

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.017

# 绿水评估方法研究进展

林长清<sup>1</sup>, 周天逸<sup>2</sup>, 任立良<sup>1</sup>, 江善虎<sup>1</sup>, 刘懿<sup>1</sup>, 龚露燕<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;  
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**在回顾绿水量计算方法的基础上,阐述了水分平衡法、植物生理学法、微气象学法、模型法、遥感法及仪器法的适用条件和特点,认为遥感信息支持下的微气象学法和模型法实际可操作性更大;提出了绿水计算面临的两个关键问题是时间和空间尺度、生产性绿水与非生产性绿水的分离,分析了气候变化和下垫面景观变化对绿水评估的影响,同时展望了绿水评估对水资源一体化管理的应用前景。

**关键词:**绿水;蓝水;蒸散发;水资源;计算模型;评估方法;综述

中图分类号:P333 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)03-0085-05

## Advances in methods for green water assessment

LIN Changqing<sup>1</sup>, ZHOU Tianyi<sup>2</sup>, REN Liliang<sup>1</sup>, JIANG Shanhu<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, GONG Luyan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper describes the characteristics and applicable conditions of the water balance, plant physiology, micro-meteorology, vegetation dynamics or hydrologic models, remote sensing, and apparatus methods, based on an overview of the methods for green water flow calculation. The results show that the methods derived from micro-meteorology and vegetation dynamics or hydrologic models are more workable in the real world with the help of remotely sensed information. There are two key problems during the green water flow assessment. One is spatial and temporal scales, and the other is separation of productive and non-productive green water flows. The impacts of climatic change and human-induced landscape change on the green water assessment are also analyzed. Finally, the paper describes the future application of green water flow assessment to integrated water resources management.

**Key words:** green water; blue water; evapotranspiration; water resources; calculation model; assessment method; review

绿水概念最初由 Falkenmark<sup>[1]</sup>提出,是指存在于土壤层中、用于植物生长最终进入大气的不可见水,其概念之后被其他学者<sup>[2-5]</sup>引用和完善。Rockström<sup>[2]</sup>将绿水划分为生产性绿水和非生产性绿水,其中生产性绿水直接影响植物的生物量,对其进行评估在农业生产上具有重要价值。Falkenmark等<sup>[4]</sup>结合绿水的物质性和资源性,将其分为绿水流和绿水贮存,使绿水含义更加明确具体。

陆地降水约 1/3 以径流形式流入海洋,被称为

蓝水;剩余的 2/3 直接消耗于陆地生态系统的生物总量生产过程中的光合作用,被称为绿水。就全球尺度而言,绿水占总降水的 65%,由此可见,绿水资源的开发潜力很大;同时绿水的分布是不均匀的<sup>[6]</sup>,我国幅员辽阔,从东南地区向西北地区绿水所占比例逐渐加大,西北地区绿水占降水的比例在 70% 以上,而南方地区平均比例为 48%,对于处于干旱、半干旱地区的西北地区而言,绿水的开发利用将有重要的价值。

作者简介:林长清(1989—),女,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟分析及水文预报。E-mail:junyilchq@sina.com

通信作者:任立良,教授。E-mail:njrl9999@126.com

绿水资源分布状况受气候、地形、植被类型及其覆盖率、土壤类型及养分情况、土地利用等因素影响,凡是影响蒸散发的因素,都会影响绿水。国外的评估方法有水文模型法、大气环流模型法和统计法等<sup>[7]</sup>。近年来,国内绿水评估方法虽不如蓝水评估方法成熟,但已有所发展。本文主要介绍绿水评估的水分平衡法、植物生理学方法、微气象学方法、模型法和遥感法及仪器法等,前两种方法偏重基础理论,一般称为传统理论法。

