对污染物质的高效分解与净化^[28]。研究湿地生态水文化学过程有助于揭示湿地生态系统水文化学特征及其变化规律,为湿地环境保护与生态建设以及水资源保护与利用提供科学依据。

湿地植物包括挺水植物、沉水植物和浮水植物三种。大型挺水植物在湿地系统中主要起固定床体表面、提供良好的过滤条件,防止湿地被淤泥淤塞、为微生物提供良好根区环境等作用,常见的有芦苇、灯芯草、香蒲等。湿地植物对污染物都具有吸收、代谢、累积作用,对 Al、Fe、B、Cu、P、Pb、Zn 均有富集作

用,一般植物的长势越好、密度越大,净化水质的能力越强^[29]。Urban-Bercic^[30]指出持续淹水区域芦苇的传氧能力有明显下降;Greenway^[31]认为湿地植物不同部位对营养物质或重金属的富集程度不同。Sriyraj 和 Shutes 等^[32]发现通过湿地的径流污水中所含的污染物浓度大大降低,重金属和化学成分都达到了环境允许的标准,宽叶香蒲、甜茅等湿地植物以及土壤对污染物的吸收、截留、分解作用是非常显著的。Scholes 等^[33]发现,尽管湿地植物对污染物的去除效率随污水成分的变化有所波动,但大多数情况下湿地对集水区排放污水中的微量金属离子的去除率还是相当高的,特别是暴雨期,处理效果都达到了90%以上。湿地由于具有特殊的界面特点和生态功能,能有效控制农业非点源污染,因而作为陆地释放的某些物质的过滤器功能备受关注。利用湿地处理污水和污泥是目前国际上一个较新的课题^[30]。因此,关于湿地生态水化学特征、湿地水化学过程和湿地植物对水质的净化以及水质对湿地植物的影响等多方面的研究还应进一步深入。

1.1.3 水文过程的生态效应

水文过程的生态效应主要指水文过程对植被生长和分布的影响。水文过程控制着生态系统内营养物、污染物、矿物质和有机质等的运移和转化,水质的恶化、水位变化和水化学特征及其变化影响着植物的群落结构、动态、分布和演替。因此,可以通过调整水文过程来控制植被动态。

湿地水位的波动、淹水周期和淹水频率控制着湿地植被类型、分布与生物生产量。Glaser 等^[34]通过对美国明尼苏达州北部同一个水文景观内碱沼和高位沼泽两个不同湿地类型的对比研究表明,植被对水化学梯度很敏感,水化学梯度(主要是 pH 值和 Ca 含量)对植被群落演替具有重要的作用。合理的水分供给可以增加植物对营养物的获取以及植物的固碳能力,并由此促进植物的生长和净初级生产力。孟宪民等^[35]的研究结果表明,湿地水文具有显著的周期特征,不同高程植被带的淹水频率、淹水历时和淹水周期都有明显差异,由此控制着湿地植被分布呈现显著的带状特征。

1.2 生态水文过程模拟研究

生态水文模型是揭示生态水文过程的模型。从建模的层次来看,大多数模型还处在对水文学模型和生态学模型的借鉴和综合运用上,尚未从生态水文过程的角度建立机理性模型^[36]。

目前可用于生态水文过程研究的生态水文模型主要有以下类型^[37]: ①经验模型:基于大量数据的统计方法。如 Rutter 模型、Gash 模型、Dalton 模型、DCA 模型、Philip 模型等,可用于森林水文生态过程、植物水环境排序、植物对水文影响过程等方面。②机理模型:基于过程考虑的模型。如 Penman-Monteith 模型、分布式水文模型、新安江模型、SVAT 模型、SPAC 模型等,可用于模拟土壤—植被—大气间物质能量传输过程、植被的水文生态效应分析等方面。③随机模型:基于统计理论的统计方法。如 Monte Carlo 模型、马尔可夫模型等,用于水文与生态过程的随机性模拟、参数与要素模拟。