## 1 传统理论法

水分平衡法最先应用于绿水流计算,是基于水分平衡的原理。求解的关键是水分平衡方程中各个参数的获取,而实际应用中各参数的获取会有误差,进而在计算绿水流中会有累计误差,这是该方法实际应用的瓶颈。李素丽等<sup>[8]</sup>基于生态水文学原理的绿水评估就是应用了这种方法。

植物生理学方法主要是通过测定叶片或1株植物的绿水流,来估算群落绿水流。在由叶片推广到植株,或由植株推广到生物群落过程中,不仅有时间差导致的要素改变,还有空间上环境的改变,所以该法存在局限性,一般用于研究或作为对照组。最常用植物生理学方法有小室法和示踪法。具体评估方法为,利用净初级生产力数据和主要生态系统生产单位干物质所需蒸散发量<sup>[9]</sup>,将生态系统划分为多个植被组,各组乘上相应实际蒸散发<sup>[10-11]</sup>即可求出绿水量。

## 2 微气象学方法

微气象学方法是基于实测的气象参数(如温度、湿度、太阳辐射等)来计算绿水流。应用的关键是尽量避免对气象因素的干扰,多数方法适用于地表起伏不大、较平坦的地区,其适用的时间尺度可从几分钟到月。常见的几种方法包括波文比法<sup>[12]</sup>、涡度相关法<sup>[13]</sup>、彭曼(Penman)公式<sup>[14]</sup>以及在彭曼公式基础上改进的 Penman-Monteith<sup>[15]</sup>(PM)公式和温度差方法。

在几种微气象学方法中,PM公式是应用最广泛的方法。相对于彭曼公式,PM公式引入了表面阻抗,当其趋于零时,PM公式就变成了彭曼公式;对于完全覆盖的植被而言,表面阻抗可以用叶面积指数(LAI)和气孔阻抗计算,但对于部分覆盖的植被和裸露的土壤来说,表面阻抗的计算就有些困难,解决的方法是将数据由“层状性”向“凹凸性”转化。如果计算过程中将数据统一作为一个“层”状处理,便会产生误差,将“层”状数据向“凹凸性”数据转

化,计算生产性绿水即植株蒸腾部分以及非生产性绿水即土壤蒸发部分,各部分要素要分别取得。具体方法是运用遥感技术获取“层状”气象数据,结合地面覆被状况(如植被种类、植被盖度和裸露土壤区所占比例)以及在植被或裸土处按需设定的测定装置(如放射温度计),获得“凹凸性”数据。

微气象学方法中,相对于PM公式的局限性,Qiu<sup>[16]</sup>通过引入参考蒸发(蒸腾)面的概念,在温度差方法的基础上消除了空气动力学阻抗,提出了计算绿水流的“三温模型”。通过引入参考土壤和参考植被的概念,不需要输入空气动力学阻抗就可以计算土壤蒸发量(无效绿水流)以及植被蒸发量(有效绿水流)。“三温模型”在计算绿水流时,仅需要净辐射、土壤热通量和温度3个参数。尤其在计算有效绿水流时,土壤热通量可忽略不计,仅需净辐射和温度2个参数。对于不完全覆盖植被区,可以用植被盖度或植被指数(NDVI)等给出无效绿水和有效绿水的权重进行计算。臧传富等<sup>[17]</sup>采用标准化降水指数(SPI)和降水距平指数确定典型年份,通过典型年份(干旱年、湿润年、平水年)来确定流域蓝水和绿水的时空差异特征。

## 3 模型法

水文模型可以模拟水文过程,揭示过程机制,反映水资源的时空特性。与传统理论法、微气象方法相比,模型法可以同时评估区域蓝绿水的时空分布,评估精度相对较高。

在研究土地覆被变化对蓝水、绿水的影响方面,Jewitt等<sup>[18]</sup>基于ArcGIS,小尺度上使用ACRU(agricultural catchments research unit)水文模型,大尺度上使用HYLUC(hydrological land use change)水文模型对绿水流进行评估。Liu等<sup>[19]</sup>利用基于双源蒸散发模型的半分布式水文模型计算蓝、绿水量,尤其定量分析了土地利用变化对蓝绿水转向的影响程度。Gerten等<sup>[20]</sup>在0.5°空间分辨率上使用了LPJ(lund-potsdam-jena)模型评估绿水流,得出了植被变化对绿水流的影响,并用植物生理学理论来解释了这种影响,对模型评估进行了验证。