目前,模拟湿地生态水文过程的模型还较少,主要有 WETLANDS 模型^[38]、Jorge - MODFLOW 湿地模型^[39]、

DRAINMOD 模型^[40]和 MIKESHE 模型^[41]。WETLANDS 模型(多维水流和溶质迁移数值模型)是将蒸发作用和多种植被的根区相结合,描述淹水区的季节性动态水位变化和地表水、土壤水、地下水之间的水动力学联系的多维水流和溶质迁移数值模型^[38]; Jorge—MODFLOW 湿地模型^[39]将 MODFLOW 与近似扩散波路径方程相耦合,将植被和土壤作为同一层,模拟浓密植被三维片流和湿地水文周期、地下水流、沟渠流、水的分流、降水和蒸发以及湿地含水层与明渠流之间的相互作用,可用于多种场合,特别适合模拟浓密植被片流和沟渠流,还可模拟土地利用造成的影响。DRAINMOD 模型^[40]是 20 世纪 70 年代末由美国北卡罗来那州立大学农业工程系 R. W. skaggs 博士开发的一个田间规模水文模型。它采用较为简单的函数关系来描述田间水文变化过程,包括入渗、地下排水、暗灌、地表径流、腾发(ET)和深层渗漏。DRAINMOD 模型的主要输入参数包括气象、土壤、作物和水力条件等。DRAINMOD 模型以其应用简便和预测准确的优点在世界上许多国家和地区得到了较为广泛的运用。MIKESHE 模型^[41]是 MIKESHE(丹麦水利研究所)在欧洲系统水文模型(SHE)基础上开发的综合水文模型,是比较完整的综合湿地水文模型。该模型与 GIS 技术结合,能模拟包括降水截流蒸发,地表片流和沟渠流,未饱和带、饱和带、融雪、含水层与河流之间的水力联系,大孔隙流在内的主要水文过程。模型的最大优点是能模拟所有水文变量在时空上的动态分布规律,而且还可模拟土地利用和植被对湿地水文的影响。模型的缺点是对资料完备性和详细度要求较高。

目前,国内对于湿地生态水文过程模拟的研究较少。因此,研制和开发生态水文模型要以已有的湿地水文模型为基础,充分考虑生态水文之间的功能关系,实现对湿地生态水文过程的动态模拟。

2 湿地生态水文过程研究展望

生态水文过程不仅涉及到水动力过程,还涉及到各类物理化学物质在区域或水体中的运移转化,研究生态过程的水文学机制,涉及到许多物理、化学和生物过程,而且生态水文过程具有明显的区域性,影响因素多样,相互作用机理亦较复杂^[42]。生态水文学是一门年轻的学科,很多问题还有待于进一步深入研究,国内相关研究起步较晚,目前关于湿地生态水文过程的研究还较弱,因此,湿地生态水文过程的研究有着广泛的前景。

(1)生态水文过程观测和机理。目前,国内已经建立了许多湿地生态监测站和野外实验站,为生态水文过程的研究提供了坚实的基础。但影响水文过程的许多因素仍然不清楚。因此,关于生态水文过程和机理的观测研究应该是未来一段时间的重要任务。应加强生态水文过程的观测研究,以寻求不同时空尺度上影响生态水文过程的主导因素,开展生态要素和水文要素之间的相互机理研究,弄清其物理化学过程和生物过程,揭示生态水文过程的机理以及建立更符合实际的生态水文机理模型。

(2)生态水文界面的耦合过程。生态过程与水文过程的耦合是理解生态水文过程的关键。湿地水文过程与生态过程在大气—植物—土壤各个界面的耦合仍是今后研究的重点。例

如,植物蒸腾气孔传导度光合作用耦合机制的研究、气孔—冠层阻力的尺度转换等问题。

(3)湿地生态水文过程模拟。目前,有关湿地生态水文过程的模型还很不完善,在大气—植被—土壤界面的各种降水截流、径流和蒸散作用的模拟仍有待于进一步发展。同时,已开发的众多生态水文模型也存在着参数化和模型精度问题。未来湿地生态水文模型的发展应注重遥感技术的应用。

(4)不同时空尺度生态水文过程的耦合。生态水文过程涉及到不同层次或时空尺度,尺度耦合是多尺度生态水文过程研究的关键和难点。由于下垫面因素、水文参数等的时空变异性,不同时空尺度的生态水文过程存在差异,而且这种差异不是简单的线性外延或叠加^[43];绝大多数水文过程和生态过程的数学方程或物理定律都具有高度的尺度依赖性,在小尺度实验研究中建立起来的模型能否推广应用到大尺度问题是生态水文过程模型模拟中需要解决的又一重大问题^[37]。譬如,关于湿地蒸散过程可以分为叶片水平、植物个体水平、生态系统水平及至景观至区域等多种尺度,如何实现不同时空尺度的过程和参数耦合是未来模型研究的重点。