SWAT(soil and water assessment tool)模型不仅可以评估蓝水<sup>[21]</sup>,同时也是常用的绿水流评估方法。对不同的研究区域,可用模型分析蓝绿水时空分布、气候变化<sup>[22-23]</sup>,以及土地利用/覆盖变化<sup>[23-24]</sup>时的绿水流分布情况及其对农作物的影响。ArcSWAT模型是对SWAT模型的改进<sup>[25]</sup>,也被应用于绿水流的评估。徐宗学等<sup>[26]</sup>在SWAT模型基础上,结合SUFI-2算法对绿水流进行了评估。

Seyam 等<sup>[3]</sup>在大尺度下,利用 STREAM 水文模型评估结果,解决了国际河流在沿河国家的水分配问题。

表 1 列出了不同模型的特点和适用尺度。由表 1 可知,已有的 LPJ 模型、HYLUC 水文模型等估计绿水流大多集中在大尺度上,难以保证其结果的精度,STREAM 水文模型和 ACRU 水文模型虽可应用到小尺度的研究,但都有其地区局限性。而 SWAT 模型可应用于不同空间尺度,故应用比较广泛。

表 1 绿水资源评估模型特点与适用尺度

模型类型	模型特点	适用尺度
LPJ 模型	综合考虑生物地理学、地球化学和水文学的植被动态模型	大尺度,甚至全球尺度
STREAM 水文模型	可评估绿水和蓝水,小尺度上有地区局限性	大尺度和小尺度
SWAT 模型	可评估绿水和蓝水	大尺度和小尺度
ACRU 水文模型	有地区局限性	小尺度
HYLUC 水文模型	参数少	大尺度
耦合物理公式的模型	SPAC 模型	土壤-作物-大气连续体模型
	SVAT 模型	土壤-植物-大气传输模型

随着计算技术的发展,计算模型中开始耦合物理公式,如 SPAC(soil-plant-atmosphere continuum)模型,同时估算绿水流的模型法也出现了分层处理,PM 是典型的单层模型,Shuttleworth 等<sup>[27]</sup>提出了一个双层模型,即土壤和冠层的总通量。如果是模拟大尺度,双层模型精度比单层更高;如果研究对象是小气候、小区域,就需对模型进行多层处理,分别计算参数、系数的空间分布来提高精度。

事实上还有融合较为复杂机理的模型,如 SVAT(soil vegetation atmosphere transfer)模型,它比 SPAC 的双层模型更详尽,同时中间变量的输出可有很好的“反馈”作用,以进行实时修正。虽然“凹凸性”尚且不够,但应用比 SPAC 模型更广泛。但有时机理越复杂的模型,涉及的环境和结构特征变量越多,所需输入数据越多,在实际应用中不确定性可能越大,效果未必比简单模型好<sup>[28]</sup>。

#### 4 遥感法与仪器法

20 世纪 70 年代以来,随着遥感技术的不断发展,用遥感技术估算绿水流成为可能,实质上是判断估算方法(如水分平衡法、PM 公式和模型法等)的参数(如净辐射量、土壤热通量、空气动力学阻抗和表面阻抗等)能否通过遥感技术获得,如果区域参数可以通过遥感技术获得,那么该方法就可以利用遥感信息或数据。应用遥感技术有两方面优势,一是它可以拓展应用区域,尤其是对相关资料缺少的

地区;二是遥感技术可记录整个动态过程,连续性较强,可有选择性地进行研究。无论是否应用遥感技术,阻抗的获得都有一定难度,主要是早期遥感不能得到此参数值。但最近几年来,随着高光谱、热成像技术和高分辨率影像的发展,各类参数的获得成为可能,遥感技术应用将会普及。

仪器法也是通过对参数的测定来评估绿水流。Jewitt<sup>[29]</sup>用大孔径闪烁仪(LAS)和陆面能量平衡法(SEBAL)很好地估算南非流域尺度绿水量。LAS 的工作距离为 0.5~5 km,可以观测近地面数千米尺度上的感热通量,进而可推算潜热通量,最终推算出流域绿水流。

未来绿水流评估模型可把有关表面能量、物质交换的物理学认知,植物生理机能对蒸腾作用的控制的认知和更复杂的机理过程以及遥感技术结合起来,通过气象、下垫面等资料,模型可望预测区域绿水流量。

#### 5 结论与展望

各类方法的适用时空尺度、特点及其关联见表 2 所示。在实际评估中,可针对应用研究区域的尺度大小,选择合适的计算方法。由于先进的遥感技术不仅能提供无实测资料地区的信息,而且可提供动态的、连续的地面参数信息,所以实际应用时遥感信息或数据支持下的微气象学方法和模型法具有更强的可操作性。

表 2 绿水流评估方法的比较

绿水流评估方法	时间尺度	空间尺度	特点	
水分平衡法	蒸渗仪	日—年	点估计	不能反映时空动态变化过程
	水分平衡等	月—年(主要)	主要大区域范围	依据平衡方程,误差主要取决于参数获取误差,以及计算的累计误差,可结合遥感法估计参数
植物生理学方法	小室法	日(最大尺度)	一般为叶片到植株的范围	考虑时间差及空间上的改变,所以该方法一般用于研究或作为对照组,有适用的局限性
	波文比法 涡度相关法	日—月(一般)	小范围流域	主要基于实测的气象参数如温度、湿度、太阳辐射等来计算绿水流,关键是尽量减少对气象因素的干扰,只适用于地表起伏不大的地区,其中以 PM 公式较为常用
微气象学方法	彭曼公式(后期的 PM 公式)	日—月	大尺度范围	
	温度差方法(主要是三温模型)等	日—年	大、小流域均可	
模型法	LPJ 模型、STREAM 水文模型、SWAT 模型、ACRU 水文模型、HYLUC 水文模型、SPAC 模型和 SVAT 模型等等(详见表 1)			
遥感法和仪器法	以上各类方法相应参数的获取			

目前,气候变化导致水资源短缺、分配不均等问题日趋严重。全球有超过6亿人口生活在水资源严重短缺地区<sup>[30]</sup>,无论是充分利用现有的水资源还是开发新的水源,都将是水资源研究的热点。而占全球降水65%的绿水,数量上不可小觑,其研究已被提上日程。相对于蓝水来说,绿水的评估方法还不够成熟,这是由绿水的特点决定的。同时,现有的绿水评估仍存在以下两个问题:一是尺度问题,多集中于大尺度,精度不高,不便于绿水管理;二是区域生产性绿水和非生产性绿水的分离计算问题,农业生产中更注重生产性绿水流。

随着对绿水的组成、机理以及绿水资源生态效应研究的深入,针对绿水评估问题,可以进行小尺度绿水评估以及区域有效绿水和无效绿水的分离。近年来,多源遥感技术和高分辨率影像的发展,为区域绿水流的研究提供了资料可行性,用遥感方法结合气象资料、下垫面情况,使绿水研究进入中小尺度,是未来研究的一个重点。

随着人口的增长、人类未来的需求、变化的景观和气候变化的影响等,绿水评估的影响因素日趋复杂,不确定性加大,应考虑影响因素的权重区域化。尽管绿水在评估方法上仍处于发展阶段,但其已经在水文水资源、气候变化和农业以及生态等研究领域受到越来越多的重视。目前相关国际学术研究机构已经开始致力于绿水研究。不久的将来,其评估方法会更加成熟。在评估出流域绿水流后,绿水可以作为一种资源,服务于粮食生产与维系生态系统。

## 参考文献:

[ 1 ] FALKENMARK M. Coping with water scarcity under rapid population growth [ C ]//Conference of SADC Minister. Pretoria, 1995:23-24.