参考文献:

- [1] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶. 生态水文过程研究进展[J]. 生态学报, 2003,23(3):580—587.
- [2] Ingram H A P. Ecohydrology of Scottish peatlands [J]. Transaction of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences. 1987,78 (4): 287—296.
- [3] Bragg O. M, Brown J M B, Ingram H A P. Modeling the ecohydrological consequences of peat extraction from Scottish raised mire[A]. In: Nachtnebel H. p, Kovark. Hydrological basis of ecologically sound management of soil and groundwater [C]. IAHS AISH Publication, 1991, 13—2.
- [4] Hensel Bruce R, Panno Samuel V, Cartwright Keros, et al. Nuzzo Victoria Ecohydrology of pristine fen [A]. In: Geological Society of America [C]. Geological Society of America, 1991, 324—325.
- [5] Jansen Andre J M, Maas Cees. Ecohydrological Processes in almost flat wetlands [A]. In: Kuo Chin Y. Engineering hydrology [C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1993, 150—155.
- [6] 严登华,何岩,邓伟等. 生态水文学研究进展[J]. 地理科学, 2001, 21(5):467—473.
- [7] 穆宏强,夏军. 复合生态系统的降雨截留过程模拟[J]. 人民长江, 2002,33(7):25—35.
- [8] Dubé S, Plamondon A P and Rothwell R L, et al.. Watering up after clear—cutting on forested wetlands of the St. Lawrence lowland[J]. Water Resources Research, 1995, 31: 1741—1750.
- [9] Van seters T. Linking the Past to the Present; the Hydrological Impacts of Peat Harvesting and Natural Regeneration on an Abandoned Cut—over Peat Bog, Quebec[D]. MES thesis, Department of Geography, University of Waterloo, Canada, 1999.
- [10] Pook E W, Moore P H R and Hall T. Rainfall interception by trees of Pinus radiata and Eucalyptus viminalis in a 1300 mm rainfall area of southeastern New South Wales: I, Gross losses