[ 2 ] ROCKSTRÖM J. On-farm green water estimates as a tool for increased food production in water-scarce regions [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, 1999, 24 ( 4 ) : 375-383.

[ 3 ] SEYAM I, SAVENIJE H H G, AERTS J, et al. Algorithms for water resources distribution in international river basins [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, 2000, 25 ( 3 ) : 309-314.

[ 4 ] FALKENMARK M, ROCKSTRÖM J. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management [ J ]. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE, 2006, 132 ( 3 ) : 129-132.

[ 5 ] SCHIERMEIER Q. Water; a long dry summer [ J ]. Nature, 2008, 452(7185) : 270-273.

[ 6 ] 苏人琼,陈远生. 中国降水量与农田需水量 [ J ]. 中国农

业科技导报, 2000, 2 ( 2 ) : 50-53. ( SU Renqiong, CHEN Yuansheng. The rainfall and farmland water demand in China [ J ]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2000, 2 ( 2 ) : 50-53. ( in Chinese ) )

[ 7 ] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, YANG Hong, et al. Modeling blue and green water availability in Africa [ J ]. Water Resources Research, 2008, 44 ( 7 ) : 30-49.

[ 8 ] 李素丽, 乔光建. 基于生态水文学原理的水资源评价方法 [ J ]. 水利科技与经济, 2011, 17 ( 5 ) : 28-29. ( LI Suli, QIAO Guangjian. Water resources assessment methods based on principles of eco-hydrology [ J ]. Water Conservancy Science and Technology, 2011, 17 ( 5 ) : 28-29. ( in Chinese ) )

[ 9 ] POSTEL S L, DAILY G C, EHRLICH P R. Human appropriation of renewable fresh water [ J ]. Science, 1996, 271 ( 5250 ) : 785-788.

[ 10 ] ROCHSTÖRM J, GORDON L. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: implications for future eco-hydrological landscape management [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, 2001, 26 ( 11/12 ) : 843-851.

[ 11 ] ROCKSTRÖM J, GORDON L, FOLKE C, et al. Linkages among water vapor flows, food production and terrestrial ecosystem services [ J ]. Conservation Ecology, 1999, 3 ( 2 ) : 5.

[ 12 ] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface [ J ]. Physical Review, 1926, 27 ( 6 ) : 779-798.

[ 13 ] SWINBANK W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere [ J ]. Journal of Meteorology, 1951, 8 ( 3 ) : 135-145.

[ 14 ] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [ J ]. Proceedings of Royal Society of London, 1948, 193 ( 1032 ) : 120-145.

[ 15 ] MONTEITH J L. Evaporation and environment [ J ]. Symposia of the Society for Experiment Biology, 1965, 19 : 205-234.

[ 16 ] QIU G Y. A new method for estimation of evapotranspiration [ D ]. Japan: Tottori University, The United Graduate School of Agriculture Science, 1996.

[ 17 ] 臧传富, 刘俊国. 黑河流域蓝绿水在典型年份的时空差异特征 [ J ]. 北京林业大学学报, 2013, 35 ( 3 ) : 1-10. ( ZANG Chuanfu, LIU Junguo. Spatial and temporal pattern difference of blue-green water flows in typical reference years in the Heihe River Basin, Northwestern China [ J ]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35 ( 3 ) : 1-10. ( in Chinese ) )

[ 18 ] JEWITT G P W, GARRATT J A, CALDER I R, et al. Water resources planning and modeling tools for the assessment of land use change in the Luvuvhu Catchment, South Africa [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth,

2004,29(15/18):1233-1241.

- [19] LIU X, REN L, YUAN F, et al. Quantitative the effect of land use and land cover changes on green water and blue water in northern part of China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(6):735-747.
- [20] GERTEN D, HOFF H, BONDEAU A, et al. Contemporary "Green" water flows: simulations with a dynamic global vegetation and water balance model [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(6/7):334-338.
- [21] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of fresh water availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2):30-49.
- [22] 吴洪涛, 武春友, 郝芳华, 等. 绿水的多角度评估及其在碧流河上游地区的应用[J]. 资源科学, 2009, 31(3):420-428. (WU Hongtao, WU Chunyou, HAO Fanghua, et al. Assessment of green water from multi-angle view at catchment scale [J]. Resources Science, 2009, 31(3):420-428. (in Chinese))
- [23] 邱国玉, 尹婧, 熊育久, 等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2):211-218. (QIU Guoyu, YIN Jing, XIONG Yujiu, et al. Studies on the effects of climatic warming-drying trend and land use change on the runoff in the Jinghe River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2):211-218. (in Chinese))
- [24] 张杰, 贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域蓝绿水与不同土地利用类型的绿水差异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4):6-10. (ZHANG Jie, JIA Shaofeng. Study on difference of blue-green water in Huangshui Basin and green water under different types of land use

based on SWAT model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(4):6-10. (in Chinese))

- [25] FARAMARZI M, ABBASPOUR K C, SCHULIN R, et al. Modeling blue green water resources available in Iran [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(3):486-501.
- [26] 徐宗学, 左德鹏. 拓宽思路, 科学评价水资源量: 以渭河流域蓝水绿水水资源量评价为例 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1):12-16. (XU Zongxue, ZUO Depeng. Scientific assessment of water resources with broaden thoughts; a case study on the blue and green water resources in the Wei River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2013, 11(1):12-16. (in Chinese))
- [27] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE R H. Evapotranspiration from sparse crops: an energy combination theory [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111:839-855.
- [28] 冯景泽, 王忠静. 遥感蒸散发模型研究进展综述 [J]. 水利学报, 2012, 43(8):914-925. (FENG Jingze, WANG Zhongjing. A review on evapotranspiration estimation models using remotely sensed data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8):914-925. (in Chinese))
- [29] JEWITT G. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006, 31(15/16):753-762.
- [30] PEREIRA L S, CORDERY I, IACOVIDES I. Coping with water scarcity: addressing the challenges [M]. Springer Netherlands, 2009:77-98.

(收稿日期:2013-09-13 编辑:高渭文)

(上接第 80 页)

- [8] SASIKALA S, TANAKA N, WAHWAH H S Y, et al. Effects of water level fluctuation on radial oxygen loss, root porosity, and nitrogen removal in subsurface vertical flow wetland mesocosms [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(3):410-417.
- [9] 王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(3):359-362. (WANG Shihe, WANG Wei, YU Yan. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(3):359-362. (in Chinese))
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] DONG C, ZHU W, GAO M, et al. Diurnal fluctuations in oxygen release from roots of *acorus calamus* linn in a

modeled constructed wetland [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A, 2011, 46:224-229.

- [12] 彭玉兰, 涂卫国, 包维楷, 等. 九寨沟自然保护区 4 种水深梯度下芦苇分株地上生物量的分配与生长 [J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(2):153-157. (PENG Yulan, TU Weiguo, BAO Weikai, et al. Above ground biomass allocation and growth of phragmites australis ramets at four water depths in the Jiuzhaigou Nature Reserve, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, 14(2):153-157. (in Chinese))
- [13] United States Environment Protection Agency. Manual constructed wetlands treatment of municipal wastewaters [M]. Ohio: USEPA, 2000.

(收稿日期:2013-11-22 编辑:彭桃英)