- and their variability [J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(2): 127-141.
- [11] 邓伟,胡金明. 湿地水文学研究进展及科学前沿问题[J]. *湿地科学*, 2003, 1(1): 12-20.
- [12] Shuttleworth W J. Evaporation models in the global water budget[J]. *Ibid*, 1983, (8): 147-171.
- [13] Mintz Y, Walker G K. Global fields of soil moisture and surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperature. *J. Appl. Meteorol*, 1993, 32(8): 1305-1334.
- [14] 仪垂祥,刘开瑜,周涛. 植被截留降水量公式的建立[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*[J], 1996, 2(2): 47-49.
- [15] 何东进,洪伟. 植被截留降水量公式的改进[J]. *农业系统科学与综合研究*, 1999, 15(3): 200-202.
- [16] 王仁卿,刘纯慧. 从第五届国际湿地会议看湿地保护与研究趋势[J]. *生态学*, 1997, 16(5): 72-76.
- [17] 邓伟,潘响亮,栾兆擎. 湿地水文学研究进展[J]. *水科学进展*, 2003, 14(4): 521-527.
- [18] 梁丽乔,闫敏华,邓伟. 湿地蒸散测算方法进展[J]. *湿地科学*, 2005, 3(1): 74-80.
- [19] 司建华,冯起,张小由,等. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展[J]. *水科学进展*. 2005, 16(3): 450-459.
- [20] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geogr. Rev*, 1948, 38: 55-94.
- [21] Monteith J. L. Evaporation and environment [A]. In: Fogg G. E. *The state and movement of water in living organisms* [C]. New York: Academic Press, 1965. 205-234.
- [22] 陈刚起,吕宪国,杨青. 三江平原沼泽蒸发研究[J]. *地理科学*, 1993, 13(3): 220-226.
- [23] 王娅娟,孙丹峰. 基于遥感的区域蒸散研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 162-167.
- [24] 郭晓寅,程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 107-114.
- [25] 辛晓洲,田国良,柳钦火. 地表蒸散定量遥感的进展[J]. *遥感学报*, 2003, 7(3): 233-240.
- [26] 刘士余,左长清. 植被对径流影响的研究综述[J]. *国土与自然资源研究*, 2005(1): 42-44.
- [27] 周国逸,余作岳,彭少麟. 小良试验站三种植被类型地表径流效应的对比研究[J]. *热带地理*, 1995, 15(4): 306-312.
- [28] 高锐,娄策群,毛旭辉. 湿地在城市水体面源污染治理中的应用[J]. *国土资源导刊*, 2004, 1(4): 45-47.
- [29] 李贵宝,周怀东,尹澄清. 湿地植物及其根孔在非点源污染治理中的展望[J]. *中国水利*, A 刊, 2003(4): 51-52.
- [30] Urbanc-Beric O. Reed stands in constructed wetlands: "edge effect" and photochemical efficiency of PS II in common reed[J]. *Wat. Sci. Tech*. 1997, 35(5): 143-147.
- [31] Greenway M. Constructed wetlands in Queensland: Performance efficiency and nutrient bioaccumulation [J]. *Ecol Eng*, 1997, 12: 39-55.
- [32] K. Sriyardj, R B E Shutes. An assessment of the impact of motorway runoff on a pond, wetland and stream[J]. *Environment international*. 2001, 26: 433.
- [33] L Scholes, R B E shutes, D M Revitt. The treatment of metals in urban runoff by constructed wetlands[J]. *The science of total environment*, 1998, 214: 211.
- [34] Glaser P. H, Janssens J. A, Siegel D. I. The response of vegetation to chemical and hydrological gradients in the lost river peat land, northern Minnesota[J]. *Journal of Ecology*, 1990, 78(2): 1021-1048.
- [35] 孟宪民,储金宇,储金宇,等. 北固山湿地水文情势与湿地植被的关系[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(7): 331-335.
- [36] 严登华,何岩,王浩,等. 生态水文过程对水环境影响研究述评[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 747-752.
- [37] 王根绪,钱鞠,程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 314-323.
- [38] Mansell R S, Bloom S A, Sun Ge. A model for wetland hydrology description and validation[J]. *Soil Science*, 2000, 165: 384-397.
- [39] Jorge I, Angela M, Jayantha . A Wetland Simulation Module for the MODFLOW Ground Water Model[J]. *Ground Water*, 1998, 30: 764-770.
- [40] Skaggs R W. Field evaluation of a water management simulation model [J]. *Trans. ASAE*, 1982, 25(3): 666-674.
- [41] Refsgaard J C, Storm B MIKESHE. *Computer Models of watershed hydrology* [M]. Water Resources Publication, Englewood cliffs, New Jersey, USA. 1995.
- [42] 夏佰成,胡金明,宋新山. 地理信息系统在流域生态水文过程模拟研究中的应用[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 5-8.
- [43] 夏军,丰华丽,谈戈,等. 生态水文学概念、框架和体系[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(1): 4-10.

(上接第 18 页)

- [2] 吴市章,蒋天明,肖厚军,等. 贵州水资源利用现状、供需预测及保护对策研究[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 21(2): 64-69.
- [3] 徐国臣. 关于综合开发利用“三水”问题的研究[J]. *黑龙江水利科学*, 2003, (4): 50-52.
- [4] 吴士章,蒋天明,肖厚军,等. 贵州岩溶山区水资源与生态可持续发展[J]. *中国农村水利水电*, 2003, (7): 72-73.
- [5] 董祖培. 水与城市现代化——21 世纪贵州城市化的水战略目标与措施[A]. *金黔在线, 贵州专家论文集* [C].
- [6] 史运良,王腊春. 西南喀斯特山区水资源开发利用模式[J]. *科技导报*, 2005, 23(2): 52-55.
- [7] 邓自民. 喀斯特地下水库与成库条件[J]. *贵州科学*, 1995, 13(3): 16-22.
- [8] 苏维词. 贵州喀斯特生态脆弱区农业可持续发展的内涵与构想[J]. *经济地理*, 2000, (5): 75-82.
- [9] 陈建庚. *贵州地理环境与资源开发* [M]. 贵阳: 贵州教育出版社, 1994.
- [10] 苏艺,王继辉,鄯贵权. 贵州地表水资源主要特征分析[J]. *贵州工业大学学报(自然科学版)*, 2000, 29(5): 39-44.